



**T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**ÇOK HÜCRELİ MASİF MIMO KABLOSUZ İLETİŞİM
SİSTEMLERİ İÇİN SPEKTRUM VERİMLİLİĞİNİN VE GÜÇ
TAHSİSİNİN İNCELENMESİ**

OSMAN DİKMEN

**DOKTORA TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN
DOÇ. DR. SELMAN KULAÇ**

DÜZCE, 2022

T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ÇOK HÜCRELİ MASİF MIMO KABLOSUZ İLETİŞİM
SİSTEMLERİ İÇİN SPEKTRUM VERİMLİLİĞİNİN VE GÜÇ
TAHSİSİNİN İNCELENMESİ

Osman DİKMEN tarafından hazırlanan tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Düzce Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Selman KULAÇ

Düzce Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Selman KULAÇ

Düzce Üniversitesi

Prof. Dr. Ali ÖZTÜRK

Düzce Üniversitesi

Doç. Dr. Hakan KAYA

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi

Doç. Dr. Yusuf ALTUN

Düzce Üniversitesi

Doç. Dr. Mustafa NAMDAR

Kütahya Dumlupınar Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 30/03/2022

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.

30 Mart 2022

Osman DİKMEN



TEŐEKKÖR

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

Bu çalışma boyunca yardımlarını, desteklerini ve dualarını esirgemeyen sevgili anne ve babam başta olmak üzere tüm geniş aileme ve çalışma arkadaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu yoğun süreçte her zaman yanımda olan değerli eşim Zeynep AKIN DİKMEN'e şükranlarımı sunarım.

Son olarak bu tez çalışması boyunca kendileri ile yeteri kadar ilgilenemediğim kızlarım Ayşe Betül DİKMEN'e ve Beyza Nur DİKMEN'e, her ne kadar kendileri farkında olmasa da, varlıklarından ötürü hayatıma güzellikler kattıkları için çok teşekkür ederim.

30 Mart 2022

Osman DİKMEN

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ŞEKİL LİSTESİ	viii
ÇİZELGE LİSTESİ	ix
KISALTMALAR.....	x
KISALTMALAR.....	xi
SİMGELER	xii
SİMGELER	xiii
ÖZET	xiv
ABSTRACT	xv
EXTENDED ABSTRACT	xvi
1. GİRİŞ.....	1
1.1. TEZİN AMACI	3
1.2. TEZ KONUSUNUN ÖNEMİ VE ÖZGÜN DEĞERİ.....	3
1.3. LİTERATÜR TARAMASI	5
1.4. MOTİVASYON VE KATKILAR	8
1.5. ORGANİZASYON	10
2. GELECEK NESİL KABLOSUZ İLETİŞİM	11
3. MASİF ÇOK GİRİŞLİ ÇOK ÇIKIŞLI (MASSIVE MIMO) SİSTEM.....	14
3.1. MASİF MIMO SİSTEM MODELİ	16
3.1.1. Yukarı Bağlantı	17
3.1.2. Aşağı Bağlantı.....	17
3.1.3. Yukarı Bağlantı Pilot İletim Fazı.....	18
3.1.4. Yukarı Bağlantı Veri İletim Fazı	20
4. DOĞRUSAL SİNYAL SEZME VE ÖN KODLAMA TEKNİKLERİ	21
4.1. DOĞRUSAL SİNYAL SEZME	23
4.1.1. Maksimum Olabilirlik (ML) Sezme	24
4.1.2. Maksimum Oran Birleştirme (MRC) Sezme.....	25
4.1.3. Sıfıra Zorlama (ZF) Sezme.....	26
4.1.4. Minimum Ortalama Kare Hatası (MMSE) Sezme	27
4.2. DOĞRUSAL ÖN KODLAMA.....	28
4.2.1. Maksimum Oran İletimi (MRT) Ön Kodlama.....	29
4.2.2. Sıfıra Zorlama (ZF) Ön Kodlama	29
4.2.3. Düzenleştirilmiş Sıfıra Zorlama (RZF) Ön Kodlama.....	30
5. NESNELERİN İNTERNETİ SİSTEMLER İÇİN SPEKTRUM VERİMLİLİĞİ ANALİZİ.....	31

5.1. İLGİLİ ÇALIŞMALAR	33
5.1.1. Zaman Bölmeli Çiftleme (TDD) ve Frekans Bölmeli Çiftleme (FDD)	34
5.1.2. Kanal Durum Bilgisi (CSI)	34
5.2. TEORİK ANALİZ	35
5.3. NÜMERİK ANALİZ	38
5.3.1. Senaryolara göre Öneriler	40
5.3.1.1. <i>Senaryo 1</i>	40
5.3.1.2. <i>Senaryo 2</i>	40
5.3.1.3. <i>Senaryo 3</i>	40
5.3.1.4. <i>Senaryo 4</i>	40
5.3.1.5. <i>Senaryo 5</i>	41
5.4. SONUÇ	41
6. YÜKSEK SPEKTRUM VERİMLİLİĞİ İÇİN İDEAL KULLANICI SAYISININ BELİRLENMESİ	42
6.1. GİRİŞ	42
6.2. SİSTEM MODELİ	45
6.2.1. Yukarı Bağlantı	48
6.2.2. Aşağı Bağlantı	48
6.3. KANAL TAHMİNİ	48
6.4. SPEKTRUM VERİMLİLİĞİ	50
6.4.1. Yukarı Bağlantı için Spektrum Verimliliği	50
6.4.1.1. <i>Maksimum Oran Birleştirme (MRC)</i>	52
6.4.1.2. <i>Sıfıra Zorlama (ZF)</i>	53
6.4.2. Aşağı Bağlantı için Spektrum Verimliliği	53
6.5. SPEKTRUM VERİMLİLİĞİ DENKLEMLERİNİN ELDE EDİLMESİ	55
6.5.1. Kırsal Bölge Yayılım Ortamı	55
6.5.2. Kasaba Bölgesi Yayılım Ortamı	55
6.5.3. Şehir Bölgesi Yayılım Ortamı	55
6.5.4. Kullanıcı Konumlarının Belirlenmesi	58
6.5.5. Spektrum Verimliliği Üst Sınırı	59
6.6. HER BİR HÜCREDEKİ İDEAL KULLANICI SAYISININ BELİRLENMESİ İÇİN BENZETİM SONUÇLARI	60
6.6.1. Birinci Ortam	61
6.6.1.1. <i>MRC</i>	62
6.6.1.2. <i>ZF</i>	62
6.6.2. İkinci Ortam	63
6.6.2.1. <i>MRC</i>	63
6.6.2.2. <i>ZF</i>	63
6.6.3. Üçüncü Ortam	64
6.6.3.1. <i>MRC</i>	64
6.6.3.2. <i>ZF</i>	64
6.7. SONUÇ	65
7. GÜÇ TAHSİSİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ	67
7.1. MIMO SİSTEMLER İÇİN GÜÇ TAHSİSİ	70
7.1.1. Tek Tip (Eşit) Güç Tahsisi	71
7.1.2. Adaptif Güç Tahsisi	72
7.1.2.1. <i>Su-Doldurma (WF) Algoritması</i>	73
7.1.3. Optimuma Yakın Güç Tahsisi	74
7.2. GÜÇ TAHSİSİ YÖNTEMLERİ	75
7.2.1. Spektrum Verimliliği için Güç Tahsisi Stratejileri	76

7.2.2. Enerji Verimliliği için Güç Tahsisi Stratejileri	85
7.3. EŞİT, MAKS-MİN FAYDA VE SINR ÇARPIMLARININ MAKSİMUMU GÜÇ TAHSİSİ YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI	92
7.3.1. Eşit Güç Tahsisi.....	92
7.3.2. Maks-Min Fayda Güç Tahsisi.....	92
7.3.3. SINR Çarpımların Maksimumu Güç Tahsisi.....	93
7.3.4. Yukarı Bağlantı Spektrum Verimliliği.....	94
7.3.4.1. Yukarı Bağlantı İletimi.....	94
7.3.4.2. Sinyal Sezme Teknikleri	95
7.3.5. Yukarı Bağlantı Güç Tahsisi.....	98
7.3.6. Benzetim Sonuçları	99
7.3.7. Değerlendirme ve Sonuç	103
7.4. SINR'LARIN KUTUPLAŞTIRILMASINA BAĞLI YENİ BİR GÜÇ TAHSİSİ ALGORİTMASI YAKLAŞIMI	104
7.4.1. Sistem Modeli	106
7.4.2. Enerji Verimliliği	109
7.4.3. Problem Tanımı.....	109
7.4.4. Masif MIMO için Enerji Verimli Güç Tahsisi Algoritması	110
7.4.5. Benzetim Sonuçları	114
7.4.6. Değerlendirme ve Sonuç	116
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	117
9. KAYNAKLAR	120
ÖZGEÇMİŞ	139

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1. Hücresel ağ.	1
Şekil 1.2. Alan verimliliği.	2
Şekil 2.1. 5G kablosuz iletişim.	12
Şekil 2.2. Yeni nesil kablosuz iletişim ilerleyişi.	12
Şekil 3.1. Masif MIMO sistemi.	14
Şekil 3.2. Çok hücreli masif MIMO modeli.	16
Şekil 4.1. Yukarı bağlantı masif MIMO sistemi.	21
Şekil 4.2. Aşağı bağlantı masif MIMO sistemi.	22
Şekil 4.3. MIMO sezme teknikleri.	24
Şekil 5.1. IoT sistemlerine dayalı WSN mimarisi.	33
Şekil 5.2. MRC kullanarak farklı uzunluktaki pilot dizisi ile TDD ve FDD modunda spektrum verimliliği performansı.	38
Şekil 5.3. ZF kullanarak farklı uzunluktaki pilot dizisi ile TDD ve FDD modunda spektrum verimliliği performansı.	39
Şekil 5.4. MRC kullanan FDD için pilot dizisinin sabit uzunluğuna göre TDD ve FDD modunda spektrum verimliliği performansı.	39
Şekil 5.5. ZF kullanan FDD için pilot dizisinin sabit uzunluğuna göre TDD ve FDD modunda spektrum verimliliği performansı.	40
Şekil 6.1. Çerçeve yapısı.	46
Şekil 6.2. Hücresel ağ.	47
Şekil 6.3. Kullanıcı konumları dağılımı.	59
Şekil 6.4. MRC için spektrum verimliliğin maksimize edildiği ideal kullanıcı sayısı. ..	62
Şekil 6.5. ZF için spektrum verimliliğin maksimize edildiği ideal kullanıcı sayısı.	62
Şekil 6.6. MRC için spektrum verimliliğin maksimize edildiği ideal kullanıcı sayısı. ..	63
Şekil 6.7. ZF için spektrum verimliliğin maksimize edildiği ideal kullanıcı sayısı.	63
Şekil 6.8. MRC için spektrum verimliliğin maksimize edildiği ideal kullanıcı sayısı. ..	64
Şekil 6.9. ZF için spektrum verimliliğin maksimize edildiği ideal kullanıcı sayısı.	64
Şekil 7.1. Güç tahsisi gruplandırma şeması.	71
Şekil 7.2. $M=100$, $K=10$, $L=16$ için MRC ile spektrum verimliliği CDF grafiği.	100
Şekil 7.3. $M=100$, $K=10$, $L=16$ için ZF ile spektrum verimliliği CDF grafiği.	100
Şekil 7.4. $M=100$, $K=10$, $L=16$ için MMSE ile spektrum verimliliği CDF grafiği.	101
Şekil 7.5. Algoritmaların CDF'sinin enerji verimliliği ile karşılaştırması.	115
Şekil 7.6. Algoritmaların her bir hücredeki BS anten sayısı M ile enerji verimliliğinin karşılaştırması.	116

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Çizelge 1.1. Literatür özeti.	6
Çizelge 3.1. Masif MIMO avantajları.	15
Çizelge 6.1. Benzetimde kullanılan bazı parametreler.	60
Çizelge 7.1. Spektrum verimliliği için güç tahsisi çalışmalarının özeti.	77
Çizelge 7.2. Enerji verimliliği için güç tahsisi çalışmalarının özeti.	86
Çizelge 7.3. Kullanılan sembollerin ifadesi.	92
Çizelge 7.4. Sinyal sezme ifadeleri.	97
Çizelge 7.5. Kullanılan parametreler.	99
Çizelge 7.6. MRC için spektrum verimliliği değerleri.	101
Çizelge 7.7. ZF için spektrum verimliliği değerleri.	101
Çizelge 7.8. MMSE için spektrum verimliliği değerleri.	102
Çizelge 7.9. PS-PPA Algoritması için temel benzetim parametreleri.	115



KISALTMALAR

1G	1. Nesil (1. Generation)
5G	5. Nesil (5. Generation)
6G	6. Nesil (6. Generation)
ADMM	Çarpanların Alternatif Yön Yöntemi (Alternate Direction Method of Multipliers)
AP	Erişim Noktası (Access Point)
AWGN	Eklemeli Beyaz Gauss Gürültüsü (Additive White Gaussian Noise)
BDMA	Işın Bölmeli Çoklu Erişim (Beam Division Multiple Access)
BER	Bit Hata Oranı (Bit Error Rate)
BS	Baz İstasyonu (Base Station)
BT	Hüzmeleme Eğitimi (Beamforming Training)
CCCP	İçbükey-Dışbükey Prosedür (Concave-Convex Procedure)
CDF	Kümülatif Dağılım Fonksiyonu (Cumulative Distribution Function)
CSI	Kanal Durumu Bilgisi (Channel State Information)
D2D	Cihazdan Cihaza (Device to Device)
DE	Deterministik Eşdeğer (Deterministic Equivalent)
DL	Aşağı Bağlantı (Downlink)
DL	Derin Öğrenme (Deep Learning)
EE	Enerji Verimliliği (Energy Efficiency)
eMBB	Gelişmiş Mobil Bant (Enhanced mobile broadband)
EPPA	Eşit Pilot Güç Tahsisi (Equal Pilot Power Allocation)
FAPU	Kullanıcı Başına Fayda Bilinci (Fairness-Aware Per-User)
FDD	Frekans Bölmeli Çiftleme (Frequency Division Duplex)
FP	Kesirli Programlama (Fractional Programming)
HPD	Hermitian Pozitif Tanımlı (Hermitian Positive-Definite)
IMT	Uluslararası Mobil Telekomünikasyon (International Mobile Telecommunications)
IoT	Nesnelerin İnterneti (Internet of Things)
IoV	Araçların İnterneti (Internet of Vehicles)
LMMSE	Doğrusal Minimum Ortalama Kare Hatası (Linear Minimum Mean Square Error)
LTE	Uzun Vadeli Evrim (Long-Term Evolution)
M2M	Makineden Makineye (Machine to Machine)
MAC	Medya Erişim Kontrolü (Medium Access Control)
MF	Uyumlu Süzgeç (Matched Filter)
MIMO	Çok Girişli Çok Çıkışlı (Multiple Input Multiple Output)
ML	Maksimum Olabilirlik (Maximum Likelihood)
MMFPA	Maks-Min Fayda Güç Tahsisi (Max-Min Fairness Power Allocation)
MMSE	Minimum Ortalama Kare Hatası (Minimum Mean Square Error)
mMTC	Büyük Makine Tipi İletişim (Massive Machine-Type Communication)
MR	Maksimum Oran (Maximum Ratio)
MRC	Maksimum Oran Birleştirme (Maximum Ratio Combining)
MRT	Maksimum Oran İletimi (Maximum Ratio Transmission)
MSE	Ortalama Kare Hatası (Mean Square Error)
NN	Sinir Ağları (Neural Network)
NR	Yeni Radyo (New Radio)
NSA	Neumann Serisi Yaklaşımı (Neumann Series Approximation)
OFDM	Ortogonal Frekans Bölmeli Çoğullama (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing)
PHY	Fiziksel (Physical)

KISALTMALAR

PS-PPA	SINR Kutuplaştırma Pilot Güç Tahsisi (Polarize SINRs Pilot Power Allocation)
QoS	Hizmet Kalitesi (Quality of Service)
QSEO	Kuantum İlhamlı Sosyal Duygusal Optimizasyon (Quantum-inspired Social Emotional Optimization)
ResDense	Artık Yoğun Blok (Residual Dense Block)
RF	Radio Frekansı (Radio Frequency)
RL	Pekiştirmeli Öğrenme (Reinforcement Learning)
RZF	Düzenleştirilmiş Sıfıra Zorlama
SD	Küre Kod Çözücü (Sphere Decoder)
SE	Spektrum Verimlilik (Spectrum Efficiency)
SEO	Sosyal Duygusal Optimizasyon (Social Emotional Optimization)
SIC	Ardışık Parazit Önleme (Successive Interference Cancellation)
SINR	Sinyal-Parazit-ve-Gürültü Oranı (Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio)
STLC	Uzay Zaman Satırı Kodu (Space-Time Line Code)
SVD	Tekil Değer Ayrışımı (Singular Value Decomposition)
TDD	Zaman Bölmeli Çiftleme (Time Division Duplex)
UE	Kullanıcı Ekipmanı (User Equipment)
UL	Yukarı Bağlantı (Uplink)
URLLC	Ultra Güvenilir Düşük Gecikmeli İletişim (Ultra-Reliable Low-Latency Communications)
WF-PPA	Su Doldurma Pilot Güç Tahsisi (Water-Filling Pilot Power Allocation)
WMMSE	Ağırlıklı Minimum Ortalama Kare Hatası (Weighted Minimum Mean Square Error)
WPCN	Kablosuz Enerjili İletişim Ağı (Wireless Powered Communication Networks)
WSN	Kablosuz Sensör Ağı (Wireless Sensor network)
ZF	Sıfıra Zorlama (Zero Forcing)
ZFR	Sıfıra Zorlama Alımı (Zero Forcing Reception)
ZFT	Sıfıra Zorlama İletimi (Zero Forcing Transmission)

SİMGELER

$H(Y)$	Alınan Sinyalin Entropisi
E	Beklenen Değer
I	Birim Matris
$\mathbf{x}_l$	BS l 'de İletilen Sinyal Vektörü
β_{ijk}	Büyük Ölçekli Sönümlleme Katsayısı
$\mathbf{v}_{lk}$	Doğrusal Sezme Vektörü
$(.)^H$	Eşlenik Devrik
z_{ijk}	Gölge Sönümlemesi
$H(N)$	Gürültü Sinyalinin Entropisi
σ_{UL}^2	Gürültü Varyansı
$\mathbf{N}_i$	Gürültü Vektörü
$\mathbf{n}_j$	Gürültü Vektörü
ρ_{li}	Herhangi Bir Kullanıcının İletim Gücü
y_{jm}	Hücre j 'deki Kullanıcı m 'de Alınan Sinyal
r_{max}	Hücrenin Yarıçapı
Ψ_i	i . Hücredeki K Kullanıcıları Tarafından Kullanılan Pilot Matrisi
$\mathbf{R}_x$	İletilen Sinyalin Kovaryans Matrisi
ϑ	İletim Verimliliği
ε_{ik}	İlişkisiz Girişim ve Gürültü Kombinasyonu
$\mathbf{w}_{jk}$	j . Hücredeki k . Kullanıcı İçin Ön Kodlama Vektörü
r_{ijk}	j . Hücredeki k . Kullanıcı ile i . Hücredeki BS Arasındaki Mesafedir
$\mathbf{h}_{ijk}$	j . Hücredeki k . Kullanıcıdan i . Hücredeki BS'ye Kanal Vektörü
ρ_{jk}	j . Hücredeki k . Kullanıcının Pilot Gücü
$p_{c,k}$	k Kullanıcısından BS'ye Dağıtılan Devre Gücü
$\hat{h}$	Kanal Tahmini
C	Karmaşık Sayıların Kümesi
Φ_j	Kovaryans Matrisi
d_{min}	Kullanıcılar ile BS Arasındaki Minimum Mesafe
$\mathbf{g}_{ijk}$	Küçük Sönümlleme Katsayı Vektörü
s_{lm}	l Hücresindeki m Kullanıcısının Sembolü
L	Lagrange Çarpanı
$p_{c,m}$	m . antende tüketilen güç
P_{max}^{DL}	Maksimum Yukarı Bağlantı İletim Gücü
γ	Maks-Min Fayda Güç Tahsisi SINR
λ_i	Matris Öz Değerleri
$\mathbf{H}^\dagger$	Matrisin Moore-Penrose Sözde Tersi
$ \cdot $	Mutlak Değer
x_{ik}	Normalleştirilmiş İletim Sembolü
b_{jk}	Ortalama Girişim Kazancı
α_{jk}	Ortalama Kanal Kazancı
τ_p	Ortogonal Pilot Dizilerinin Uzunluğu
f	Pilot Yeniden Kullanım Faktörü
$\mathbf{v}$	Sezme Vektörü
$\hat{\mathbf{x}}$	Tahmini Alınan Sinyal

SİMGELER

$(.)^T$	Transpoz
W_c	Tutarlılık Bant Genişliği
T_c	Tutarlılık Süresi
τ_c	Tutarlılık Zaman Aralığı
$V\{\cdot\}$	Varyans
κ	Yol Kaybı Üssü
$d_j(\mathbf{z})$	Yol Kayıplarını ve Gölgeleme Etkilerini İfade Eden Kanal Varyansı
p_{lk}	Yukarı Bağlantı İletim Gücü
$\rho_{11}, \dots, \rho_{LK_L}$	Yukarı Bağlantı İletim Gücü
ρ_u	Yukarı Bağlantı Veri İletim Gücü



ÖZET

ÇOK HÜCRELİ MASİF MIMO KABLOSUZ İLETİŞİM SİSTEMLERİ İÇİN SPEKTRUM VERİMLİLİĞİNİN VE GÜÇ TAHSİSİNİN İNCELENMESİ

Osman DİKMEN

Düzce Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Danışman: Doç. Dr. Selman KULAÇ

Mart 2022, 138 sayfa

Gelecek nesil kablosuz iletişim sistemlerinde, spektrum doluluk problemi nedeni ile yüksek spektrum verimliliğinde (SE) hizmet sunulması en önemli hedefler arasındadır. Bu düşünce ile öncelikle bu tezde, masif MIMO haberleşme sistemlerinde, yüksek SE kazancına odaklanılmıştır. Bu kapsamda, araştırmacılara yol gösterici olması adına, Maksimum Oran Birleştirme (MRC) veya Sıfıra Zorlama (ZF) kullanarak, sabit veya farklı uzunluktaki pilot dizisi ile Zaman Bölmeli Çiftleme (TDD) veya Frekans Bölmeli Çiftleme (FDD) modu kombinasyonlarıyla yüksek SE başarımı sunabilen farklı senaryo analizleri sunulmuştur. Özellikle, masif MIMO sistemlerindeki baz istasyonundaki (BS) antenlerinin sayısı ve pilot yeniden kullanım faktörü ile birlikte ideal kullanıcı terminali sayısının (U), SE bazında etkin kaynak tahsisi açısından önemli olduğu anlaşılmıştır. Bu bağlamda, tezin ilerleyen kısımlarında, üç girişim seviyelerine dayalı olarak, sinyal-parazit-ve-gürültü oranları (SINR) ile birlikte kapalı form SE denklemleri elde edilmiştir. BS'deki anten sayısının bir fonksiyonu olarak, çoklu pilot yeniden kullanım faktörleri ile MRC ve ZF gibi çeşitli işleme şemaları dikkate alınarak benzetimler gerçekleştirilmiştir. Sonuçlardan, U 'nun işleme şemalarına göre değişiklik gösterdiği anlaşılmıştır. Genel olarak, bu sonuçlar, çok hücreli sistemlerde bu tezde elde edilen U dikkate alındığında, SE'den azami seviyede yararlanılabilecek olması ile literatüre katkı olarak sunulmuştur. Böylelikle, heterojen ağlarda SE açısından ideal U sayısına ulaşan bir hücreye dâhil olmak isteyen kullanıcının başka bir ağa yönlendirilmesi için ağ değiştirme algoritmalarına girdi verisi sunulmuştur. Ayrıca, bu tez çalışmasında masif MIMO sistemlerinde enerji verimliliğini (EE) en üst düzeye çıkarmak için yenilikçi bir pilot güç tahsisi algoritması önerilmiştir. Algoritma, ilgili SINR değerlerini polarize ederek pilot güçlerini optimize etmektedir. Optimize edilen bu güç değerleri sayesinde, toplam harcanan güç bütçesinin daha da düşürüldüğü gözlemlenmiştir. Algoritmanın başarımı, benzetim sisteminin kümülatif dağılım fonksiyonu (CDF)-EE çıktıları kullanılarak ölçülmüştür. Ayrıca, aynı benzetim ortamları altındaki başarımları karşılaştırmak için eşit pilot güç tahsisi (EPPA) ve su doldurma pilot güç tahsisi (WF-PPA) şemaları da uygulanmış ve önerilen sezgisel yaklaşımımızın EPPA ve WF-PPA yöntemlerinden daha üstün olduğu kanıtlanmıştır.

Anahtar sözcükler: Enerji verimliliği, Güç tahsisi, Kaynak tahsisi, Masif MIMO, Spektrum verimliliği.

ABSTRACT

INVESTIGATION OF SPECTRUM EFFICIENCY AND POWER ALLOCATION FOR MASSIVE MIMO MULTI-CELL WIRELESS COMMUNICATION SYSTEMS

Osman DİKMEN

Düzce University

Institute of Graduate Studies, Department of Electrical Electronics Engineering

Doctoral Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Selman KULAÇ

March 2022, 138 pages

In the next generation wireless communication systems, providing high spectrum efficiency (SE) service is among the most important targets due to the spectrum occupancy problem. Hereby, this thesis focuses on high SE gain in massive MIMO communication systems. In this context, different scenario analyzes that provide high SE performance using Maximum Ratio Combining (MRC) or Zero Forcing (ZF) with either a fixed or different length pilot sequence with Time Division Duplex (TDD) or Frequency Division Duplex (FDD) mode combinations are presented to guide the researchers. In particular, it has been understood that the number of antennas in the base station (BS) and the pilot reuse factor in massive MIMO systems, as well as the ideal number of user terminals (U), are important for efficient resource allocation on the basis of SE. Within this scope, closed-form SE equations with signal-to-noise-and-noise ratios (SINR) based on three interference levels are obtained later in the thesis. Simulations are performed considering multiple pilot reuse factors and various processing schemes such as MRC and ZF as a function of the number of antennas in the BS. From the results, it was understood that U varies according to the processing schemes. In general, these results are presented as a contribution to the literature, with the maximum utilization of SE in multicellular systems, considering the U obtained in this thesis. Thus, in heterogeneous networks, the input data is presented to the network switching algorithms for routing the user to another network that wants to be included in a cell that reaches the ideal U number in terms of SE. Also, in this thesis, a novel pilot power allocation algorithm is proposed to maximize energy efficiency (EE) in massive MIMO systems. The algorithm optimizes the pilot powers by polarizing the corresponding SINR values. It has been observed that the total power budget is reduced even more thanks to these optimized power values. The performance of the algorithm was measured using the cumulative distribution function (CDF)-EE outputs of the simulation system. In addition, equal pilot power allocation (EPPA) and water fill pilot power allocation (WF-PPA) schemes have also been applied to compare performances under the same simulation environments, and our proposed heuristic approach has proven to be superior to EPPA and WF-PPA methods.

Keywords: Energy efficiency, Power allocation, Resource allocation, Massive MIMO, Spectrum efficiency.

EXTENDED ABSTRACT

INVESTIGATION OF SPECTRUM EFFICIENCY AND POWER ALLOCATION FOR MASSIVE MIMO MULTI-CELL WIRELESS COMMUNICATION SYSTEMS

Osman DİKMEN

Düzce University

Institute of Graduate Studies, Department of Electrical Electronics Engineering

Doctoral Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Selman KULAÇ

March 2022, 138 pages

1. INTRODUCTION

Massive Multiple-Input Multiple-Output (Massive MIMO) systems are one of the most emphasized points in next generation wireless communication systems. As a result of the multiple antenna gains provided by these systems, performance improvements can be realized in communication systems. One of the topics in this thesis is the spectrum efficiency improvement in next generation communication systems, taking into account the Massive MIMO system. When the studies on spectrum efficiency are examined, there is a given number of users on the basis of the analyses, developed methods and suggested methods. However, resource allocation has an important point in MIMO. It is important to use the limited number of pilots efficiently. From this point of view, determining the ideal number of users for spectrum efficiency is the main subject of this thesis. Although there is a similar study for single-cell systems, it is currently not sufficient to derive spectrum efficiency equations by considering the ideal number of users in multi-cell systems and different locations of users. In this respect, determining the ideal number of users is the original value of this thesis.

In addition, random power allocation is often considered in next generation wireless communication technologies. In fact, most numerical results are obtained assuming equal power allocation for downlink and uplink transmission. A power-allocated structure that adopts different strategies rather than equal power allocation should be considered if some performance efficiencies are to be maximized. Another unique point in the thesis is to determine some power allocation methods for spectrum efficiency and energy efficiency by examining the effect of power allocation in multi-cell systems. Besides, the results of

a new proposed power allocation algorithm are shown in terms of energy efficiency in massive MIMO systems.

2. MATERIAL AND METHODS

In wireless communication technologies with sixth generation (6G) and beyond network system, it is assumed that a multi-user multi-input multiple-output (MIMO) system is enhanced with optimum spectrum efficiency. In particular, it has been understood that the number of antennas in the base station (BS) and the pilot reuse factor in massive MIMO systems, as well as the ideal number of user terminals (U), are important for efficient resource allocation on the basis of SE. Within this scope, closed-form SE equations with signal-to-noise-and-noise ratios (SINR) based on three interference levels are obtained later in the thesis. Simulations are performed considering multiple pilot reuse factors and various processing schemes such as MRC and ZF as a function of the number of antennas in the BS. Analyzes for numerical results are performed with Monte-Carlo simulations in MATLAB environment. From the results, it was understood that U varies according to the processing schemes. In general, these results are presented as a contribution to the literature, with the maximum utilization of SE in multicellular systems, considering the U obtained in this thesis. Thus, in heterogeneous networks, the input data is presented to the network switching algorithms for routing the user to another network that wants to be included in a cell that reaches the ideal U number in terms of SE.

Power allocation methods are important to deliver the best data outputs for all users in a cell. One of the most used methods is max-min fairness power allocation (MMFPA). Its overall aim is to increase the user's worst SINR value. There are many current massive MIMO studies where users have equal power coefficients. However, equal power allocation may not be the best solution to improve system performance due to multi-user interference. Because in systems with power limit, equal power allocation is not an optimal solution since the energy source is not fully utilized. Therefore, researchers are motivated to propose new power allocation algorithms for massive MIMO systems. Thus, power allocations in MIMO systems continue to be examined day by day. In this part of the thesis, the power allocation algorithms that are proposed and developed for massive MIMO, especially in spectrum and energy efficiency, are examined. So, the basic foundations of the studies are revealed. Some advantages and disadvantages are mentioned. As a result, a general evaluation study is put forward. With this literature studies, a new power allocation algorithm approach and its results are given in the last

section. The performance of the proposed polarize SINRs pilot power allocation (PS-PPA) method is demonstrated by comparing with the equal pilot power allocation (EPPA) and water-filling pilot power allocation (WF-PPA) algorithms. 10K simulations are performed on MATLAB. During the determination of users' locations and their corresponding channel states, Monte Carlo Methodology is used to objectively compare algorithms by obtaining statistically significant results.

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

In the equations expressed for spectrum efficiency, the importance of the location of the user terminals is easily understood. Considering this situation, in the thesis, it is aimed to determine optimum users in order to benefit from the spectrum efficiency at least according to the positions of the users in the system. As a result of the numerical analyzes performed for this purpose, it has been observed that the ideal number of users U approaches $\frac{S}{2f}$. It has also been understood that this result obtained is independent of the linear detection schemes used in the system such as ZF and MRC. However, the effect of the pilot reuse factor is significant as can be seen from this approach. Finally, it should be remembered that this study did not include an evaluation of any hardware impairments or the effect of some other parameters.

The proposed power allocation algorithm compares the cumulative distribution function of the system's energy efficiency with two alternative methods: EPPA and WF-PPA. The results clearly show that a significant overall capacity increase and thus energy efficiency can be carried out. The proposed approach is superior to other algorithms as can be seen from the numerical analysis. The ranking of algorithms according to SINRs for the same CDF value is $EPPA < WF-PPA < PS-PPA$. In other words, PS-PPA provides much more energy efficiency for a corresponding CDF value.

4. CONCLUSION AND OUTLOOK

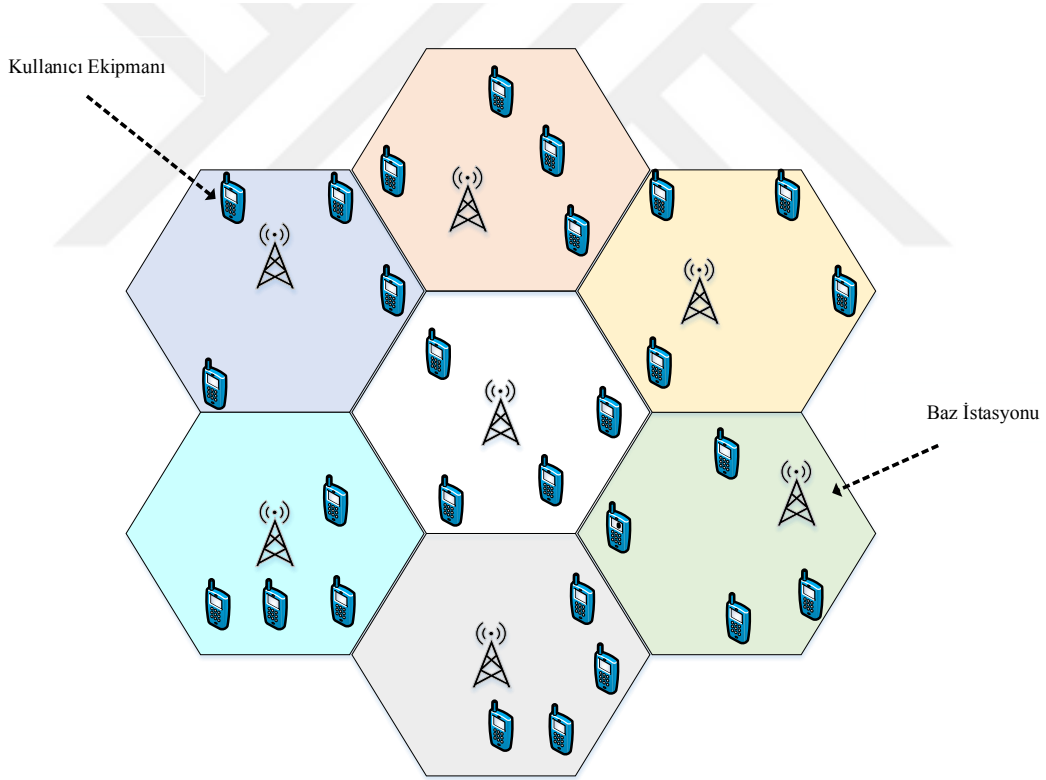
Determining the ideal number of users in the Massive MIMO system enables efficient resource allocation by providing spectrum efficiency. Because the limited number of orthogonal pilot arrays given for use in the system must be allocated intelligently among users. For this reason, in the relevant part of this thesis, the analysis of determining the ideal number of users that will provide spectrum efficiency has been carried out. Generally, high SEs per cell are achieved by scheduling many users for simultaneous transmission. MRC can program the largest number of users although it gives the lowest

SE per user. ZF processing is generally the best choice for SE per cell. Extensive simulations show that $f = 3$ pilot reuse factor is generally a good choice for massive MIMO. Considering the simulations, it is noticed that the massive MIMO system with $M = 100$ can easily achieve 10x gain over the 3 bit/s/Hz/cell requirement specified by IMT-Advanced for SE. For large arrays with $M = 500$ antennas, massive MIMO can even achieve 30x gain over IMT-Advanced. In addition, this study was examined without the influence of any hardware malfunctions or other parameters. Adding hardware malfunction and other system parameters and examining their effects are considered as future study topics.

The novelty in the second of the two main points of the thesis, the study of the power allocation effect, is a new and different power allocation algorithm approach as a result of the findings obtained by examining the power allocation algorithms. With this new power allocation algorithm, results are presented for a massive MIMO system with 19 cells, which is more suitable to the real environment, unlike the power allocation algorithms recommended for systems with a certain number of cells, which is called multi-cell structure in the literature. In addition, the situation of not getting results at some discontinuity points in the Lagrangian method in the basic approach of the water-filling (WF) algorithm, which is an optimum approach, can be eliminated with the proposed PS-PPA algorithm. As a matter of fact, the results show that the proposed PS-PPA approach is superior to EPPA and WF-PPA. Future work topics include solving the pilot contamination problem with pilot assignment and power allocation. It is conceivable to focus on a common model of these two approaches. Also, Reinforcement Learning (RL) is a well-suited solution for such a dynamically changing optimization problem as a machine learning technique. So, it is aimed to solve this problem by using RL to get better results.

1. GİRİŞ

Çok hücreli sistemler, kablosuz haberleşme teknolojilerinde gün geçtikçe büyük öneme sahip olmaktadır. Günümüzde özellikle akıllı teknolojilerin kullanımının yoğunluğunun artması nedeniyle gelecek nesil kablosuz iletişim sistemlerindeki iyileştirmeler önemli bir yer tutmaktadır. Gelecek nesil kablosuz haberleşme sistemlerinin özellikle üzerinde durduğu noktalardan biri de Masif Çok Girişli Çok Çıkışlı (Massive MIMO) sistemlerdir. Bu sistemlerin getirmiş olduğu çoklu anten kazanımları neticesinde haberleşme sistemlerinde verimlilik iyileştirmeleri mümkün olmaktadır. Bir hücresel ağ, bir dizi baz istasyonundan (BS) ve bir dizi kullanıcı ekipmanından (UE) oluşur. Her UE, ona hizmet veren BS'den birine bağlanır. Aşağıdaki Şekil 1.1'de hücresel bir ağ örneği gösterilmiştir.

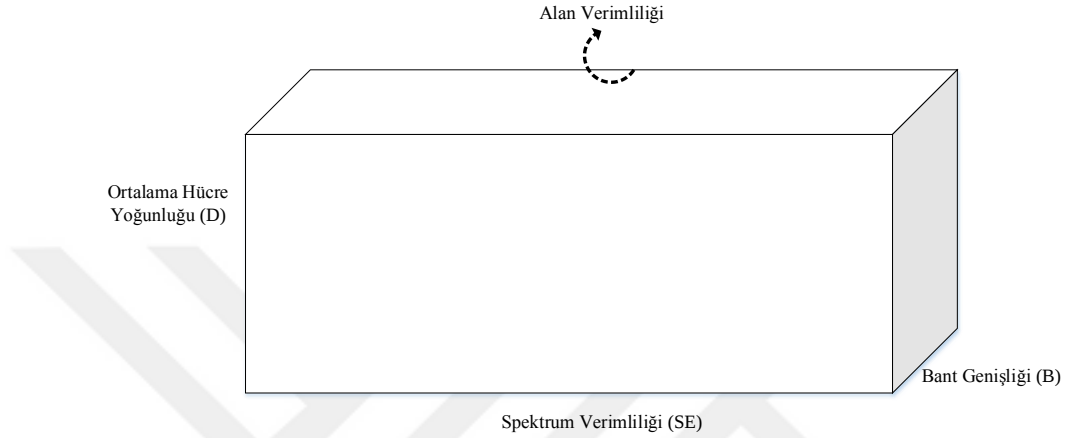


Şekil 1.1. Hücresel ağ.

Bir hücresel ağın alan verimi Şekil 1.2'de gösterildiği gibi bit/s/km² cinsinden ölçülmektedir. B bant genişliğini, D hücre yoğunluğunu, SE ise spektrum verimliliğini göstermektedir. SE, birim bant genişliği içerisinde saniyede aktarılan bilgi miktarıdır.

Gelecek nesil kablosuz iletişim teknolojilerinden beklenen, alan verimliliğinin artırılmasıdır. Bunun için izlenmesi gereken yollar şu şekildedir:

- Daha fazla bant genişliği tahsis etmek
- Daha fazla BS ekleyerek hücresel ağı yoğunlaştırmak
- Hücre başına spektrum verimliliğini artırmak



Şekil 1.2. Alan verimliliği.

Bu tezde gelecek nesil haberleşme sistemlerinde alan verimliliğinin sağlanması için spektrum verimliliği iyileştirmesi üzerinde durulmaktadır. Spektrum verimliliği artırmada önemli bir rol oynayan masif MIMO sistemi üzerine odaklanılmıştır. Spektrum verimliliğin sağlanması adına üzerinde durulması düşünülen esas nokta ise ideal kullanıcı sayısının belirlenmesidir. Bu sayede hücresel sistemlerin spektrum verimliliği adına hizmet vermesi düşünülen kullanıcı sayıları belirlenmiş olacaktır. Böylece maksimum spektrum verimliliği için hücrelerin hizmet verebileceği ideal kullanıcı sayısının belirlenmesi ile tasarlanması gereken MIMO sistemlerinin temeli saptanacaktır. Bu sayede, hücre tasarım şartları oluşmuş olacaktır.

Tezde diğer bir odaklanılan nokta güç tahsisidir. Masif MIMO ile ilgili çalışmalarda güç tahsisinin aşağı bağlantı ve yukarı bağlantı iletimleri için rastgele olduğu varsayılsa da genellikle işlemler eşit güç tahsisine göre gerçekleştirilmektedir. Fakat maksimum performans verimliliği adına farklı güç tahsisleri önemlidir. Tezin bu kısmında güç tahsisinin çok hücreli sistemlerde etkisinin incelenmesi gerçekleştirilmektedir. Ayrıca önerilen yeni bir güç tahsisi yönteminin enerji verimliliğine katkıları ele alınmaktadır.

1.1. TEZİN AMACI

Masif MIMO gelecek nesil kablosuz iletişim sistemleri spektrum verimliliğini (SE) iyileştirmek için baz istasyonlarında yüzlerce anten ile donatılan bir tekniktir. Spektrum verimliliğinin tanımı henüz tam olarak ifade edilmemiştir. Bu tezde amaçlardan biri, spektrum verimliliği maksimize etmek için en uygun kullanıcı sayısının belirlenmesinin analiz edilmesidir.

Tez üzerinde durulacak diğer bir amaç ise optimum güç tahsisinin çok hücreli sistemlere etkisini belirlemek ve özellikle enerji verimliliği ve spektrum verimliliği adına güç kontrolü yöntemlerin saptanması sağlamaktır. Ayrıca geliştirilen güç tahsisi algoritmasının enerji verimliliği açısından literatürde kullanılan diğer bazı algoritmalara göre kıyasının gerçekleştirilmesidir.

1.2. TEZ KONUSUNUN ÖNEMİ VE ÖZGÜN DEĞERİ

Kablosuz iletişim teknolojilerinde kullanıcıların taleplerinden kaynaklı bir veri hacmi söz konusu olmasına rağmen, kullanılabilecek mevcut olan spektrum tayfının aynı şekilde doğrusal bir artış göstermesi söz konusu değildir. Dolayısıyla, yeni nesil teknolojilerde gerçekleştirilecek tüm aşamalar için belirli bant aralıkları mevcut olduğundan spektrum verimliliğinde gerekli iyileştirmelerin yapılması daha uygun bir çözüm olarak görünmektedir. Ayrıca nesnelerin interneti sistemlerin de etkisiyle birlikte birbirleriyle iletişim halinde olan cihazların sayısının çok hızlı bir şekilde artmasıyla birlikte daha etkin bir spektrum kullanımının önemi anlaşılmaktadır. Şu andaki kullanılan mobil iletişim teknolojilerinin çalışma aralıkları genelde 6GHz'in altındaki frekans bantlarıdır. Diğer tüm kablosuz iletişim sistemleri de düşünüldüğünde bu frekans bantlarının kullanımı yeteri kadar doluluk oranına ulaştığından dolayı 5. Nesil (5G) ve ötesi haberleşme sistemleri için bazı yetersizlikler söz konusu olmaktadır. Bu durumlar göz önüne alınarak etkin spektrum kullanımının sağlanması kaçınılmazdır.

Masif MIMO kullanılarak spektrum verimliliğinin geliştirilmesi için birçok çalışma mevcuttur. Masif MIMO sistemler için kullanışlı ve spektrum verimliliklerin karşılaştırıldığı hüzmleme eğitimi şeması önerilmiştir [1]. Başka bir masif MIMO çalışmasında, önerilen kanal modeli için spektrum verimliliği analiz edilmiştir. Genel olarak masif MIMO ile birlikte spektrum verimliliğinde mükemmel artışların olduğunun belirtildiği çalışmalar mevcuttur. Son zamanlardaki bu çalışmaların yanında, masif

MIMO ile birlikte spektrum verimliliğinin artırılması için önerilmiş olan MIMO- Zaman Bölmeli Çiftleme (TDD) mimarisi göstermektedir ki, spektrum verimliliği uzun zamandan beri araştırmacıların yoğunlaştığı bir konudur. Bugünkü kullanılan sistemler incelendiğinde frekans bantları 6 GHz altındadır. Fakat bu bantların yoğun bir şekilde kullanılmasından dolayı 5G ve ötesi teknolojiler için yeterli olmayacaktır. Bu durumda ötürü spektrum verimliliği iyileştirilmesi hala önemli bir noktadır.

Masif MIMO üzerine yapılan araştırmalar genel olarak şu ana kadar temel fiziksel katman (PHY) özelliklerinin kurulmasına yöneliktir. Özellikle, bu tezde kanal durumu bilgisinin (CSI) elde edilmesinin kanal tutarlılık bloğu tarafından sınırlandırılmasına ve bu durumun SE'yi nasıl etkilediğine ve hücreler arası paraziti azaltmaya odaklanılmakla birlikte masif MIMO'da çoğullamanın enerji verimliliğindeki iyileştirmeleri de düşünülmüştür. Fakat literatürün genelinde bildiğimiz kadarıyla özellikle medya erişim kontrolü (MAC) katmanındaki kullanıcı programlaması gibi kaynak tahsisi problemlerine kısaca değinilmiştir.

Spektrum verimliliği ile ilgili çalışmalar incelendiğinde, yapılan analizlerin, geliştirilen metotların ve önerilen yöntemlerin temelinde sabit sayıdaki kullanıcı sayısı yer almaktadır. Fakat MIMO'da kaynak tahsisi önemli bir yer tutmaktadır. Sınırlı sayıdaki pilotların verimli kullanılması esastır. Buradan yola çıkılarak, spektrum verimliliği için ideal kullanıcı sayısının belirlenmesi bu tezin ana konularındandır. Tek hücreli sistemler için benzer mantıkta bir çalışma olmasına rağmen, çok hücreli sistemlerde ideal kullanıcı sayısının özellikle kullanıcıların farklı yerleşimleri için spektrum verimliliği denklemleri şu an için henüz mevcut değildir. Bu durumun giderilmesi bu tezin özgün değeridir.

Ayrıca, gelecek nesil kablosuz iletişim teknolojilerinde genellikle rastgele güç tahsisi düşünülmektedir. Hatta çoğu sayısal sonuçlar aşağı ve yukarı bağlantı için eşit güç tahsisi varsayımı ile hesaplanmaktadır. Elde edilen bazı performans verimlilikleri en üst düzeye çıkarmak isteniyorsa eşit güç tahsisinden ziyade, farklı stratejileri benimseyen güç kontrollü bir yapı dikkate alınmalıdır. Tezdeki diğer bir özgün nokta, çok hücreli sistemlerde güç tahsisinin etkisinin incelenerek, spektrum verimliliği ve enerji verimliliği için bazı güç kontrolü yöntemlerinin saptanmasıdır. Ayrıca önerilen yeni bir güç tahsisi algoritmasının masif MIMO sistemlerde enerji verimliliği açısından sonuçların karşılaştırılmasıdır.

1.3. LİTERATÜR TARAMASI

Masif MIMO hakkındaki çalışmalar incelendiğinde, araştırmacıların genel olarak kanal durum bilgisinin elde edilmesi, hücreler arası girişimlerin engellenmesi gibi temel fiziksel katman özelliklerine yoğunlaştıkları gözlemlenmektedir [2]–[4]. Daha sonraki bazı çalışmalarda masif MIMO’nun enerji verimliliğindeki iyileştirmelere olan katkılarına değinilmiştir [5]–[7]. Bununla birlikte, alıcı-vericilerin donanım bozulmalarının masif MIMO sistemlerde etkisinin eski sistemlere göre daha azaldığı ile alakalı da çalışmalar yapılmıştır [8]–[10]. Fakat kullanıcıların programlanması, kaynak tahsisinin ideal bir şekilde belirlenmesi üzerine çalışmalar yeteri kadar gerçekleştirilmemiştir. Bununla alakalı ilk çalışmaların mevcut olduğu [11]’de, kullanıcılar belli gruplara ayrıştırılmıştır. Burada temel mantık, sınırlı ortogonal pilot dizilerinin kullanıcılar arasında uygun bir şekilde paylaşılmasıdır. Bu paylaşma işleminin ise çeşitli yöntemlerle gerçekleştirildiği bazı çalışmalarda mevcuttur [12], [13]. Spektrum verimliliği en üst düzeye çıkarmak için kaynak tahsisinin ele alınması önemli bir konudur. Hücre başına programlanması gereken kullanıcı sayısının belirlenmesi, çok hücreli sistemler için cevaplandırılmış bir nokta değildir. Literatüre genel olarak bakıldığında, tek hücreli sistemler için bu konuda bazı çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmalardan biri [5]’tir. Burada genel olarak sabit kullanıcı sayısı ile işlemler gerçekleştirilmiş olsa da sembol sayısına göre belirli bir anten sayısında kullanıcı sayısının optimum alabileceği değer hesaplanmıştır. Çok kullanıcılı çok girişli çok çıkışlı (MIMO) bir sistemin sıfırdan, maksimum spektrum verimliliğine sahip belirli bir alanı düzgün bir şekilde kapatacak şekilde tasarlandığı varsayıldığında ideal anten sayısı ve aktif kullanıcı sayısı nedir? Çok hücreli sistemler için kaynak tahsisinin, tutarlılık blok uzunluğunun ve pilot yeniden kullanım faktörünün spektrum verimliliği için ideal kullanıcı sayısını nasıl etkilediğinin sorusunun cevaplanması bu tezin ana konusudur.

Son çalışmalar incelendiğinde kullanıcı sayıları ile alakalı olarak kullanıcıların planlanmasına yönelik çalışmaların arttığı görülmektedir. [14]’teki çalışmada, kullanıcı planlaması için yeni bir metot önerilmiştir. Burada, neredeyse en uygun yarı ortogonal kullanıcıların seçimi için ışın oluşturma yöntemi üzerinde durulmuştur. Kullanıcı sayısının artmasıyla birlikte önerdikleri yöntemin en uygun yöntem olduğunu vurgulamışlardır. Başka bir çalışmada, adil bir kullanıcı planlamasının gerçekleştirilmesi için ortak bir gruplandırma ve zamanlama algoritması önerilmiştir [15]. Burada kullanıcıların belirli yöntemlerle gruplara bölündüğü bir yöntem üzerinde durulmuştur.

Başka bir çalışmada ise masif MIMO sistemlerinde geri besleme sorunun azaltılması için, baz istasyonuna CSI bildiren kullanıcı sayılarının azaltılması planlanmıştır [16]. Bunun için, hücre kullanıcıları rastgele olarak belirli gruplara ayrılmışlardır. Böylece aynı gruptakiler kanal durum bilgilerinin geri bildirimlerini kendileri belirleyebileceklerdir. Kullanıcıların planlanması ile alakalı çalışmaların geneli, sabit bir kullanıcı sayısındaki sistemlerde performans kaybını en aza indirecek, yüksek enerji tüketimini ve maliyetini azaltacak yeni yöntemler üzerinde durmaktadır.

Tezin ana konusu olan spektrum verimliliği ile alakalı olarak literatür taraması incelendiğinde Çizelge 1.1’de aşağıdaki gibi özetlenmiş durumlar gözlemlenmektedir:

Çizelge 1.1. Literatür özeti.

Kaynak	Ön Kodlama/Sinyal Sezme Tekniği	Kanal Tahmini	Kullanıcı Sayısı Durumu	Performans Metriği
[17]	MR, RZF	LMMSE	Sabit kullanıcı sayısı	Spektrum verimliliği, Eğitim sembolleri
[18]	MRT	MMSE	Sabit kullanıcı sayısı	Spektrum verimliliği- CDF
[19]	MRT, RZF, ZF	Mükemmel CSI	5 ile 20 arası	Spektrum verimliliği-CDF
[20]	MR	-	Sabit kullanıcı sayısı	Spektrum verimliliği
[21]	MRC, ZF	-	Sabit kullanıcı sayısı	Spektrum verimliliği-CDF, PDF
[22]	MRC, ZF	-	5 ile 20 arası	Spektrum verimliliği
[23]	ZF	MMSE	Sabit kullanıcı sayısı	Spektrum verimliliği, EVM
[24]	MRT, ZF	MMSE	1 ile 50 arası	Spektrum verimliliği-CDF

Çizelge 1.1. Literatür özeti (Devamı).

Kaynak	Ön Kodlama/Sinyal Sezme Tekniği	Kanal Tahmini	Kullanıcı Sayısı Durumu	Performans Metriği
[25]	ZF	-	Sabit kullanıcı sayısı	Spektrum verimliliği
[26]	ZF	MSE	Sabit kullanıcı sayısı ve 1 ile 50 arası	Spektrum verimliliği
[27]	SVD	-	Tek kullanıcı	Spektrum verimliliği
[28]	ZF, MRT/MRC	MMSE	Sabit kullanıcı sayısı	Ortalama toplam oran
[29]	ZF	MMSE	1 ile 100 arası	Spektrum verimliliği-CDF,
[30]	MRC/MRT, ZFR/ZFT	MMSE	Sabit kullanıcı sayısı	Spektrum verimliliği, Enerji verimliliği
[31]	MRC/MRT, ZFR/ZFT	MMSE	1 ile 100 arası	Spektrum verimliliği, Enerji verimliliği
[32]	MRT	MMSE	5 ile 30 arası	Spektrum verimliliği

Yukarıdaki tablodan da görüleceği üzere spektrum verimliliğin sağlanması için çeşitli güncel kaynaklar mevcuttur. Bu kaynaklar incelendiğinde spektrum verimliliğin sağlanması için farklı kanallar, farklı işleme şemaları, farklı ön kodlama/sinyal sezme teknikleri, farklı kanal tahmin yöntemleri ve farklı mimari yapılar önerilmiştir. Fakat tüm bu çalışmalarda kullanıcı sayısı ile alakalı olarak belli bir sabit sayıdaki kullanıcılar üzerinde durulmuştur. Kullanıcıların planlanması ya da ideal kullanıcı sayısının ne olması gerektiği ile ilgilenilmemiştir. Bu tezin esas amacı ise kaynak tahsisinin önemi dikkate alarak spektrum verimliliğin sağlanması için ideal kullanıcı sayısının ne olması gerektiğinin cevabını tutarlılık blok uzunluğu, anten sayısı ve pilot yeniden kullanım

faktörü gibi parametreler ölçüsünde bulmaya çalışmaktır. Literatürde bu soruya bildiğimiz kadarı ile özellikle çok hücreli sistemler için henüz cevap verilmemiştir.

Tezin diğer bir kısmı spektrum verimliliği ve enerji verimliliği açısından güç tahsisinin incelenmesidir. Masif MIMO sistemlerindeki performans iyileştirmesi için gerçekleştirilen analizlerde keyfi olarak seçilen güç katsayılarının uygulanması durumu söz konusu olsa da genel olarak yukarı ve aşağı bağlantı için eşit güç tahsisine göre gerçekleştirilen çalışmalar da mevcuttur. Fakat spektrum verimliliği, enerji verimliliği ve diğer bazı performans iyileştirmeleri için güç tahsisinin nasıl olması gerektiğine dair incelemeler son zamanlarda önem kazanmaya başlamıştır. Spektrum verimliliği ve enerji verimliliği en üst düzeye çıkaran güç tahsisi yöntemleri üzerinde durmak tezin ikinci kısmını oluşturacaktır. Literatüre genel olarak bakıldığında spektrum verimliliği maksimize etmek için çeşitli güç tahsisi yöntemleri önerilmiştir [18], [22], [33]–[35]. Fakat hem yukarı bağlantı (UL) hem de aşağı bağlantıdaki (DL) kullanıcı başına eşit güç tahsisi varsayımı bazı fayda fonksiyonlarını en üst düzeye çıkarmak için genellikle en uygun strateji değildir. Eşit olarak dağıtılmayan güç tahsisi bu durumu gidermek için ilk olarak düşünülmesi gereken yöntem olabilir. Bunun netleştirilmesi için tezin bu bölümünde spektrum verimliliği ve enerji verimliliği en üst düzeye çıkaran güç tahsisi yöntemlerine değinilmiştir. Karşılaştırmalar eşit güç dağılımlı duruma göre gerçekleştirilmiştir. Bunun yanında, yeni bir güç tahsisi algoritması önerilmiştir. Bu önerilen algoritmanın enerji verimliliği açısından performansı dikkate alınmıştır. Sonuçlar literatürde kullanılan bazı diğer algoritmalarla karşılaştırılmıştır.

1.4. MOTİVASYON VE KATKILAR

Gelecek nesil kablosuz iletişim teknolojilerinde masif MIMO sistemlerin önemi gün geçtikçe bu konu üzerinde gerçekleştirilen çalışmaların sayısının artmasıyla çok rahat bir şekilde fark edilmektedir. Dolayısıyla bu tez çalışması kapsamında sistem modeli olarak masif MIMO planlanmıştır. Daha sonraki aşamalarda ise özellikle akıllı cihazların kullanımlarının ve bunların birbirleriyle iletişimlerinin neticesinde devasa bir ağ sistemine dönüşmüş olan teknolojiye spektrum doluluk durumları ve artan enerji kullanımları üzerinde düşünülmesi gereken öncelikli iyileştirmeler olarak göze çarpmaktadır. Bu bağlamda, bu tez kapsamında spektrum ve enerji verimliliğine odaklanan çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu geliştirilen ve önerilen ifadeler neticesinde tez çalışmasının ana katkıları kısaca aşağıdaki gibi sıralanmıştır:

- Nesnelerin İnterneti (IoT) tabanlı kablosuz algılayıcı ağların da dâhil olabileceği karmaşık bir masif MIMO haberleşme sistemi kurulması durumunda yüksek spektrum verimliliği başarımı sunabilen beş farklı senaryoya göre öneriler sunulmuştur. Bu öneriler neticesinde haberleşme sistemi için spektrum verimliliği etkin bir şekilde elde edebilmek adına TDD ve FDD yöntemlerinin performans değerlendirilmeleri gerçekleştirilmiştir.
- 6G ve ötesi ağlar gibi yeni nesil kablosuz iletişim teknolojilerinde çok kullanıcılı masif MIMO sistemindeki bir bölgenin spektrum verimliliğinin asgari olarak kullanılabilmesi için planlanması gereken kullanıcı terminali sayısı belirlenmiştir. Bu belirleme için baz istasyonu antenlerinin sayısı, tutarlılık blok uzunluğu ve kullanılan pilot yeniden kullanım faktörünün etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar girişim seviyelerinin hesabına göre modellenmesiyle oluşturulan gerçek hayattaki kablosuz iletişim yayılım ortamlarına göre MRC ve ZF gibi çeşitli işleme şemaları altında gerçekleştirilmiştir. Planlanması gereken kullanıcı sayısının işleme şemalarına göre değişiklik gösterdiği anlaşılmıştır. Dolayısıyla, elde edilen kullanıcı sayısının kullanıldığı çok hücreli sistemler için, spektrum verimliliğinin maksimize edildiği saptanmıştır.
- Geleneksel masif MIMO sistemlerinde dikkate alınan güç tahsisi yöntemi genellikle eşit güç pilot güç tahsisi (EPPA) metodudur. Fakat bu yöntem ile sistemin performansının en uygun bir şekilde elde edilemediği açık bir şekilde literatürde yer almaktadır. Bu sebepten ötürü güç tahsisi için kullanılan algoritmalarından birisi olan su doldurma (WF) algoritmasıdır. Böylece çeşitli performans iyileştirmelerine olanak sağlanmaktadır. Fakat gerek EPPA'daki performans yetersizliği gerekse WF'deki bazı süreksizlik noktalarının oluşabilmesinden kaynaklı durumlar ile karşılaşmamak için bu tez çalışması kapsamında yeni bir güç tahsisi algoritması önerilmiştir. Sistemin SINR değerlerinin kutuplaştırılmasına dayanan önerilen güç tahsisi algoritması (PS-PPA) diğer iki algoritma olan EPPA ve WF ile aynı benzetim ortamlarında karşılaştırılmıştır. Elde edilen çıktılar neticesinde önerdiğimiz PS-PPA algoritmasının diğer iki algoritmaya göre daha yüksek bir performansa sahip olduğu anlaşılmaktadır.

1.5. ORGANİZASYON

Tezin ilerleyen bölümleri şu şekilde planlanmıştır: Bölüm 2’de gelecek nesil kablosuz iletişim teknolojileri hakkında bilgilere yer verilmiştir. Geçmişten günümüze kadarki ilerlemelerden bahsedilmiştir. Son zamandaki güncel teknolojiler hakkındaki gelişmeler hakkında bilgiler verilmiştir.

Bölüm 3’te, masif MIMO sistemi hakkındaki ifadeler yer almaktadır. Tezin işleyişinde kullanılan bu sistemin tüm yönleri açıklanmaya çalışılmıştır.

Sinyal sezme ve ön kodlama tekniklerinden Bölüm 4’te bahsedilmiştir. Kablosuz haberleşme sistemlerindeki sinyallerin alıcı ve verici arasındaki işleyişindeki ifadeler bu bölümde yer almaktadır.

Bölüm 5’te masif MIMO’nun düşünüldüğü nesnelerin interneti sistemindeki spektrum verimliliğın elde edilmesi hakkında bir çalışmamız anlatılmıştır.

Tez konusunun amaçlarından biri olan gelecek nesil kablosuz sistemler için spektrum verimliliğın sağlanarak ideal kullanıcı sayısının belirlenmesi Bölüm 6’da yer almaktadır. Burada diğer bölümlerde temel olarak bahsedilen durumların bir sistem modeli çerçevesi oluşturularak masif MIMO yapısında spektrum verimliliğın maksimize edilmesini sağlayan ideal kullanıcı sayısı belirlenmiştir.

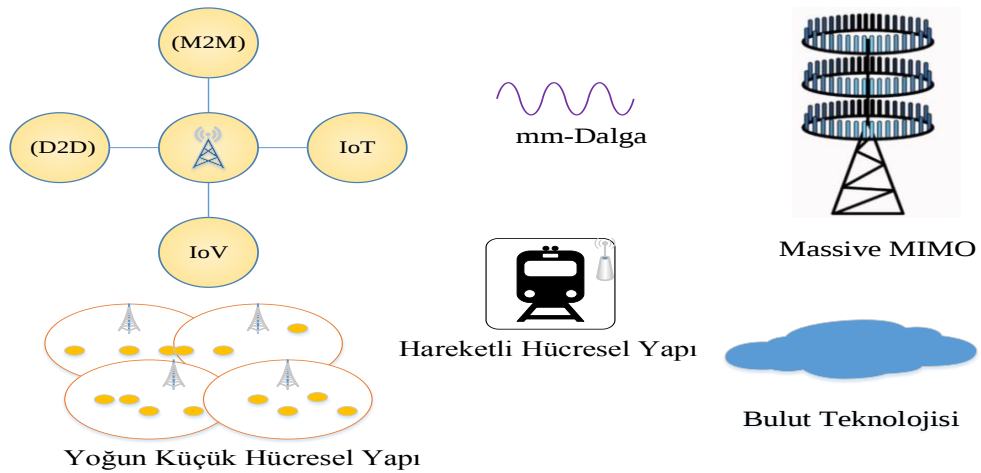
Bölüm 7’de ise tez konusunun diğer bir noktası olan güç tahsisi konusu ele alınmıştır. Burada literatürde üzerinde durulan temel güç tahsisi algoritmalarının spektrum ve enerji verimliliğına olan katkıları incelenmiştir. Ayrıca önerilen yeni bir güç tahsisi algoritmasının enerji verimliliğı açısından sonuçlarına yer verilmiştir.

Tez konusu çerçevesinde elde dilmiş olan bulgular ve tartışmaların genel bir değerlendirmesi ile sonuçlar ve gelecek çalışma konuları için öneriler Bölüm 8’de sunulmuştur.

2. GELECEK NESİL KABLOSUZ İLETİŞİM

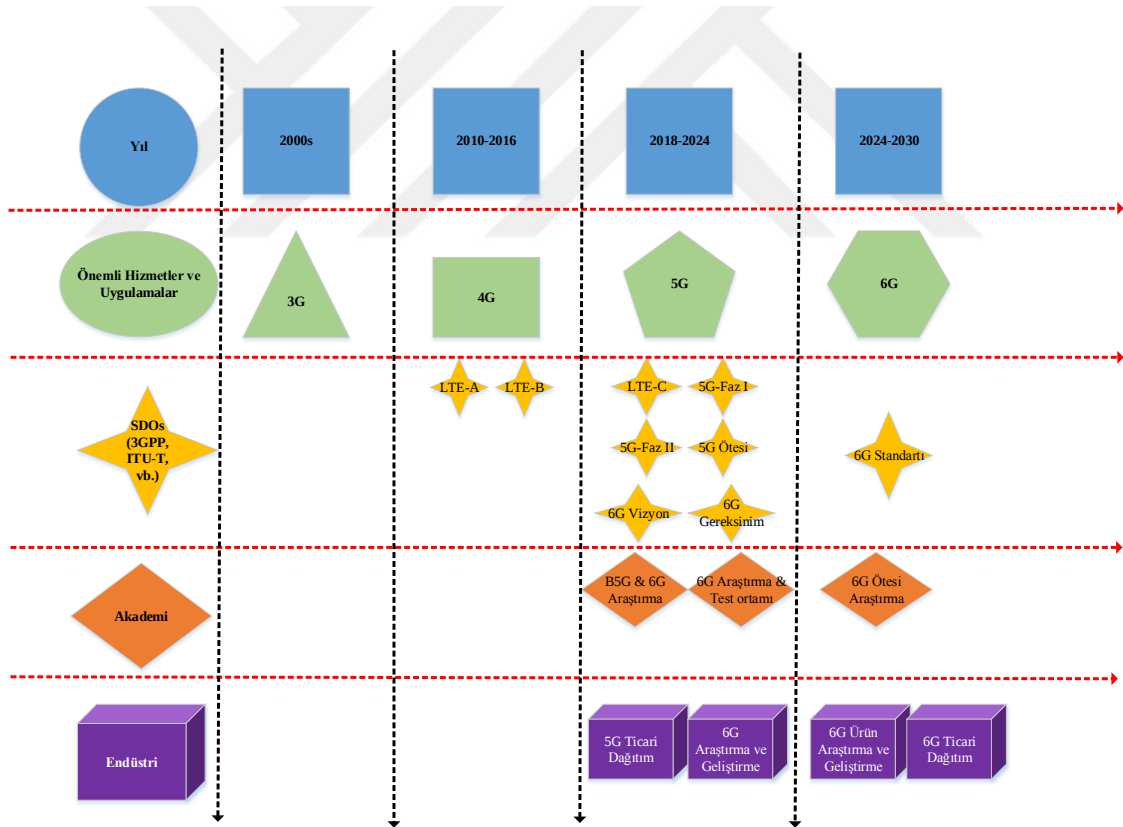
Son yıllarda gelişen teknolojilerle birlikte kullanıcı taleplerinin de sürekli artması neticesinde kablosuz iletişim sistemlerinde ciddi gelişmeler olduğu görülmektedir. Kablosuz haberleşme sistemleri, özellikle 1.Nesil (1G) ile sadece ses aktarımını gerçekleştirme amacıyla ortaya çıkmış ve günümüzde 5G teknolojisine kadar ilerlemiştir. Bu ilerlemenin bu günlerde konuşulduğu gibi 6. Nesil (6G) ve ötesi kablosuz iletişim teknolojileri olarak devam edeceği açıktır.

1G'den 6G'ye şeklinde sınıflandırılan ilerlemelerin en büyük etkeni artan taleplerdir. Şöyle ki, akıllı cihazlar olarak adlandırılan her bir teknoloji kullanıcı ihtiyaçlarının bir bölümüne veya bütününe katkı veren atılımlardır. Akıllı telefonlar, tabletler, giyilebilir cihazlar gibi teknolojiler ile birlikte veri talebi, video talebi, içerik talebi gibi istekler sürekli artmaya devam etmektedir. Bu isteklere karşılık vermek için ise günümüzde kullanımı yaygınlaşmaya başlayan 5G ile mümkün olmaktadır. 5G'nin kablosuz sistemlerdeki genel bir şeması Şekil 2.1'deki gibi gösterilmektedir [36]. Ama gün geçtikçe artan mobil trafik ve veri hızı beklentisi ile birlikte 6G ve ötesi teknolojiler için girişimlere başlanılmış durumdadır. Her ne kadar kablosuz iletişim teknolojisinin ilerlemesi ve buna bağlı olarak kullanıcıların ihtiyaçlarını göreceak akıllı cihazların yaygınlaşması gerçekleşmiş olsa da mevcut olan frekans spektrumunun artması maalesef mümkün olmamıştır. Her bir aşamada spektrum yoğunluğu hissedilmeye devam etmektedir.



Şekil 2.1. 5G kablosuz iletişim.

Şekil 2.2’de kablosuz iletişiminin ilerleyişinin gösterimi mevcuttur [37]. Buradan da anlaşılacağı üzere yeni nesil kablosuz iletişimde 5G ötesi ve 6G standartlarının oluşturulması devam etmektedir. Akıllı telefonların, cihazların artmasıyla birlikte kablosuz iletişimde önemli bir nokta olan multimedya kullanımı da hızlı bir şekilde artmaktadır. Bu durum IoT, cihazdan cihaza (D2D) iletişim, araçların interneti (IoV), makineden makineye (M2M) iletişim, sanal gerçeklik vb. gibi uygulamaların kullanımının artmasıyla beraber devasa bir veri kullanımını ve iletimini oluşturmaktadır. Bu muazzam veri iletimini karşılamak için planlanan 5G teknolojisi artık yerini 6G teknolojilerinin araştırmasına bırakmıştır. Çünkü yukarıda bahsedilen uygulamaların artmasıyla beraber benzer bir artış yerine üstel bir artış olan kablosuz iletişimdeki kullanıcı ve trafik kapasitesinin karşılanması çok önemli bir noktadır [36]. Dolayısıyla günümüzde kablosuz iletişim araştırmaları 5G ötesi ve 6G olarak devam etmektedir.



Şekil 2.2. Yeni nesil kablosuz iletişim ilerleyişi.

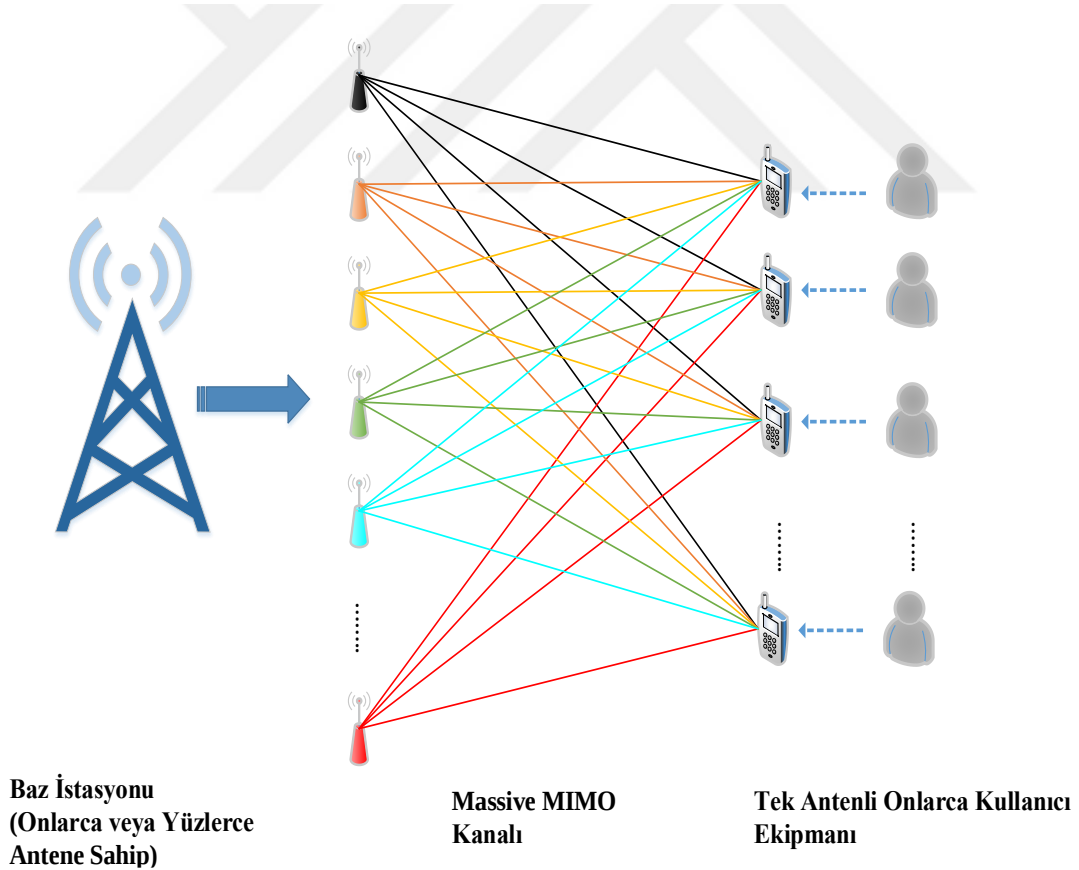
5G’nin ilk tartışılmaya başlandığı zamanlarda yapılan bir çalışmada bu teknolojinin ne olacağı, nasıl bir yol izleyeceği açıklanmıştır [38]. Bu çalışma ile birlikte masif MIMO

yapısı, milimetrik dalga şekli gibi noktalara da değinilmiştir. 5G çalışmaları için belirtilen standartlar [39]'da belirtildiği gibi 3GPP 5G Yeni Radyo (NR) standardıdır. 5G'nin çeşitli uygulamalar için hizmet verdiği durumlar üç temel nokta olarak belirlenebilmektedir. Bu hizmetler, gelişmiş mobil bant (eMBB), ultra güvenilir düşük gecikmeli iletişim (URLLC) ve büyük makine tipi iletişimdir (mMTC) [40]. Fakat bu zamana kadarki olan çalışmalardan da görüleceği üzere 5G de dâhil olmak üzere henüz artan kullanıcı taleplerine karşın etkin bir spektrum fazlalığı söz konusu değildir. Dolayısıyla bu konuda yapılan her katkı önem arz etmektedir.

5G hakkında hala çalışmalar devam etmesine rağmen 6G'nin ne olabileceğine, nasıl bir yol izlenmesi gerektiğine, nelerin beklenildiğine, ne gibi zorlukların olabileceği gibi konulara benzer bazı çalışmalar ve çeşitli 6G temelli bazı araştırmalar da başlamıştır [41]–[46]. Çalışmalar incelendiğinde 6G ve ötesi kablosuz iletişim teknolojisinin üzerinde durması beklenen konular arasında yeni spektrum kullanımı ve radyo tasarımları, akıllı ağa sahip yeni çok seviyeli ağ mimarisi, ağ kapsamının karasal etki alanı dışında genişletilmesi, hücresiz ağ iletişimi, uçtan uca bağlantı, kenar bilgi işlem yeteneği gibi konular bulunmaktadır. Bunlarla beraber 6G teknolojisine uyumlu çalışabilecek devre ve cihaz üretimlerinin de dikkate alınması gerektiği vurgulanmaktadır. Günümüzde popüler bir yaklaşım olan blok zinciri teknolojisinin ilerleyişinde etkili olabilecek bir performans 6G ile mümkün olabilecektir. Bu bakış açısı ile değerlendirildiğinde çok hızlı bir şekilde artan taleplerin karşılanması, insan odaklı hizmetlerin sürekli artıyor olması yeni yöntemlerin ve çeşitli iyileştirmelerin gerekliliğini ortaya koymaktadır. Tüm bu araştırmalar neticesinde spektrum verimliliği ve bu tür iyileştirmelerin getirdiği enerji kullanımı konusu hala üzerinde durulması gereken konular olarak göze çarpmaktadır.

3. MASİF ÇOK GİRİŞLİ ÇOK ÇIKIŞLI (MASSIVE MIMO) SİSTEM

Kablosuz cihazların ve mobil kullanıcıların sayısındaki yıllar bazındaki devasa değişimini gösteren çalışmadan [47] anlaşılacağı üzere kablosuz iletişimdeki trafiğin arttığı gözlemlenmektedir. Bu sürekli artan mobil trafikten dolayı ağ kapasitesi, veri hızı, spektrum verimliliği, iletişim güvenilirliği, enerji verimliliği gibi alanlarda iyileştirmelerin gerçekleştirilmesi beklenmektedir. Bu sebeple 5G hatta 6G ve ötesi ağ mimarileri önerilmektedir. Önerilen bu mimarilerin teoride ve pratikte gerçekleştirilebilmesinde en etkili anahtar teknoloji olarak masif çok girişli çok çıkışlı (Massive MIMO) sistemi görülmektedir [48]. Şekil 3.1’de mimarisi verilen masif MIMO, baz istasyonunun yüzlerce sayıdaki anten ile donatılarak genellikle tek antenli onlarca sayıdaki kullanıcıya hizmet sağlanmasının gerçekleştirildiği bir sistemdir.



Şekil 3.1. Masif MIMO sistemi.

Masif MIMO'nun büyük bir öneme sahip olmasında en büyük etken BS'deki anten sayısının çok fazla olmasıdır. Fazla anten sayesinde daha dar alanlara odaklanma durumu ortaya çıktığından dolayı parazitliğin azaltılmasında etkili olmaktadır. Ayrıca bu antenler aracılığıyla mobil iletişimde büyük bir öneme sahip olan veri hızının artırılması gerçekleştirilmektedir. Bu şekilde oluşan uzamsal çeşitlilik ile birlikte veri iletiminin güvenilirliği de artırılmaktadır [49]. Masif MIMO ile birlikte kapasite kazancının geliştirilmesine ek olarak spektrum verimliliğinin artırılması da sağlanmaktadır [50]. Gelecek nesil kablosuz iletişim teknolojilerinin yoğunlaşması gereken en önemli konu spektrum verimliliğidir. Spektrum kullanımının sınırlı olmasından kaynaklanan bu durumun iyileştirilmesinde masif MIMO'nun yeri çok büyüktür. Nitekim masif MIMO yukarı bağlantı durumunda birleştirme, aşağı bağlantı durumunda ise ön kodlama teknikleri sayesinde geleneksel yöntemlere kıyasla sinyal zayıflamasını ve oluşan parazitliği giderebilme yeteneği sayesinde spektrum verimliliğinde ciddi bir başarımlı artışı kazandırmaktadır. Ayrıca çeşitli ticari şirketlerdeki sistemlerde masif MIMO'nun kullanılmaya başlanmış olması sonraki nesil teknolojiler için kabul edilmiş bir sistem olduğunu ortaya koymaktadır [51].

Masif MIMO'nun 5G ve ötesi kablosuz iletişim teknolojilerinde yer edinmesinin en önemli noktalarından biri de yüksek frekans bantlarında çalışmaya imkân tanınmasıdır [52]. Böylece milimetre dalga frekanslarındaki iletişim sistemlerinin gelişimi de hızlanacaktır. Masif MIMO'nun sağladığı bazı potansiyel avantajlar Çizelge 3.1'de gösterilmektedir. Burada belirtilen noktalar temel faydalar olmak üzere bunlarla sınırlı değildir.

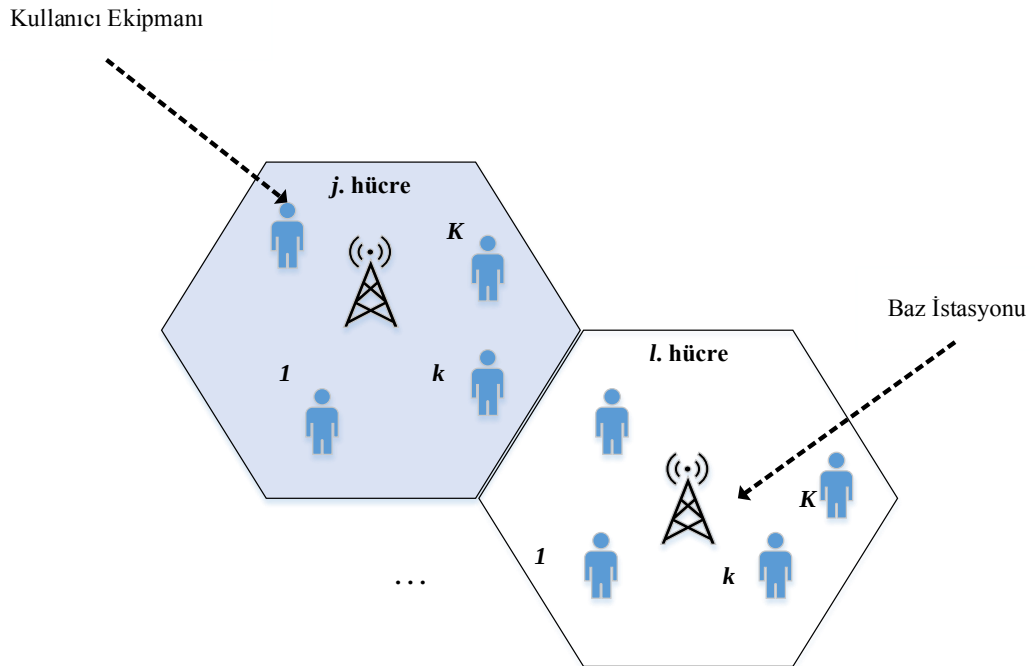
Çizelge 3.1. Masif MIMO avantajları.

Fayda	Kaynak
Spektrum Verimliliği	[2], [53], [54]
Enerji Verimliliği	[55]–[57]
Maliyet Verimliliği	[53]
Güvenlik ve Sağlamlık	[53], [58], [59]
Kapasite ve Bağlantı	[60], [61]

Masif MIMO'nun sağladığı çeşitli faydalardan bazıları yukarıda bahsedilmesine rağmen, sistemin genel olarak bazı zorlukları içeren durumları da mevcuttur. Bu zorluklardan en temel olanı kanal kestirim aşamasıdır. Masif MIMO'nun pratikte fayda sağlayabilmesi için kanal durum bilgisinin doğru bir şekilde elde edilmesi gerekmektedir. Hücrelerdeki kullanıcıların da etkisiyle birlikte pilot kirliliği gibi durumlar bu bilgiyi elde etmeyi zorlaştıran etmenler arasındadır [48]. Diğer bir zorluk CSI'nın kullanıldığı sinyal işleme şemasıdır. Bu şema ile birlikte sistemin performansının artırılması gerçekleştirilmektedir. Masif MIMO'daki her bir anten dizini için radyo frekansının (RF) gerekliliği maliyeti artırmaktadır [62]. Bu ve sinyal işleme adımlarının daha sağlıklı olabilmesi için çeşitli teknikler üzerinde durulmaktadır. Başka bir dikkat edilmesi gereken nokta sinyal sezme işlemidir. Masif MIMO'nun devasa anten dizilimleri sinyal sezme algoritmalarının karmaşıklığına neden olmaktadır. Dolayısıyla sistemin genel olarak performansı ile karmaşıklığı arasındaki dengenin sağlanması gerekmektedir.

3.1. MASİF MIMO SİSTEM MODELİ

Bu kısımda, L hücreye ve baz istasyonunda M anten sayısına sahip tek antenli K kullanıcılarına hizmet veren çok hücreli masif MIMO modeli Şekil 3.2'de gösterilmiştir. Sistem mimarisi tipik bir hücresel iletişim sistemidir.



Şekil 3.2. Çok hücreli masif MIMO modeli.

Böyle bir sistemde j . hücredeki k . kullanıcıdan i . hücredeki BS'ye kanal vektörü $\mathbf{h}_{ijk} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ [63]'teki gibi şöyle gösterilmektedir

$$\mathbf{h}_{ijk} = \mathbf{g}_{ijk} \sqrt{\beta_{ijk}}, \quad (3.1)$$

burada $\mathbf{g}_{ijk}$ ile küçük sönümlene katsayılar vektörü, β_{ijk} ile büyük ölçekli sönümlene katsayısı gösterilmektedir. Küçük ölçekli sönümlene vektörünün elemanları sıfır ortalamalı, birim varyanslı ve karmaşık Gaussian dağılımlıdır. Bu kanal özellikleri ile birlikte yukarı bağlantı ve aşağı bağlantı analizleri aşağıdaki gibi yapılmaktadır.

3.1.1. Yukarı Bağlantı

Masif MIMO sisteminde i . hücredeki BS'de alınan yukarı bağlantı pilot sinyali [4]'e benzer şekilde aşağıdaki gibi modellenmektedir:

$$\mathbf{Y}_i = \sum_{j=1}^L \sum_{k=1}^K \sqrt{\rho_{jk}} \mathbf{h}_{ijk} \mathbf{p}_k^H + \mathbf{N}_i, \quad (3.2)$$

burada ρ_{jk} j . hücredeki k . kullanıcının pilot gücünü temsil etmektedir. Ek gürültü vektörü $\mathbf{N}_i \in \mathbb{C}^M$ ise σ^2 gürültü varyansını göstermek üzere $\mathbf{N}_i \sim \mathcal{CN}(\mathbf{0}, \sigma^2 \mathbf{I}_M)$ olarak ifade edilmektedir.

3.1.2. Aşağı Bağlantı

Sistem modelinde j hücresindeki k kullanıcılarında alınan aşağı bağlantı sinyali $z_{jk} \in \mathbb{C}$ şu şekilde modellenir:

$$z_{jk} = \sum_{i=1}^L \sum_{k=1}^K \mathbf{h}_{ijk}^T \mathbf{w}_{jk} s_{jk} + \mathbf{N}_i, \quad (3.3)$$

burada j . hücredeki k . kullanıcı için ön kodlama vektörü $\mathbf{w}_{jk} \in \mathbb{C}^M$, karşılık gelen sembol ise s_{jk} olarak gösterilmektedir.

MIMO sistemi için TDD modunun FDD moduna göre daha uygun olduğu belirtilmiştir [2], [64]. Çünkü baz istasyonlarının sahip olduğu anten sayısının sonsuza kadar arttığı düşünüldüğü bir sistemde her bir kullanıcı için kanal tahminlerinin de artması beklenmektedir. Böylece kanal cevaplarının baz istasyonuna geri besleme sonucu iletimi için daha fazla yukarı bağlantı zaman dilimlerine ihtiyaç olmaktadır [65]. Bu duruma en iyi çözüm olarak da TDD modu düşünülmüştür. Birçok masif MIMO çalışmasında bu

durum dikkate alınmıştır. Masif MIMO sisteminin TDD modunda çalışmasıyla birlikte yukarı bağlantı ve aşağı bağlantı kanalları karşılıklı hale gelmektedir [63]. Dolayısıyla yukarı bağlantı ile ilgili hesaplamaların yapılması sistemin işleyişi açısından yeterli olacaktır. Bu neden dolayı aşağıdaki ifadeler yukarı bağlantı düşünülerek gerçekleştirilmiştir.

3.1.3. Yukarı Bağlantı Pilot İletim Fazı

Baz istasyonları yukarı bağlantı pilot sinyallerini kullanarak CSI tahmin etmektedirler [63]. Sistemin tutarlılık zaman aralığını τ_c , ortogonal pilot dizilerinin uzunluğunu τ_p ve veri iletimi için ise $\tau_c - \tau_p$ olduğu varsayılmaktadır. Yukarı bağlantı sembolleri için l . baz istasyonunda alınan $\mathbf{y}_l \in \mathbb{C}^M$ aşağıdaki gibi yazılabilir

$$\mathbf{y}_l = \sum_{i=1}^L \sum_{k=1}^K \sqrt{\rho_{ik}} \mathbf{h}_{ik}^l x_{ik} + \mathbf{n}_l, \quad (3.4)$$

burada x_{ik} , $\mathbb{E}\{|x_{ik}|^2\} = 1$ olmak üzere normalleştirilmiş iletim sembolüdür. ρ_{ik} i . hücredeki k . kullanıcının iletim gücüdür. $\mathbf{n}_l \in \mathbb{C}^M$ ise eklemeli beyaz Gauss gürültüsü (AWGN) olup $\mathbf{n}_l \sim \mathcal{CN}(\mathbf{0}, \sigma^2 \mathbf{I}_M)$ şeklinde ifade edilmektedir [54].

Çok hücreli çok kullanıcı MIMO sistem modelini matris formunda yazmak için $\mathbf{H}_i^l = [\mathbf{h}_{i1}^l \dots \mathbf{h}_{iK}^l] \in \mathbb{C}^{M \times K}$, $\mathbf{P}_i = \text{diag}(\rho_{i1} \dots \rho_{iK}) \in \mathbb{C}^{K \times K}$ ve $\mathbf{x}_i = [x_{i1} \dots x_{iK}]^T \in \mathbb{C}^K$ matris gösterimleri kullanılmaktadır [64]:

$$\mathbf{y}_l = \sum_{i=1}^L \mathbf{H}_i^l \sqrt{\mathbf{P}_i} \mathbf{x}_i + \mathbf{n}_l. \quad (3.5)$$

Pilot iletimi sırasında alınan yukarı bağlantı sinyali $\mathbf{Y}_l \in \mathbb{C}^{M \times \tau_p}$ aşağıdaki gibi ifade edilmektedir [63]

$$\mathbf{Y}_l = \sum_{i=1}^L \sum_{k=1}^K \mathbf{H}_i^l \sqrt{\mathbf{P}_i} \boldsymbol{\psi}_i^H + \mathbf{N}_l, \quad (3.6)$$

burada i . hücredeki K kullanıcıları tarafından kullanılan pilot matrisi $\boldsymbol{\psi}_i$ şeklinde gösterilmekte olup aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

$$\boldsymbol{\psi}_i = [\psi_{i1} \dots \psi_{iK}] \in \mathbb{C}^{\tau_p \times K}, \quad (3.7)$$

$$\boldsymbol{\psi}_i^H \boldsymbol{\psi}_i = \tau_p, \boldsymbol{\psi}_i^H \boldsymbol{\psi}_j = 0, \forall i \neq j. \quad (3.8)$$

Kullanıcılardan pilot sinyali alındıktan sonra kanal tahmini işlemi gerçekleştirilmektedir. Masif MIMO sistemleri için kullanılabilecek kanal tahmini şemalarına [66]'dan ulaşılabilmektedir. Genel olarak masif MIMO ile alakalı yapılan çalışmalar neticesinde elde edilen bulgulardan kanal tahmini için minimum ortalama kare hatası (MMSE) tekniğinin yaygın bir şekilde kullanıldığı ve düşük karmaşıklıkta optimuma yakın performans sağladığı anlaşılmaktadır [64]. MMSE kullanılarak BS l 'nin kanal katsayılarını Denklem (3.6)'daki sinyalden ayrı ayrı elde ettiği düşünülürse j . hücredeki k . kullanıcı için kanal tahmin işlemleri [67]'deki işlemlere benzer şekilde aşağıdaki gibi gerçekleştirilebilmektedir:

Pilot dizisinin $\psi_{jk} \in \mathbb{C}^{\tau_p}$ olarak belirtildiği buna bağlı olarak da pilot matrisinin $\Psi_i = [\psi_{i1} \dots \psi_{iK}]$ olduğu bir ortamda pilot dizisi ile bağıntılı Y_i aşağıdaki gibi elde edilmektedir [63].

$$\begin{aligned} Y_i \psi_{jk} &= \sum_{l=1}^L \mathbf{H}_i^l \sqrt{\mathbf{P}_i} \Psi_i^H \psi_{jk} + \mathbf{N}_i \psi_{jk} \\ &= \sum_{i \in \mathcal{P}_j} \sqrt{\rho_{ik} \tau_p} \mathbf{h}_{ik}^l + \tilde{\mathbf{n}}_{ljk} \end{aligned} \quad (3.9)$$

Burada $\tilde{\mathbf{n}}_{ljk} = \mathbf{N}_i \psi_{jk} = [\tilde{n}_{ljk1} \dots \tilde{n}_{ljkM}]^T \sim \text{CN}(\mathbf{0}, \tau_p \sigma^2 \mathbf{I}_M)$ olup Denklem (3.9)'daki ikinci eşitlik pilotların ortogonalliğinin varsayımı ile ortaya çıkmaktadır. Bu denklem temel alınarak MMSE ile $\mathbf{h}_{jk}^l$ 'nin tüm elemanlarının tahmin edilmesi gerçekleştirilmektedir. $y_{ljk m} \in \mathbb{C}$ denklemdeki vektörün m . satırını gösterdiği durum olmak üzere aşağıdaki gibi ifade edilmektedir

$$y_{ljk m} = \sum_{i \in \mathcal{P}_j} \sqrt{\rho_{ik} \tau_p} h_{ikm}^l + \tilde{n}_{ljk m}. \quad (3.10)$$

MMSE ile birlikte h_{ikm}^l 'nin tahmini şu şekilde verilmektedir [67]

$$\hat{h}_{jkm} = \mathbb{E}\{h_{jkm}^l\} + \frac{\text{Cov}\{h_{jkm}^l, y_{ljk m}\}}{\mathbb{V}\{y_{ljk m}\}} (y_{ljk m} - \mathbb{E}\{y_{ljk m}\}) \quad (3.11)$$

burada $\mathbb{E}\{h_{ikm}^l\} = \bar{h}_{jkm}^l$ olarak tanımlanmakta olup $\text{Cov}\{.,.\}$ ifadesi kovaryansı temsil etmektedir.

$$\mathbb{E}\{y_{ljk m}\} = \sum_{i \in \mathcal{P}_j} \sqrt{\rho_{ik} \tau_p} \bar{h}_{ikm}^l, \quad (3.12)$$

$$\text{Cov}\{h_{jkm}^l, y_{ljk}\} = \sqrt{\rho_{jk}} \tau_p \beta_{jk}^l, \quad (3.13)$$

$$\mathbb{V}\{y_{ljk}\} = \sum_{i \in \mathcal{P}_j} \rho_{ik} (\tau_p)^2 \beta_{ik}^l + \tau_p \sigma^2. \quad (3.14)$$

Denklem (3.12), Denklem (3.13) ve Denklem (3.14)'teki ifadeler Denklem (3.11)'de yerine yazılarak kanal tahmini aşağıdaki gibi elde edilebilmektedir

$$\hat{h}_{jk}^l = \bar{h}_{jk}^l + \frac{\sqrt{\rho_{jk}} \beta_{jk}^l}{\sum_{i \in \mathcal{P}_j} \rho_{ik} (\tau_p)^2 \beta_{ik}^l + \tau_p \sigma^2} \left(\mathbf{Y}_i \psi_{jk} - \sum_{i \in \mathcal{P}_j} \sqrt{\rho_{ik}} \tau_p \bar{\mathbf{h}}_{ik}^l \right). \quad (3.15)$$

3.1.4. Yukarı Bağlantı Veri İletim Fazı

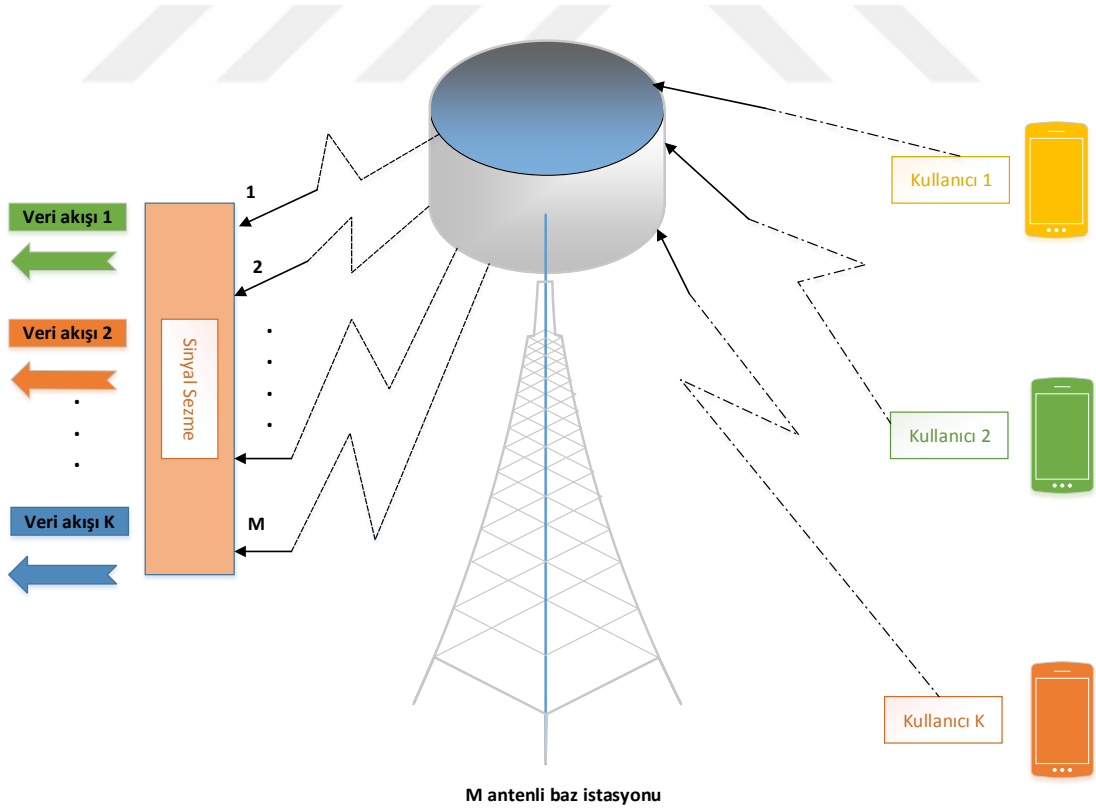
Kanal tahmininden sonra, hücre l 'deki BS'nin yalnızca Denklem (3.4)'teki kendi alınan sinyal $\mathbf{y}_l$ kullandığı bununla birlikte sadece o hücredeki K kullanıcılarının gönderdiği sinyalleri sezmeyi hedeflediği yukarı bağlantı veri iletim fazı gerçekleşmektedir. Dolayısıyla, diğer hücrelerde bulunan kullanıcılar tarafından gönderilen sinyaller, hücreler arası girişimdir. Böylece sistemde ek gürültü olarak değerlendirilir. Denklem (3.4)'te elde edilen sinyal, l hücresindeki BS'de $\mathbf{v}_{lk} \in \mathbb{C}^M$ bir lineer sezme vektörü ile aşağıdaki gibi çarpılmaktadır. Böylece k . kullanıcının göndermiş olduğu sinyal parazitten [67]'deki gibi şu şekilde ayrılmaktadır:

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_{lk}^H \mathbf{y}_l &= \sum_{i=1}^L \sum_{t=1}^K \mathbf{v}_{lk}^H \mathbf{h}_{it}^l \sqrt{\rho_{it}} x_{it} + \mathbf{v}_{lk}^H \mathbf{n}_l \\ &= \mathbf{v}_{lk}^H \mathbf{h}_{lk}^l \sqrt{\rho_{lk}} x_{lk} + \sum_{\substack{t=1 \\ t \neq k}}^K \mathbf{v}_{lk}^H \mathbf{h}_{lt}^l \sqrt{\rho_{lt}} x_{lt} + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq l}}^L \sum_{t=1}^K \mathbf{v}_{lk}^H \mathbf{h}_{it}^l \sqrt{\rho_{it}} x_{it} + \mathbf{v}_{lk}^H \mathbf{n}_l \end{aligned} \quad (3.16)$$

Burada x_{it} , i hücresindeki t kullanıcılarından iletilen veri sembolüdür. Denklem (3.16)'da görüldüğü üzere alınan sinyal sırasıyla istenilen sinyal, hücre içi girişim, hücreler arası girişim ve artık gürültüden oluşmaktadır. Lineer sezme vektörü $\mathbf{v}_{lk}$ kullanımı görüldüğü üzere istenilen sinyali artırmak, girişimi ve/veya gürültüyü bastırmak için düşünülebilir. Sinyal sezme ve ön kodlama ile alakalı ifadeler bir sonraki bölümde detaylıca açıklanmıştır.

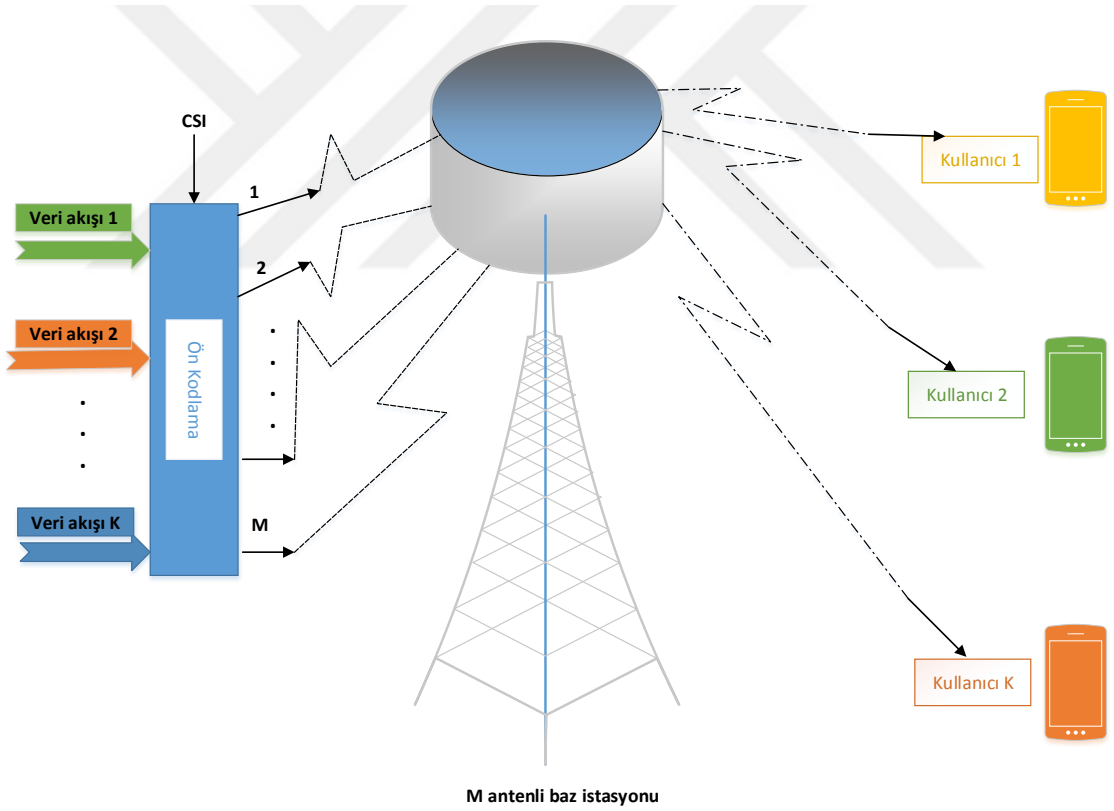
4. DOĞRUSAL SİNYAL SEZME VE ÖN KODLAMA TEKNİKLERİ

Masif MIMO sistemlerinde, çok sayıda anten nedeniyle, yukarı bağlantı sinyal tespiti hesaplama açısından karmaşık hale gelir ve elde edilebilecek verimi azaltır. Şekil 4.1 baz istasyonunda N kullanıcı terminali ve M anteni olan masif MIMO yukarı bağlantı sistemini göstermektedir [68]. N kullanıcı terminali tarafından iletilen tüm sinyaller farklı bir kablosuz yol boyunca ilerler ve baz istasyonunda üst üste bindirilir, bu da baz istasyonunda sinyal tespitini karmaşık ve verimsiz hale getirir. Daha düşük hesaplama karmaşıklığı ile daha iyi çıktı performansı sağlayabilen masif MIMO sistemleri için en uygun sinyal sezme yöntemini bulmak adına kapsamlı araştırmalar yapılmıştır. Küre Kod Çözücü (SD) [69] ve Ardışık Girişim İptali (SIC) [70] gibi geleneksel doğrusal olmayan sezme yöntemleri iyi performans sağlamaktadır. Yine de, daha fazla sayıda antenle hesaplama karmaşıklığı artar ve bu da onları masif MIMO sistemler için imkânsız hale getirir.



Şekil 4.1. Yukarı bağlantı masif MIMO sistemi.

Ön kodlama, vericideki kanal durum bilgisini kullanan aşağı bağlantılarda önemli bir sinyal işleme adımıdır. Ön kodlama aşamasının masif MIMO sistemlerinde önemli bir rol oynamasının nedeni, yol kaybı ve girişimin oluşturduğu etkiyi azaltabilmesi ve verimi en üst düzeye çıkarabilmesidir [68]. CSI'nın doğru bir şekilde tahmin edilmesine ve kullanılan ön kodlama tekniğine göre aşağı bağlantı masif MIMO'nun performansı değişebilmektedir. Ön kodlama tekniği, masif MIMO sistemlerine muazzam faydalar sağlamasına rağmen, ekstra hesaplamalar ekleyerek tüm sistemin hesaplama karmaşıklığını da artırmaktadır. Çünkü anten sayısı arttıkça hesaplama karmaşıklığı da artmaktadır. Bu nedenle, düşük karmaşık ve verimli ön kodlayıcılar, masif MIMO sistemleri için daha pratiktir. Bu sebeplerden dolayı doğrusal ön kodlama teknikleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Şekil 4.2, M-antenli baz istasyonu ve N-kullanıcılı masif MIMO sistemlerinde aşağı bağlantı mimarisini ve gerçekleştirilen ön kodlamayı göstermektedir.



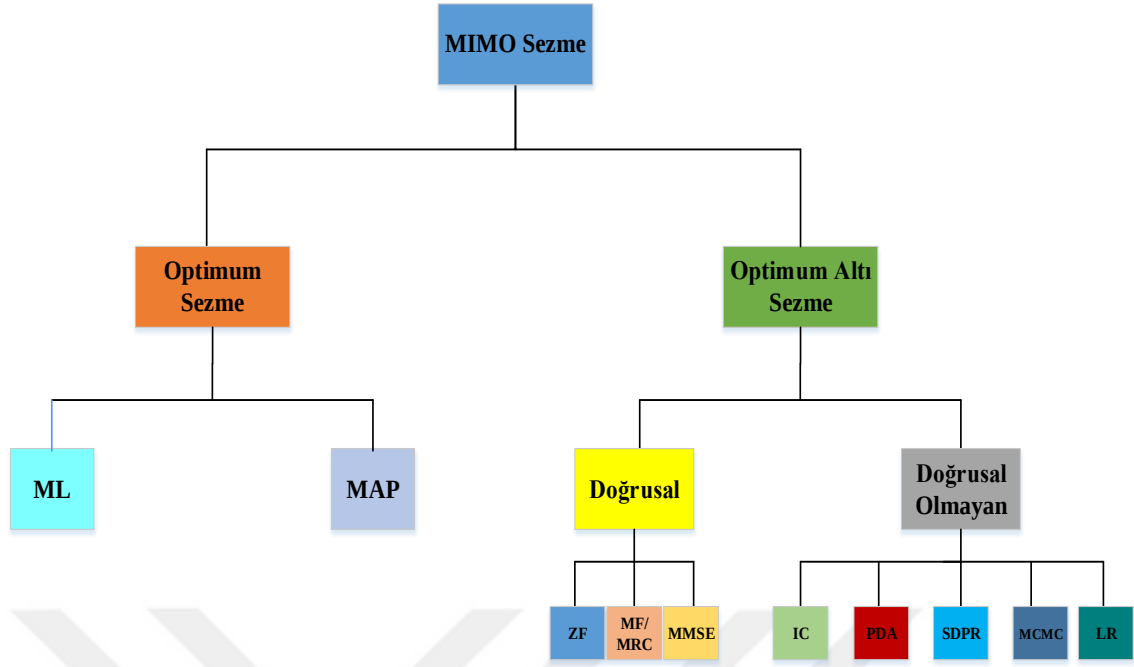
Şekil 4.2. Aşağı bağlantı masif MIMO sistemi.

4.1. DOĞRUSAL SİNYAL SEZME

Yukarı bağlantıda sinyal sezme gerçekleştirmek için BS’de doğru ve anlık CSI gereklidir. Mekânsal olarak ilişkili kanallarda spektrum verimliliği artırmak için daha gelişmiş sezme yöntemlerine ihtiyaç vardır. Masif MIMO sezme algoritmasının karmaşıklığı, sistemlerin boyutundan (her iki taraftaki anten sayısı, vericiler ve alıcı terminaller), matris-matris çarpımı ve matrisin tersine çevrilmesinden etkilenmektedir. Ancak, performans ve karmaşıklık arasında bir denge göz önünde bulundurulmalıdır [71].

Masif MIMO sistemlerde maksimum olabilirlik (ML), sıfıra zorlama (ZF) ve MMSE gibi yukarı bağlantı sinyal tespiti için birkaç doğrusal sezme yöntemi düşünülmüştür [4], [72]. ML, masif MIMO’da optimal bir detektördür ve hata olasılığını en aza indirmektedir, ancak büyük anten sistemleri için algoritmanın engelleyici karmaşıklığı vardır [73], [74]. ZF yöntemi antenler arası paraziti azaltır, ancak kötü koşullandırılmış kanal matrisleri için ek gürültü artmaktadır [75]. MMSE tekniği, sezme sırasında gürültü gücünü de dikkate aldığından ZF sezme tekniğinden daha iyi performansa sahiptir [76]. ML, MMSE ve ZF sezme algoritmaları optimum verim performansı sağlasa da, işleme sırasında matris ters çevirme içerirler, bu da onları çok fazla antenli masif MIMO sistemleri için hesaplama açısından verimsiz kılmaktadır. Ardışık girişim iptali (SIC) yöntemi ile birleştirilen ZF ve MMSE algoritmalarının, önceden tespit edilen sembollerden gelen müdahaleyi etkisiz hale getirdiği düşünülmüştür [77]. Masif MIMO sistemlerinin düşük karmaşıklıkta sinyal tespiti için, birkaç yinelemeli yöntem tasarlanmıştır [78], [79]. Neumann serisi yaklaşımı (NSA) yöntemi [80], Richardson yöntemi [81] ve Jacobi yinelemeli yöntem [82] dikkate alınmıştır, ancak hesaplama karmaşıklığı geleneksel doğrusal yöntemler ile karşılaştırıldığında biraz azaldığı gözlemlenmiştir. Gauss Siedel (GS) [83], eşlenik gradyan (CG) [79], en küçük kare regresyon seçimi [84], çarpanların alternatif yön yöntemi (ADMM) [85] gibi diğer doğrusal yöntemler aynı zamanda masif MIMO için düşünülmüştür, ancak bunlar yukarı bağlantı sinyal tespiti için optimal bulunmamıştır.

Sinyal sezme ile alakalı çalışmalar son zamanlarda da devam etmesine ve yeni metotlar önerilmesine rağmen geleneksel yöntemler hala geçerliliğini korumaktadır. Genel olarak kullanılan MIMO sezme tekniklerinin detaylı gösterimi Şekil 4.3’teki gibi gösterilmiştir [86].



Şekil 4.3. MIMO sezme teknikleri.

Masif MIMO sistemlerinde sinyal sezmede amaç alınan sinyal vektörü $\mathbf{y}$ ve $\mathbf{H}$ ile en iyi sinyal vektörü $\mathbf{x}$ bulmaktır. Doğrusal sinyal sezme yöntemleri, masif MIMO’da yaygın olarak kullanılmaktadır, çünkü genel olarak düşük karmaşıklığa sahiptirler ve eklemelerden ve çoğaltmalardan oluştuğu için donanım verimli bir şekilde uyarlanabilirler. Aşağıda geleneksel olarak kullanılan sinyal sezme yöntemlerinden bahsedilmektedir.

4.1.1. Maksimum Olabilirlik (ML) Sezme

Masif MIMO sistemlerinde, her kullanıcı tarafından iletilen sinyali alınan sinyalden ayırmak için baz istasyonunda sezme gereklidir. Bu sezme yöntemlerinden biri ML yöntemidir. Maksimum olabilirlik MIMO tespit problemini çözmek için optimal bir algoritmadır. Kapsamlı bir arama yapmaktadır ve aşağıdaki şekilde gösterildiği gibi tüm olası sinyalleri incelemektedir [48].

$$\hat{\mathbf{x}}_{ML} = \arg \min \|\mathbf{y} - \mathbf{H}\mathbf{x}\|^2 \quad (4.1)$$

Burada $\hat{\mathbf{x}}$ tahmini alınan sinyal olup ML sezme yöntemi bir dizi antenle katlanarak artan yüksek bir karmaşıklığa sahiptir. Optimum sezme metodu olmasına rağmen, ML oldukça karmaşıktır. İletim antenlerinin sayısı K ve kullanılan modülasyon sayısı ile katlanarak

artan bir karmaşıklık maliyetine sahiptir, bu da masif MIMO sistemlerinde olduğu gibi yüzlerce antenli sistemlerde uygulanmasını çok karmaşık hale getirmektedir. Bu nedenle, ML sezme pratik olmadığından, karmaşıklığı azaltılmış optimal altı alternatiflere başvurulması gerekmektedir [87].

4.1.2. Maksimum Oran Birleştirme (MRC) Sezme

Maksimum oran birleştirme veya aynı zamanda uyumlu süzgeç (MF) olarak da bilinen, en düşük karmaşıklığa sahip sinyal sezme yöntemlerinden biridir [48]. MRC, sinyalin orijinal şeklini geri yüklemek için kullanılmaktadır. MRC’de alınan tüm sinyaller birleştirilmektedir, yani birbirine eklenmektedir. Sinyali aldıktan sonra, alınan her sinyal bir ağırlık faktörü ile çarpılır. Sinyalin etkinliği, ağırlık faktörü ile doğru orantılıdır. Her antenden alınan her sinyal, kanalın gücüne ve fazına göre ağırlıklandırılmaktadır. Zayıf genlik sinyalinin zayıflatılmasını ve güçlü sinyalin daha da güçlendirilmesini sağlar. Mevcut tüm anten sinyalleri, sinyal ve gürültü terimleri arasında maksimum oran sağlamak için birleştirilir. Bu, bir alıcının yalnızca gerekli sinyallerin genliğini veya gücünü artırabilmesini sağlamaktadır.

BS’deki alınan sinyal vektörü, ρ ortalama iletim gücü, $\mathbf{n}$ karmaşık Gauss dağılımına sahip sıfır ortalamalı gürültü vektörü olmak üzere aşağıdaki gibi yazılmaktadır

$$\mathbf{y} = \sqrt{\rho}\mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n} = \sqrt{\rho} \sum_{k=1}^K \mathbf{h}_k x_k + \mathbf{n} \quad (4.2)$$

MRC’de doğrusal sezme matrisi $\mathbf{A}$, $\mathbf{A}_{\text{MRC}} = \mathbf{H}$ kullanılarak seçilmektedir. Böylece MRC diğer alt akışlardan gelen paraziti tamamen gürültü olarak ele alır. MRC sezme yöntemi için BS, K kullanıcılarının her birinin alınan SNR’sini maksimize etmeyi amaçlamaktadır, ancak çok kullanıcı girişimin etkisini göz ardı etmektedir. Daha spesifik olarak, alınan sinyal aşağıdaki gibi kanal vektörünün eşlenik-transpozu ile çarpılmaktadır [87].

$$r_k = \mathbf{h}_k^H \mathbf{y} = \sqrt{\rho} \|\mathbf{h}_k\|^2 x_k + \sqrt{\rho} \sum_{i=0, i \neq k}^K \mathbf{h}_k^H \mathbf{h}_i x_i + \mathbf{h}_k^H \mathbf{n}. \quad (4.3)$$

MRC sezmenin bir avantajı, sinyal işleminin çok basit olmasıdır, çünkü BS, alınan vektörü kanal matrisinin $\mathbf{H}$ eşlenik- transpozu ile çarpmaktadır. Diğer yandan, bir dezavantajı, çok kullanıcı müdahalenin etkisini bir kez göz ardı ettiğinde, girişimle

sınırlı senaryolarda kötü performans göstermektedir.

4.1.3. Sıfıra Zorlama (ZF) Sezme

Sıfıra-zorlama sezme, gürültü iyileştirmeden bağımsız olarak kullanıcılar arası paraziti tamamen ortadan kaldırmak amacıyla kullanılan bir doğrusal sezme yöntemidir, yani kullanıcılar arası girişimi hesaba katar, ancak gürültünün etkisini ihmal eder. Bu, matris ters çevirme kullanan ve paraziti ortadan kaldıran basit bir doğrusal sezme tekniğidir. Bazen, kanal spektrumunun en yüksek zayıflamaya sahip olduğu frekanslarda gürültü artar. Bu nedenle ZF, gürültü artışından etkilenmektedir. Bu sezme yöntemi, zayıf bit hata oranı performansına da sahiptir. Girişim, alınan sinyalin kanal matrisinin sözde tersi ile çarpılmasıyla bastırılır. Yani, ZF, girişimi sıfıra zorlayan doğrusal bir sezme şemasıdır.

ZF, MF sezme yönteminden daha iyi performans gösterir ve alınan sinyal-parazit oranını (SINR) maksimize etmeyi amaçlar. ZF mekanizması, $\mathbf{H}$ kanal matrisinin tersine çevrilmesine ve böylece kanalın etkisinin kaldırılmasına dayanır. ZF sezme yönteminin eşitleme matrisi aşağıdaki denklem ile verilmektedir [88].

$$\mathbf{A}_{ZF}^H = (\mathbf{H}^H \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^H = \mathbf{H}^\dagger \quad (4.4)$$

Burada $\mathbf{H}^\dagger$, bir matrisin Moore-Penrose sözde tersidir. Söz ters kullanılmasının sebebi $\mathbf{H}$ her zaman bir kare matris değildir, yani kullanıcı sayısı BS'deki antenlerin sayısına eşit değildir [48].

Bir ZF lineer detektörü, parazit artışından bağımsız olarak paraziti tamamen ortadan kaldırmak için $\mathbf{A}$ matrisini seçer. Spesifik olarak, bir ZF lineer detektör $\mathbf{A}\mathbf{H} = \mathbf{I}$ olacak şekilde $\mathbf{A}$ 'yı seçer. ZF doğrusal sezmenin bir dezavantajı, parazit kuvvetine bakılmaksızın paraziti sıfıra zorlama ısrarıdır.

Denklem (4.5)'teki gibi oluşturulmuş olan bir sistem modelinde, gürültü vektörünün sıfır olduğunu varsayarsak, Denklem (4.5) bir doğrusal denklemler sistemi haline gelir ve MIMO sezme problemi " N_r doğrusal denklemlere tabi N_t bilinmeyen değişkenler için çözüm bulma" ile eşdeğer hale gelir [86].

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_{N_r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \cdots & h_{1N_t} \\ h_{21} & h_{22} & \cdots & h_{2N_t} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N_r 1} & h_{N_r 2} & \cdots & h_{N_r N_t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ \vdots \\ s_{N_t} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ \vdots \\ n_{N_r} \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Bu nedenle, $\mathbf{H}$ bir kare matris ise (yani $N_r = N_t$) ve tam dereceli ise, bu doğrusal denklem sisteminin çözümü $\mathbf{s} = \mathbf{H}^{-1}\mathbf{y}$ ile verilir. Bu sorunu biraz daha genellemek gerekirse, $\mathbf{H}$ matrisi $N_r > N_t$ 'yi karşılıyorsa ve tam sütun sıralaması N_t ise, $\mathbf{s} = \mathbf{H}^\dagger \mathbf{y}$ olur, burada $\mathbf{H}^\dagger = (\mathbf{H}^H \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^H$. Bu örnek aslında doğrusal dönüşüm matrisi Denklem (4.6) ile verilen ZF tabanlı MIMO sezme yönteminin temel fikrini aktarmaktadır.

$$\mathbf{T}_{ZF} = \mathbf{H}^\dagger \quad (4.6)$$

$\mathbf{H}$ 'nin tersi alınabilir ise, sola çarpan sözde ters $\mathbf{H}^\dagger$ ve tersi çakışır, yani $\mathbf{H}^\dagger = \mathbf{H}^{-1}$ olur.

4.1.4. Minimum Ortalama Kare Hatası (MMSE) Sezme

MMSE aynı zamanda hem gürültüyü hem de paraziti azaltan doğrusal sezme tekniğidir. Dolayısıyla, MMSE sezme, gürültü ve sinyal istatistiklerini hesaba katarak genel MIMO sezme performansını iyileştirebilen ZF sezmesinin özellikle yararlı bir uzantısı olarak görülebilir. Gürültüyü ve her bir bileşen üzerinde ayrı ayrı çalışmayı dikkate alarak, alınan ve iletilen vektörler arasındaki kare hatasını en aza indirir.

MMSE detektörünün ana fikri, iletilen $\mathbf{x}$ ile tahmini sinyal $\mathbf{H}^H \mathbf{y}$ arasındaki ortalama kare hatasını (MSE) en aza indirmektir. Bu ifade Denklem (4.7)'de gösterilmiştir.

$$\mathbf{A}_{MMSE}^H = \arg \min \mathbb{E} \|\mathbf{x} - \mathbf{H}^H \mathbf{y}\|^2 \quad (4.7)$$

Burada $\mathbb{E}$ beklenen değerdir. MMSE detektörü gürültü etkisini, $\mathbf{I}$ birim matris olmak üzere Denklem (4.8) olarak dikkate almaktadır [48].

$$\mathbf{A}_{MMSE}^H = \left(\mathbf{H}^H \mathbf{H} + \frac{K}{SNR} \mathbf{I} \right)^{-1} \mathbf{H}^H \quad (4.8)$$

ZF detektöründen farklı olarak, MMSE azaltılmış bir gürültü durumuna bağlıdır ve SNR hakkında bilgi sahibi olmayı gerektirir. Bu nedenle, MMSE sezme, gürültü gücü büyük olduğunda ZF sezmeden önemli ölçüde daha iyi bir performans elde edebilir.

MMSE'nin daha kapsamlı ifadesinden bahsedilecek olursa; MMSE detektörü, ortalama kare hatasını en aza indiren $\hat{\mathbf{x}}$ ile gösterilen bir $\mathbf{x}$ tahmini elde eder. Böylece, MMSE detektörü tarafından elde edilen $\hat{\mathbf{x}}$ Denklem (4.9) olarak gösterilebilir [89].

$$\hat{\mathbf{x}} = \left(\mathbf{H}^H \mathbf{H} + \frac{\sigma_n^2}{E_s} \mathbf{I}_K \right)^{-1} \mathbf{H}^H \mathbf{y} = \mathbf{W}^{-1} \mathbf{b} \quad (4.9)$$

Burada $\mathbf{b} = \mathbf{H}^H \mathbf{y}$, $\mathbf{y}$ 'nin uyumlu süzgeç çıktısını temsil eder, E_s ortalama iletim gücü, σ_n^2 her bir elemanın varyansı olup MMSE ağırlıklandırma matrisi $\mathbf{W}$ aşağıdaki gibi gösterilir [89].

$$\mathbf{W} = \mathbf{G} + \frac{\sigma_n^2}{E_s} \mathbf{I}_K \quad (4.10)$$

Burada $\mathbf{G} = \mathbf{H}^H \mathbf{H}$ hermitian pozitif tanımlı (HPD) matris olan Gram matrisidir [75].

Sonuç olarak, MMSE doğrusal sezme, $\mathbf{A}\mathbf{H} = \mathbf{I}$ gibi ek sifıra zorlama kısıtlaması olmaksızın, ortalama kare hatası $e = \mathbb{E}\{\|\mathbf{A}^H \mathbf{y} - \mathbf{x}\|^2\}$ doğrudan en aza indirmek için $\mathbf{A}$ 'yı seçer. Paraziti en aza indiren ancak gürültüyü gideremeyen ZF sezme yönteminden farklı olarak ve gürültüyü en aza indiren ancak paraziti gideremeyen MRC detektöründen farklı olarak, MMSE detektörü, gürültü geliştirme ve parazit bastırma arasında optimal bir denge sağlamaktadır.

4.2. DOĞRUSAL ÖN KODLAMA

Masif MIMO'da temel noktalardan birisi, verici tarafında gerçekleştirilen sinyal işleme aşaması olan ön kodlama teknolojisidir [90]. Genellikle, gerçek bir kablosuz yayılma ortamında, aşağı bağlantı iletiminin performansının çoğunluğu CSI'ye bağlı olmak ile birlikte ön kodlama sayesinde, mükemmel olmayan CSI durumlarında iyileştirmeler mümkün olmaktadır. Masif MIMO sistemlerinde ön kodlama sayesinde, parazit ve sönümlleme etkileri azaltılabilmenin yanında anten sayısının sonsuza gittiği durumlar için verim ve kapasitenin artırılması söz konusudur [91].

Masif MIMO sistemleri için ön kodlamada hem doğrusal olmayan hem de doğrusal teknikler kullanılabilir. Bazı doğrusal olmayan yöntemler yüksek karmaşıklığa sahip olmalarına rağmen doğrusal yöntemlere göre daha iyi performans göstermektedir [64]. Ancak, BS'deki anten sayısının sonsuza gittiği varsayımıyla gerçekleşen çalışmalar neticesinde MF ve ZF gibi doğrusal ön kodlama tekniklerinin optimuma yakın sonuç

verdiği belirtilmiştir [2], [55]. Bu nedenle, masif MIMO sistemlerinde daha düşük karmaşıklığa sahip olan doğrusal ön kodlama teknikleri tercih edilmektedir.

4.2.1. Maksimum Oran İletimi (MRT) Ön Kodlama

Maksimum oran iletimi belirlenen kullanıcıdaki sinyali maksimum yapmayı hedefleyen MF ön kodlama da olarak bilinen bir tekniktir [92]. MRT aşağı bağlantı kanal matrisinin eşlenik devriği olmakla birlikte aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$\mathbf{W}_{MRT} = \sqrt{a}\mathbf{H}^* \quad (4.11)$$

Burada a güç faktörü olup, $\mathbf{H}$ matrisinin kompleks eşleneği $\mathbf{H}^*$ olarak gösterilmektedir [50]. Böylece alınan sinyal aşağıdaki gibi ifade edilebilmektedir.

$$y_{MRT} = \sqrt{\rho}\sqrt{a}\mathbf{H}^T\mathbf{H}^*\mathbf{s} + \mathbf{n} \quad (4.12)$$

Burada $\sqrt{\rho}$ ortalama iletim gücü, $\mathbf{s}$ ön kodlama sürecinden önceki iletilen vektörü ve $\mathbf{n}$ ise eklemeli beyaz Gauss gürültüsünü göstermektedir.

MRT ön kodlama ile masif MIMO sisteminde baz istasyonundaki anten sayısı M ile kullanıcı sayısı K birbirlerine yakın olduğu durumda çok fazla girişimlerden dolayı iyi bir performans göstermemektedir. Fakat BS antenlerinin sayısı kullanıcı sayısından çok daha fazla olduğu durumda MRT tekniği optimuma yakın bir performans sunmaktadır [93].

4.2.2. Sıfıra Zorlama (ZF) Ön Kodlama

Sıfıra zorlama ön kodlama tekniğinin amacı sinyali belirli bir kullanıcıya doğru yönlendirirken diğer kullanıcıların yönlerini sıfırlayarak diğer kullanıcıların sebep olacağı girişimi, paraziti azaltmaya çalışmaktır [50]. ZF ön kodlama matrisi aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$\mathbf{W}_{ZF} = \sqrt{a}\mathbf{H}^*(\mathbf{H}^T\mathbf{H}^*)^{-1} \quad (4.13)$$

ZF tarafından alınan sinyal ise şu şekilde gösterilmektedir.

$$y_{ZF} = \sqrt{\rho}\sqrt{a}\mathbf{H}^T\mathbf{H}^*(\mathbf{H}^T\mathbf{H}^*)^{-1}\mathbf{s} + \mathbf{n} \quad (4.14)$$

ZF ön kodlama tekniği gürültünün olmadığı durumda çok iyi performans göstermektedir. Masif MIMO sistemlerde gürültünün ihmal edilmesi durumunda ZF ön kodlamasının uygulanması daha pratik olacaktır. Ancak gerçek bir sistemde gürültünün ihmal edilmesi gibi bir durum olası değildir. Dolayısıyla böyle bir duruma sahip olan masif MIMO sistemler için en uygun çözüm olmayabilir.

4.2.3. Düzenleştirilmiş Sıfıra Zorlama (RZF) Ön Kodlama

Düzenleştirilmiş sıfıra zorlama ön kodlama tekniği MF ve ZF ön kodlama tekniklerinin avantajlarını kullanarak oluşturduğu denge ile birlikte masif MIMO sistemler için uygun bir ön kodlama tekniği olarak kabul edilmiştir [50]. Oluşturmuş olduğu denge sayesinde belirli bir seviyede gürültü ve parazit ortamına sahip sistemlerde başarılı bir performans sunmaktadır. Genel olarak iletilen ve alınan semboller arasındaki ortalama kare hatasını en aza indirmeye amaçladığından dolayı RZF ön kodlaması, MMSE ön kodlama tekniği olarak da adlandırılmaktadır [93]. Bu bilgilere dayanarak RZF ön kodlama matrisi şu şekilde verilmektedir:

$$\mathbf{W}_{RZF} = \sqrt{a} \mathbf{H}^* (\mathbf{H}^T \mathbf{H}^* + \mathbf{X} + \lambda \mathbf{I}_K)^{-1} \quad (4.15)$$

Burada düzenleştirme işlemi Hermitian negatif olmayan $\mathbf{X}$ matrisi ve düzenleme faktörü λ ile gerçekleştirilmektedir [4]. RZF ön kodlaması ile alınan sinyal aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$\mathbf{y}_{RZF} = \sqrt{\rho} \sqrt{a} \mathbf{H}^T \mathbf{H}^* (\mathbf{H}^T \mathbf{H}^* + \mathbf{X} + \lambda \mathbf{I}_K)^{-1} \mathbf{s} + \mathbf{n} \quad (4.16)$$

5. NESNELERİN İNTERNETİ SİSTEMLER İÇİN SPEKTRUM VERİMLİLİĞİ ANALİZİ

Bu kısımda kablosuz iletişim teknolojilerinde çok önemli bir yer tutan spektrum verimliliği konusu ile alakalı bazı çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalarda temel alınan nokta IoT konusudur. IoT uygulamalarına dayalı kablosuz sensör ağları (WSN) her geçen gün artmaktadır. Bu uygulamalar arasında sağlık, altyapı izleme, akıllı evler, giyilebilir cihazlar ve akıllı arabalar yer almaktadır. Ancak yeni nesil kablosuz haberleşme sistemlerinde çok farklı uygulama alanlarının ortaya çıkacağı düşünüldüğünde frekans spektrumunun verimli kullanılması önem arz etmektedir. Tüm frekans spektrumu artık çok yoğun olduğundan, IoT'ye dayalı etkili WSN'ler için maksimum spektrum verimliliğini sağlamak önemli bir noktadır. Bu bölümde, pilot dizisinin uzunluğu, TDD veya FDD çalışma modları ile ilgili olarak belirli koşullar altında etkili IoT sistemlerinin performansı için hangi modun daha etkili bir şekilde spektrum verimliliği sağladığı belirlenmeye çalışılmıştır. Sonuçlar Monte Carlo benzetimleri ile elde edilmiştir. Bildiğimiz kadarıyla bu çalışmayı gerçekleştirdiğimiz zaman içerisinde, literatürde henüz IoT tabanlı sistemlerde spektrum verimliliği için etkili mod seçimi analizi çalışmasının yetersiz olduğunun fark edilmesi bu alanda sonuçlar almamıza teşvik etmiştir. Tez içerisinde gerçekleştirilen bu bölümün sonuçları, IoT'ye dayalı WSN'ler için uygun tasarım koşullarının belirlenmesi için faydalıdır.

Elektromanyetik dalgalar teorisinin gelişmesinden bu yana sürekli gelişen kablosuz iletişim teknolojisi, son zamanlarda gözle görülür bir atılım göstermiştir. Bu atılım 1970'lerde kullanılan 1G'den 2020'de kullanılmaya başlanılan 5G teknolojisine kadar uzanmaktadır. Ayrıca bu cihazların her biri ile her zaman ve her yerde veri alışverişinin sağlanması sayesinde, veri aktarım hızlarında önemli iyileştirmelerin yapılması gerçekleştirilecektir. Dolayısıyla 5G ve ötesi teknolojiler için bu alanlar önemli konular olacaktır.

Masif MIMO [2], yüksek potansiyel faydaları nedeniyle 5G ve ötesi teknolojiler için en umut verici teknik olarak kabul edilmektedir. Çoğu potansiyel kazanç, mükemmel kanal durumu bilgisine dayanmaktadır. BS, sinyalleri farklı kullanıcılardan ayırmak için masif MIMO sistemlerinde CSI'lara ihtiyaç duymaktadır. Pilot dizilerin uzunluğu, CSI

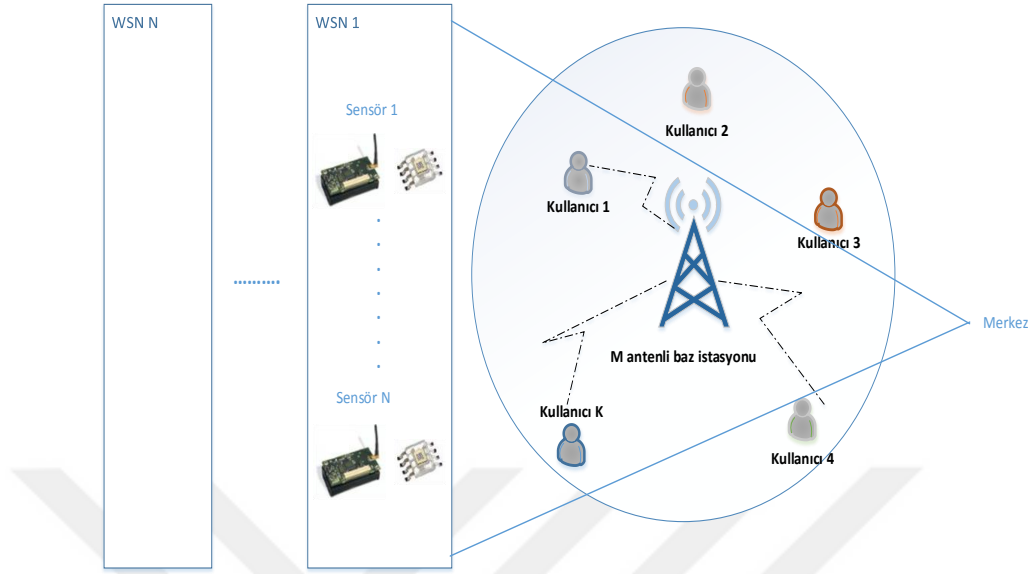
durumunun belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Genel olarak, pilot dizilerin uzunluğu en az BS antenlerinin sayısı kadar olmalıdır [94]. Bu, BS'nin gönderdiği bir pilot dizisi uzunluğunun, minimum BS antenlerinin sayısı olan M 'ye eşit olması anlamına gelirken, tek antenli kullanıcılardan iletilen pilot dizisinin uzunluğu, kullanıcı sayısına eşit bir minimum K uzunluğuna sahip olmalıdır.

Yeni nesil kablosuz sistemlerin geliştirilmesiyle birlikte, nesnelerin interneti sistemleri gibi sistemlerde WSN daha etkin bir şekilde kullanılacaktır. IoT tabanlı WSN'lerde kullanılacak veri iletimi, sensörler ve kullanıcı ara yüzü için genel bir şema Şekil 5.1'de gösterilmiştir.

Masif MIMO'nun birçok IoT cihaza sahip olan IoT ağına başarıyla uygulanabileceğinin gösterildiği çalışmalar literatürde yeteri kadar mevcuttur. Bu çalışmalardan biri olan [95]'te, endüstriyel IoT sistemi için K aktif IoT cihazı veya UE ile birlikte bir veri merkezi planlaması gerçekleştirilmiştir. Veri merkezi ise IoT cihazlarından gerekli olan veriyi toplamak ve kontrol etmek için M antenli bir masif MIMO sistemi ile donatılmıştır ve her UE'nin ise bir anteni olduğu vurgulanmıştır. Masif MIMO ile birlikte yüksek hassasiyetli işlemlerin gerçekleştirilmesine olanak tanınmıştır. Ayrıca başka bir çalışmada, IoT ağına bağlı bir masif MIMO sisteminin radyasyon gücünü hem yukarı bağlantı için hem de aşağı bağlantı için azaltabileceği vurgulanmaktadır [96]. Veri füzyon merkezinde masif MIMO varlığında MIMO kanalları kullanılarak IoT verilerinin kanala duyarlı bir karar füzyon şemasının verildiği çalışmalar [97] ve [98]'de gerçekleştirilmiştir. Başka bir çalışma olan [99]'da, akıllı bir fabrikada veya bir araştırma ve geliştirme kampüsünde özel bir IoT ağını desteklemek için tek bir masif MIMO BS kullanıldığı bir sistem oluşturulmuştur. Tek hücreli masif MIMO destekli IoT sisteminin aktif kullanıcı algılamasını ve kanal tahminini, sıkıştırılmalı sezme teknikleri kullanarak ele alan bir çalışma [100]'de gösterilmektedir. Başka bir çalışma olan [101] ve [102]'de, rastgele pilotlarla hücresiz masif MIMO kullanılarak IoT'nin desteklenmesi incelenmiştir.

IoT kapsamındaki multimedya tabanlı sistemlerde frekans spektrumları artık çok yoğun olduğu için spektrum verimliliğinin sağlanması çok önemlidir. Kişiler arası iletişimin artmasının yanı sıra IoT cihazlarının yaygınlaşması ile iletişim trafiğinde de önemli bir artış olacaktır. Bu IoT cihazlarının çoğu, bireysel bir düğüm yerine bir WSN düğümüne sahip olacaktır. Akıllı ev ağındaki bir klima düğümü veya akıllı bir şehirdeki trafik ışığı düğümü örnek olarak verilebilir. Tüm bu düğümlerin iletişimde sınırlı kaynaklı spektrumun verimli kullanılması gerekmektedir. WSN'ler bu gereksinimlere göre

geliştirileceğinden [103], 5G ve ötesi gibi yeni nesil kablosuz iletişim teknolojilerinin gereksinimleri dikkate alınarak tezin bu bölümü gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.1. IoT sistemlerine dayalı WSN mimarisi.

Mevcut literatürde, masif MIMO sistemleri için çiftleme yöntemleri gibi standart şemalar kullanılmamasına rağmen, masif MIMO için ana yaklaşımın TDD olduğu vurgulanmaktadır [64]. Mevcut kablosuz standartların çoğu şu anda FDD altında çalışırken, masif MIMO için düşünülen sistem TDD olarak planlanmıştır. Bu bölümde, TDD ve FDD modları altında IoT sistemlerinde masif MIMO'nun spektrum verimlilikleri karşılaştırılarak literatüre katkıda bulunulmuştur.

Ortam koşullarına göre bir haberleşme sisteminin altyapısı belirlenebilmektedir. Örneğin, yeterli alana sahip olmadığı için bir cep telefonuna çok fazla anten eklenememektedir. Ancak baz istasyonunda herhangi bir alan sorunu olmadığı için baz istasyonundaki anten sayısı oldukça artırılabilir. Bu amaçla, bu kısımda, pilot uzunluğuna göre belirli koşullar altında etkin IoT sistemlerinin performansı için hangi modun, yani TDD veya FDD'nin daha etkin bir şekilde spektrum verimliliğini sağladığı belirlenmeye çalışılmıştır.

5.1. İLGİLİ ÇALIŞMALAR

Yeni nesil kablosuz iletişim teknolojileri için önemli bir konu da Nesnelerin İnterneti'ne dayalı WSN'lerdir. Sadece mobil iletişim teknolojileri ile ifade edilemeyecek kadar geniş

bir ilgi alanına sahiptir. Örneğin, [104]’teki çalışmada yeni bir WSN önerilmiştir. Ancak önerilen bu sistemde, kullanıcıların ve nesnelerin etkileşimlerinde frekans spektrumu ile ilgili konuların nasıl ele alınacağı belirtilmemiştir. Başka bir çalışma olan [105]’te ise, bilişsel sensör ağları için spektrum kullanımının enerji verimli bir analizi yapılmıştır. Bu geniş alanlarda kullanım göz önüne alındığında IoT sistemleri için spektrum verimliliğinin çok önemli olduğu anlaşılmaktadır. IoT’de spektrum verimliliğini dikkate alan çalışmalar genellikle D2D, heterojen ağlar, lisanssız spektrum kullanımı ve ortogonal olmayan çoklu erişim cihazları ile alakalı olduğu görülmektedir [106], [107].

5.1.1. Zaman Bölmeli Çiftleme (TDD) ve Frekans Bölmeli Çiftleme (FDD)

Bir haberleşme sisteminde belirli bir frekans bandı düşünüldüğü durumda aşağı ve yukarı bağlantı iletimi iki şekilde gerçekleştirilebilir: TDD ve FDD.

FDD modu için iki ayrı bölüme ayrılmış bir bant genişliği söz konusudur. İlk bölümde yukarı bağlantı iletimi, diğer bölümde ise aşağı bağlantı iletimi meydana gelmektedir. Hem frekans seçici sönmülemeli aşağı bağlantı hem de yukarı bağlantı için pilot dizileri gereklidir ve toplam pilot uzunluğunun en az sırasıyla BS antenlerinin sayısı ve kullanıcı sayısı olan M ve K toplamına eşit olduğu belirtilmektedir [94].

Bu bant genişliğinin bütünü herhangi bir bölmeye ayrılmadan gerek aşağı bağlantı gerekse yukarı bağlantı iletiminin aynı anda gerçekleştirildiği başka bir yol olan TDD modu da söz konusudur. Haberleşme sisteminin aşağı ve yukarı bağlantı kanallarından daha hızlı değişmesi durumunda kanalın sadece bir yönde öğrenilmesi yeterli olmaktadır. Pilotları sadece en etkili yönde, $M \gg K$ koşullarında gönderdiğimizde mümkün olduğunca az eğitim sinyali ile pilot dizisini kullanmak için, TDD sisteminde sadece yukarı bağlantı pilotlarını iletmesi yeterli olmaktadır, böyle bir durum söz konusu olduğunda pilot dizisinin uzunluğu en az K kullanıcı sayısına eşit olmalıdır [108].

5.1.2. Kanal Durum Bilgisi (CSI)

BS, kanal tahmini yoluyla doğru kanal durum bilgisini etkili sezme ve ön kodlama sağlamak için gerçekleştirmelidir. Kanal durumu bilgisi tüm olası kazançlar için önemlidir [5].

τ_p uzunluğuna sahip pilot dizileri kullanılarak tahmin edilen mükemmel CSI ve mükemmel olmayan CSI aşağıda açıklanmaktadır. Mükemmel CSI durumunda, verici, alıcıdaki kesin kanal bilgileri ve eşitlik (parite) istatistikleri hakkında bilgi içermektedir.

Mükemmel olmayan CSI durumunda verici hatalı $\widetilde{H} \neq H$ kanal matrisi hakkında bilgilendirilebilir. Böyle bir mükemmel olmayan CSI söz konusu olduğunda, düşünülmesi gereken noktalar şu şekilde belirtilebilir: İlk olarak, vericinin tasarımı olası en kötü kanal durumunun performansı yükseltebilecek şekilde belirlenebilir. İkincisi, sistemin performansının ortalama olarak en uygun olacak şekilde verici tasarımı gerçekleştirilebilir [109].

TDD modunda, [110]'daki çalışmada, BS anten sayılarının aksine pilotların yalnızca K kullanıcı uzunluğuna ihtiyaç duyduğu belirtilmektedir. Başka bir çalışma olan [111], FDD modundaki optimal pilot dizilerinin sayısının, kanal matrislerinin anlamlı tahminlerini oluşturabilen en küçük aralık olan BS antenlerinin sayısına eşit olduğu anlaşılmaktadır. Ek olarak, BS anten boyutuyla orantılı pilot dizilerinin fazlalığının, FDD modunda masif MIMO uygulamasını zorlaştırdığı bilinmektedir [112]. Genel olarak, TDD sistemleri düşünüldüğünde çok sayıda anten eklenmesi daha faydalı olduğu anlaşılmaktadır. Öte yandan FDD sistemleri, örneğin $\tau_p = M$ 'de olduğu gibi daha uzun pilot dizi seçimi durumunda daha fazla anten eklenmesi gerçeğinden yararlanmaktadır.

5.2. TEORİK ANALİZ

Bu bölümde, ZF ve MRC şemaları için mevcut spektrum verimliliği denklemleri sunulmaktadır. Bu kısımda kullanılan gösterimler aşağıdaki gibidir: Vektörleri ve matrisleri temsil etmek için sırasıyla kalın küçük harfler ve büyük harfler kullanılmaktadır. Transpoz, eşlenik devrik, mutlak değer ve beklenen değer sırasıyla $(.)^T$, $(.)^H$, $(|. |)$ ve $\mathbb{E} [.]$ ile ifade edilmektedir.

$C^{m \times n}$, bir $m \times n$ karmaşık matrisini göstermektedir. Burada M baz istasyonundaki anten sayısı, K ise kullanıcı sayısıdır. i . hücrede, l . BS ile k . kullanıcı arasındaki kanal katsayı vektörü $\mathbf{h}_{i,k}^l = [h_{i,k,1}^l \dots h_{i,k,M}^l]^T \in C^M$ ile gösterilir; burada $(.)^T$ transpoz anlamına gelmektedir.

$h_{i,k}^l$ ifadesinin m . kanal katsayısının varyansı Denklem (5.1) ile gösterilmektedir.

$$\beta_{i,k}^l = \mathbb{V}\{h_{i,k,m}^l\} \quad (5.1)$$

Bu kanal özelliklerini kullanan spektrum verimliliği analizi aşağıdaki gibi yapılmaktadır. Rayleigh sönümlemeli kanallar için [113], [114], i hücresi ($i = 1 \dots L$) ve aşağıdaki

denklemler, [54]'teki çalışmaya dayanarak BS l 'de rastgele bir kullanıcı k arasındaki kanal için oluşturulmuştur.

$$\mathbb{V}\{h_{i,k,m}^l\} = \beta_{i,k}^l \quad (5.2)$$

$$\mathbb{V}\{\hat{h}_{i,k,m}^l\} = \frac{p_{i,k}\tau_p(\beta_{i,k}^l)^2}{\sum_{i' \in \mathbb{P}_l} p_{i',k}\tau_p\beta_{i',k}^l + \sigma_{UL}^2} \quad (5.3)$$

$$MSE_{i,k}^l = \beta_{i,k}^l \left(1 - \frac{p_{i,k}\tau_p\beta_{i,k}^l}{\sum_{i' \in \mathbb{P}_l} p_{i',k}\tau_p\beta_{i',k}^l + \sigma_{UL}^2} \right) \quad (5.4)$$

Burada $\hat{h}$ ve MSE sırasıyla kanal tahmini ve hata tahmini varyansını temsil etmektedir. Denklem (5.2) $\mathbf{h}_{i,k}^l$ ifadesinin varyansını göstermektedir. Denklem (5.3) ise tahmini kanal ifadesinin varyansını temsil etmektedir.

Masif MIMO literatüründeki MRC ve ZF ana şemaları aşağıda ele alınmaktadır. Bunlar Denklem (5.5) ile verilmektedir [115].

$$V_l = \begin{cases} \widehat{\mathbf{H}}_l^l & \text{MRC için} \\ \widehat{\mathbf{H}}_l^l \left[(\widehat{\mathbf{H}}_l^l)^H \widehat{\mathbf{H}}_l^l \right]^{-1} & \text{ZF için} \end{cases} \quad (5.5)$$

Burada V_l , BS l 'deki vektörlerin matris biçimini belirtilmektedir. Sezme vektörü $\mathbf{v}_{l,k}$, iletişim sisteminde alınan sinyalin tüm kısımlarına dâhildir. Bu sezme vektörleri, V_l matris biçiminde gösterilmektedir.

Yukarı bağlantı ve aşağı bağlantı ikiliği için MRC ve ZF ön kodlama vektörü aşağıdaki gibi değerlendirilmektedir [116].

$$w_{l,k} = \begin{cases} \frac{\hat{h}_{l,k}^l}{\sqrt{\mathbb{E}\{\|\hat{\mathbf{h}}_{l,k}^l\|^2\}}} & \text{MRC için} \\ \frac{\widehat{\mathbf{H}}_l^l \mathbf{r}_{l,k}}{\sqrt{\mathbb{E}\{\|\widehat{\mathbf{H}}_l^l \mathbf{r}_{l,k}\|^2\}}} & \text{ZF için} \end{cases} \quad (5.6)$$

Burada $\mathbf{r}_{l,k}$, $\left[(\hat{\mathbf{H}}_l^l)^H \hat{\mathbf{H}}_l^l\right]^{-1}$ matrislerin k . sütununu temsil etmektedir ve $\mathbf{w}_{l,k}$ aşağı bağlantı ön kodlama vektörlerini belirtmektedir.

İlk olarak, MRC sezme durumunda, $\mathbf{v}_{l,k} = \hat{\mathbf{h}}_{l,k}^l$ olduğunda, $SNR_{l,k}^{DL}$ Denklem (5.7)'deki gibi olur [54].

$$SNR_{l,k}^{DL} = \frac{p_{l,k} \left| \mathbb{E} \left\{ (\mathbf{h}_{l,k}^l)^H \mathbf{w}_{l,k} \right\} \right|^2}{\sum_{i=1}^L \sum_{t=1}^K p_{i,k} \mathbb{E} \left\{ \left| (\mathbf{h}_{l,k}^l)^H \mathbf{w}_{i,k} \right|^2 \right\} - p_{l,k} \left| \mathbb{E} \left\{ (\mathbf{h}_{l,k}^l)^H \mathbf{w}_{l,k} \right\} \right|^2 + \sigma_{UL}^2} \quad (5.7)$$

Ardından, ZF sezme durumunda, yani $\mathbb{E}\{\mathbf{v}_{l,k}\} = 1$ olduğu durumda, ZF tespiti için $SNR_{l,k}^{UL}$ ifadesi aşağıdaki gibidir [67].

$$SNR_{l,k}^{ZF,UL} = \frac{p_{l,k}}{\sum_{i=1}^L \sum_{t=1}^K p_{i,k} \mathbb{E} \left\{ \left| \mathbf{v}_{l,k}^H \mathbf{h}_{i,k}^l \right|^2 \right\} - p_{l,k} + \frac{\sigma_{UL}^2}{(M-K) \mathbb{V}\{\hat{h}_{l,k,m}^l\}}} \quad (5.8)$$

Burada $p_{i,k}$ ve $p_{l,k}$ sırasıyla yukarı bağlantı gücünü ve aşağı bağlantı gücünü temsil etmektedir.

Ergodik kapasite ve ergodik spektrum verimliliği ilişkilidir. Literatür incelendiğinde ergodik oranın 5G ve ötesi teknolojilerde verimlilik açısından bir ölçü birimi olduğu görülmektedir. Bu nedenle, spektrum verimliliği analizleri şu denkleme göre yapılmaktadır [67]:

$$SNR_{l,k}^{DL} = \frac{p_{l,k} \left| \mathbb{E} \left\{ (\mathbf{h}_{l,k}^l)^H \mathbf{w}_{l,k} \right\} \right|^2}{\sum_{i=1}^L \sum_{t=1}^K p_{i,k} \mathbb{E} \left\{ \left| (\mathbf{h}_{l,k}^l)^H \mathbf{w}_{i,k} \right|^2 \right\} - p_{l,k} \left| \mathbb{E} \left\{ (\mathbf{h}_{l,k}^l)^H \mathbf{w}_{l,k} \right\} \right|^2 + \sigma_{UL}^2} \quad (5.9)$$

Spektrum verimliliği, bir kablosuz iletişim sisteminde belirli bir bant genişliği hakkında gerçekleştirilebilir veri hızını göstermektedir [117]. Shannon Teoremine dayanarak [118], kablosuz iletişim sistemi kapasitesi $R = \log_2(I_{N_R} + P\mathbf{A}^H\mathbf{G})$ ile verilmektedir. R , ulaşılabilir veri hızıdır, burada I_{N_R} bir $N_R \times N_R$ birim matrisidir. P iletim gücünü temsil etmektedir. $\mathbf{A}$ bir kanal matrisidir ve $\mathbf{G}$ bir dizi kazancıdır [117].

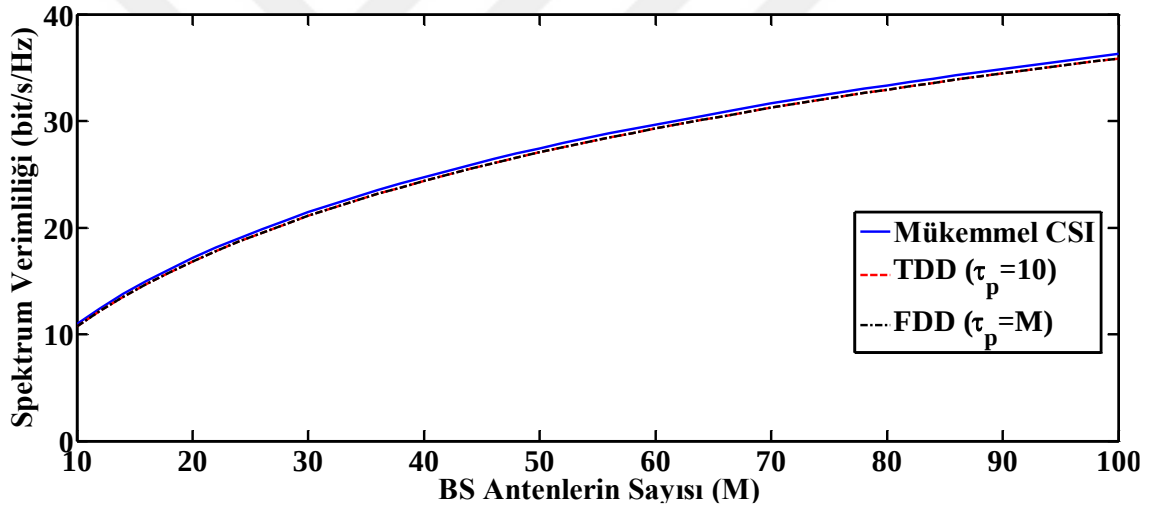
Yukarıda belirtilen şemalara göre, bir sonraki bölümde verilmiş olan spektrum verimliliği sonuçları elde edilmektedir. Elde edilen bazı grafikler için gerçekleştirilmiş olan

benzetimlerde [67]'deki çalışma dikkate alınmıştır.

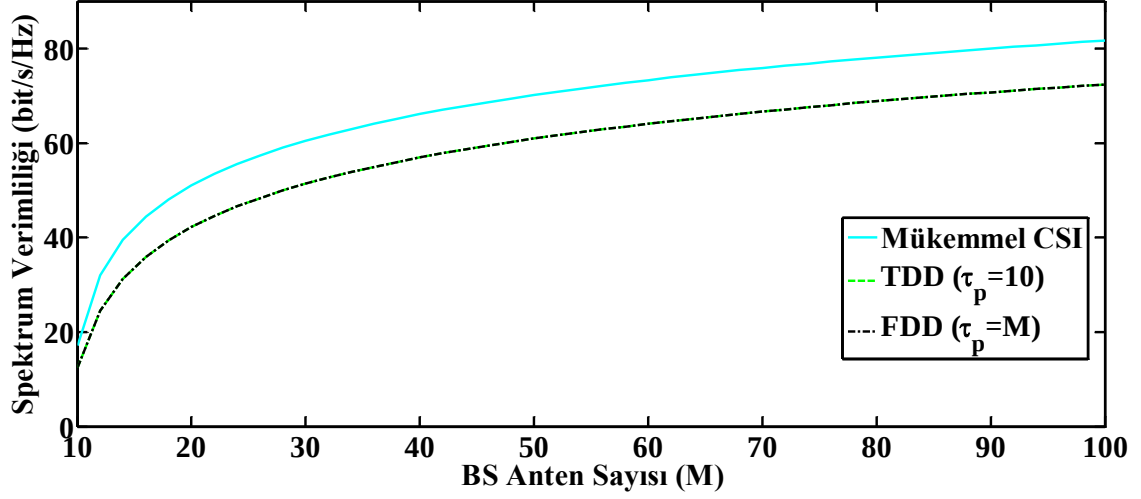
5.3. NÜMERİK ANALİZ

Bu bölümde, spektrum verimliliği performansı $K = 10$ kullanıcı, aşağı bağlantı iletimi, 5 dB SNR ve Rayleigh sönümlemeli kanal koşulları altında gösterilmektedir.

Şekil 5.2'deki MRC ve Şekil 5.3'teki ZF şemalarının performansı ele alınmaktadır. Spektrum verimliliği performansları, mükemmel CSI ve mükemmel olmayan CSI (kanal durumu bilgisinin τ_p uzunluğundaki pilot diziler tarafından tahmin edildiği durum) koşulları altında karşılaştırılmaktadır. Spektrum verimliliği, BS antenlerinin sayısının M 'nin bir fonksiyonu olarak ifade edilir ve $\tau_p = M$ kullanılarak FDD modundadır; $\tau_p = K = 10$ kullanılarak TDD modunda karşılaştırılmaktadır.



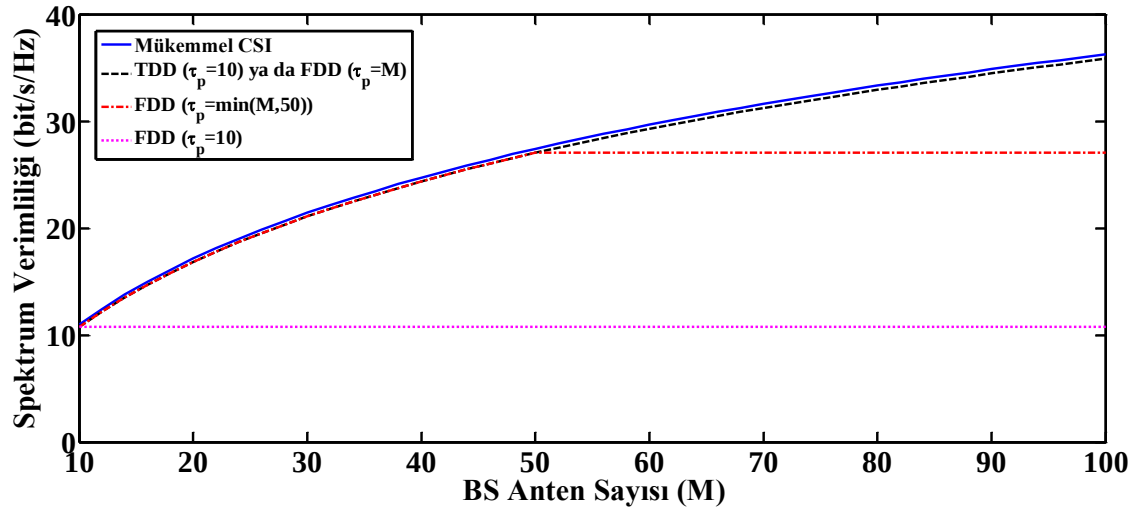
Şekil 5.2. MRC kullanarak farklı uzunluktaki pilot dizisi ile TDD ve FDD modunda spektrum verimliliği performansı.



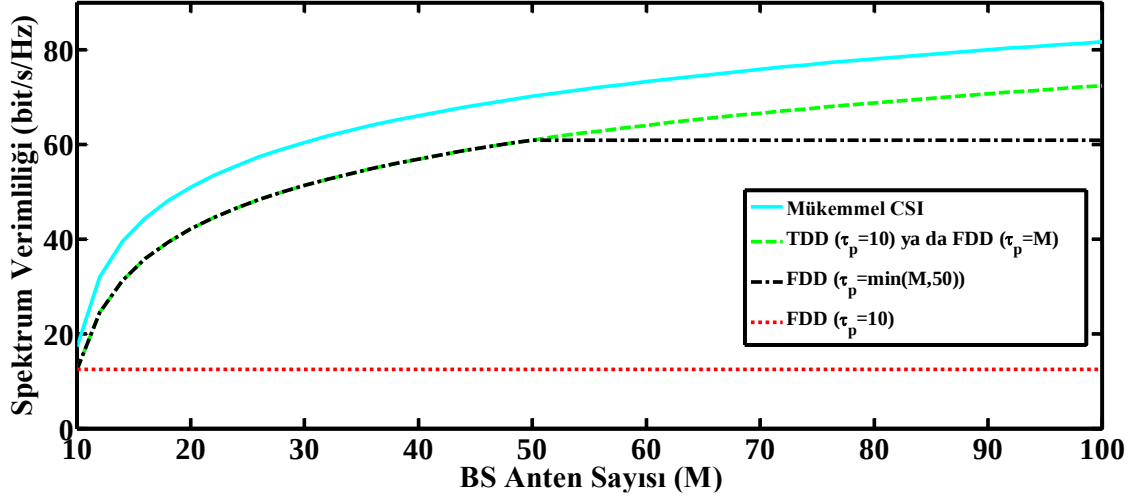
Şekil 5.3. ZF kullanarak farklı uzunluktaki pilot dizisi ile TDD ve FDD modunda spektrum verimliliği performansı.

Şekil 5.2 ve Şekil 5.3'te gösterildiği gibi, hem ZF hem de MRC için, pilot dizisinin uzunluğunun BS antenlerinin sayısına eşit olduğu FDD modu ve pilot dizisinin uzunluğunun kullanıcı sayısına eşit olduğu TDD modu benzer performans göstermektedir. Ayrıca aynı koşullar altında ZF ve MRC'de spektrum verimliliği performansı karşılaştırılırsa, ZF durumunda olası tüm M baz istasyonundaki anten sayılarında MRC'ye göre daha etkin iyileştirme elde edildiği gözlemlenmektedir.

Şekil 5.4 ve Şekil 5.5'te, FDD modunda hem BS antenlerinin sayısı hem de pilot uzunluğu birlikte artırılmaktadır. Ancak TDD modunda BS anten sayısı artırılırken, pilot uzunluğunun kullanıcı sayısına eşit olması yeterlidir.



Şekil 5.4. MRC kullanan FDD için pilot dizisinin sabit uzunluğuna göre TDD ve FDD modunda spektrum verimliliği performansı.



Şekil 5.5. ZF kullanan FDD için pilot dizisinin sabit uzunluğuna göre TDD ve FDD modunda spektrum verimliliği performansı.

5.3.1. Senaryolara göre Öneriler

Bu bölümde, IoT tabanlı kablosuz algılayıcı ağların da dâhil olabileceği karmaşık bir masif MIMO haberleşme sistemi kurulması durumunda yüksek SE başarımı sunabilen beş farklı senaryoya göre öneriler sunulmuştur.

5.3.1.1. Senaryo 1

Bir haberleşme sisteminde TDD ve FDD modunun seçimi önemli olmadığında, yüksek spektrum verimliliği sağlamak için ZF'nin MRC'den daha etkin kullanılması nedeniyle tercih edilebilir.

5.3.1.2. Senaryo 2

Bir iletişim sisteminde BS antenlerinin sayısı artırılırken pilot dizisinin uzunluğu değiştirilmezse TDD modunun seçilmesi önerilmektedir.

5.3.1.3. Senaryo 3

Pilot dizisinin uzunluğunun BS antenlerinin sayısı ile artması bekleniyorsa, FDD modu seçilebilmektedir.

5.3.1.4. Senaryo 4

Şekil 5.4 ve Şekil 5.5'te görüldüğü gibi, baz istasyonundaki anten sayısı artmasına rağmen pilot dizisinin uzunluğu değişmezse, FDD modundaki spektrum verimliliği belirli bir noktadan sonra değişmeyecektir. Bu nedenle FDD modu seçilirken pilot dizisi uzunluğu seçimi dikkate alınmalıdır. Bu durumda, BS'deki anten sayısı pilot dizisinin

uzunluğundan daha az ise FDD modu seçilebilir. Ancak BS'deki anten sayısı pilot dizisi uzunluğundan fazla ise TDD modu seçilebilir.

5.3.1.5. Senaryo 5

Şekil 5.4 ve Şekil 5.5'ten görülebileceği gibi, pilot dizisinin uzunluğu kullanıcı sayısı olarak seçilirse, yani $K = \tau_p = 10$, FDD'de $K = \tau_p$ için spektrum verimliliği baz istasyonundaki anten sayısı artsa bile sabit kalmaktadır. Böylece, FDD modunda $K = \tau_p$ durumunda, spektrum verimliliğindeki artışın baz istasyonundaki anten sayısındaki artışla ilgili olmadığı gözlenmiştir. Bu gözlem hem ZF hem de MRC için açıktır. Diğer durumlardan farklı olarak, spektrum verimliliğinde bir artış gözlenmez. Bu nedenle, kullanıcı sayısı kadar pilot dizisinin uzunluğu da dikkate alınır, FDD modu seçilmemelidir.

5.4. SONUÇ

Genel olarak ZF, tez çalışmasının bu bölümünde yüksek spektrum verimliliği açısından TDD ve FDD mod seçiminden bağımsız olarak MRC'ye kıyasla daha iyi performansa sahiptir.

TDD modunda pilot dizisinin uzunluğu kullanıcı sayısına, FDD modunda ise pilot dizisinin uzunluğu BS'deki anten sayısına eşit olmalıdır. Ancak bu şekilde her iki mod için spektrum verimliliği performansları birbirine yakın olabilir. Ancak FDD modunda pilot dizi uzunluğunun da artırılması gerektiği anlaşıldığından BS'de anten sayısının artırılması mantıklı değildir.

Yukarıdaki analiz sonuçlarından da anlaşılaacağı gibi, IoT sistemlerinde yüksek spektrum verimliliği sağlamak için uygun bir modun seçimi için işlemler yapılmıştır. Bu sonuçlar, IoT sistemleri üzerinde çalışacak araştırmacılar için cesaret verici niteliktedir.

6. YÜKSEK SPEKTRUM VERİMLİLİĞİ İÇİN İDEAL KULLANICI SAYISININ BELİRLENMESİ

Bu bölümde, tez kapsamında odaklanılan noktalardan birisi olan gelecek nesil kablosuz iletişim sistemlerinde spektrum verimliliği için ideal kullanıcı sayısının belirlenmesine yönelik çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

6G ve ötesi ağlar gibi yeni nesil kablosuz iletişim teknolojilerinde çok kullanıcılı bir MIMO sisteminin, sıfırdan tanımlanmış bir bölgeyi optimum SE ile eşit olarak kaplamak için geliştirildiği varsayılmaktadır. İdeal kullanıcı terminali sayısı U , baz istasyonu antenlerinin sayısı ve kullanılan pilot yeniden kullanım faktörü nedir? Bu bölümün amacı, bu özel konuyu ele almaktır. Bunun için üç girişim seviyesi belirlenmiştir. Bu girişim seviyelerine dayalı olarak, sinyal-girişim-ve-gürültü oranları oluşturulmuştur. Böylece kapalı form spektrum verimliliği denklemleri bu şekilde elde edilmiştir. BS anten sayısının bir fonksiyonu olarak benzetimler, çoklu pilot yeniden kullanım faktörleri ve MRC ve ZF gibi çeşitli işleme şemaları dikkate alınarak gerçekleştirilmektedir. Sonuçlardan U 'nun işleme şemalarına göre değişiklik gösterdiği anlaşılmaktadır. Dolayısıyla sistemin sabit kullanıcı sayısı K dikkate alınarak değerlendirilmesi, yeni nesil haberleşme sistemleri için tasarım parametrelerinin belirlenmesinde doğru bir sonuç vermeyecektir. Genel olarak, bu sonuçlar, çok hücreli sistemlerde ideal kullanıcı sayısı U kullanıldığında, spektrum verimliliğinin maksimize edildiğine dair faydalı ifadeler içermektedir.

6.1. GİRİŞ

Masif MIMO sistemi gelecek nesil kablosuz iletişim teknolojileri için büyük bir ilgi görmektedir [119]. Masif MIMO sisteminde genel olarak bir anten dizisi birden fazla uçbirime aynı anda hizmet etmektedir. Bununla birlikte baz istasyonundaki anten sayısı uçbirimlerle kıyaslandığında oldukça fazladır. Böyle bir sistemin kullanıldığı çalışmalardan biri [120]'dir. Bu çalışmada da görüleceği üzere TDD senaryosu dikkate alınmıştır. Bu senaryoda zaman dilimi “ters bağlantı pilot” ları ile “ileri bağlantı veri iletimi” arasında bölünmektedir. Kanal tahmininde bu pilotlardan faydalanılmaktadır. Bunun sonucunda da veri iletiminde kullanılacak ön kodlama oluşmaktadır [119].

Uçbirim sayısının pilotlar için gerekli olan süreye etkisi olmasına rağmen, baz istasyonundaki anten sayısının bir etkisi yoktur [121]. Tutarlılık süresi, kanalın sabit olduğu varsayımına dayanan aralıktır. Bu parametre, özellikle taşıyıcı frekansına bağlıdır. Tutarlılık süresi, masif MIMO'da özellikle kanal tahmininde önemli bir yere sahiptir. Masif MIMO'da kanal tahmini çok akıllıca yapılmaktadır. Tahmini yükün anten sayısından bağımsız olmasını sağlamak için zaman bölmeli çiftleme, yukarı bağlantı pilotları ve kanal karşılıklılığı kullanılmaktadır. Bu nedenle, masif MIMO'nun tutarlılık süresi, anten sayısını sınırlamayacaktır. Bununla birlikte, kanal tutarlılığı, kanalı zaman ve frekans üzerinden ne sıklıkla tahmin etmemiz gerektiğini belirlemede kesinlikle önemlidir. Tutarlılık bloğu başına kullanılan kanal sayısı, tutarlılık süresi ve tutarlılık bant genişliğinin ürünüdür. Hizmet verilecek terminal sayısı, tutarlılık süresi ile sınırlıdır. Tutarlılık süresi, terminallerin hareketliliğine bağlıdır [54]. LTE sistemlerde kanalların tahmini düzenli bir zaman aralığında gerçekleştirilmektedir. Bu aralık, kullanıcıların tutarlılık zamanından bağımsızdır. Fakat kullanıcıların sahip olabileceği en kısa tutarlılık zamanı olarak ifade edilmektedir. Tutarlılık süresi kullanıcı hızı ile ters orantılıdır. Bu nedenle zaman aralığı maksimum hareketlilik hızı olarak belirtilmektedir [88]. Böylece daha iyi bir kanal kestirimi gerçekleştirilebilir. Fakat kullanıcıların çoğunda tutarlılık süresinin büyük olduğu durum mevcuttur. Bu, kanal kestirimini normalden daha çok tahmin etmeye sebep olacaktır. Bunun neticesinde de radyo kanallarının gereğinden fazla kullanılması ortaya çıkacaktır. Az sayıdaki kullanıcının bulunduğu şartlarda daha iyi sonuçlar alınabilmesine rağmen, hücre başına düşen kullanıcı sayısının çok fazla olduğu Masif MIMO sistemleri için daha verimli çalışmalar gereklidir.

Son zamanlarda gelecek nesil kablosuz iletişim sistemlerinde kullanımı artan masif MIMO, alıcı ve verici kısımlarında birden fazla anten üzerinden haberleşmenin gerçekleştirildiği sistem olarak bilinmektedir. Aynı anda birden fazla terminal ile iletişime izin vermektedir. Çoklu anten kullanmanın başlıca faydaları arasında, anten sayısı ile birlikte elde edilen çeşitlilik neticesinde daha etkili bir iyileştirme ve uzamsal çoğullama yoluyla daha yüksek veri hızı gelmektedir. Anten sayısında bir sınırlama yoktur. Aslında bu durum, alıcı ve vericideki anten sayılarındaki farklılıkların karşılaştırılması üzerine çalışmaların yapılmasını mümkün kılmıştır. Masif MIMO'nun bazı parametre tasarımları, çeşitli başarımların analizleri ve işlevi gibi konularda çeşitli çalışmaların devam ettiği gözlemlenmektedir. Bunlardan biri olan [55]'teki çalışmada, ağ tasarımı ve masif MIMO sistemi için sinyal işleme ve sinyal kodlama üzerine teorik

alışmalar sunulmaktadır. Masif MIMO sistemi, özellikle 5G ve ötesi teknolojiler için tasarlanmış bir kavramdır. Baz istasyonunda binlerce antenin donatılması planlanmaktadır. Bu sayede özellikle spektrum verimliliğinin arttırılmasında nc rol oynaması söz konusudur [68]. Bu sistem ile sadece spektrum verimliliğinde değil, aynı zamanda enerji verimliliğinde, daha yüksek kapasitede, daha yüksek hız ve daha az gecikmede iyileştirmeler elde edilebilmektedir. Özellikle anten dizi kazancını artırma açısından 5G ağları üzerinde de testler yapılmıştır [41].

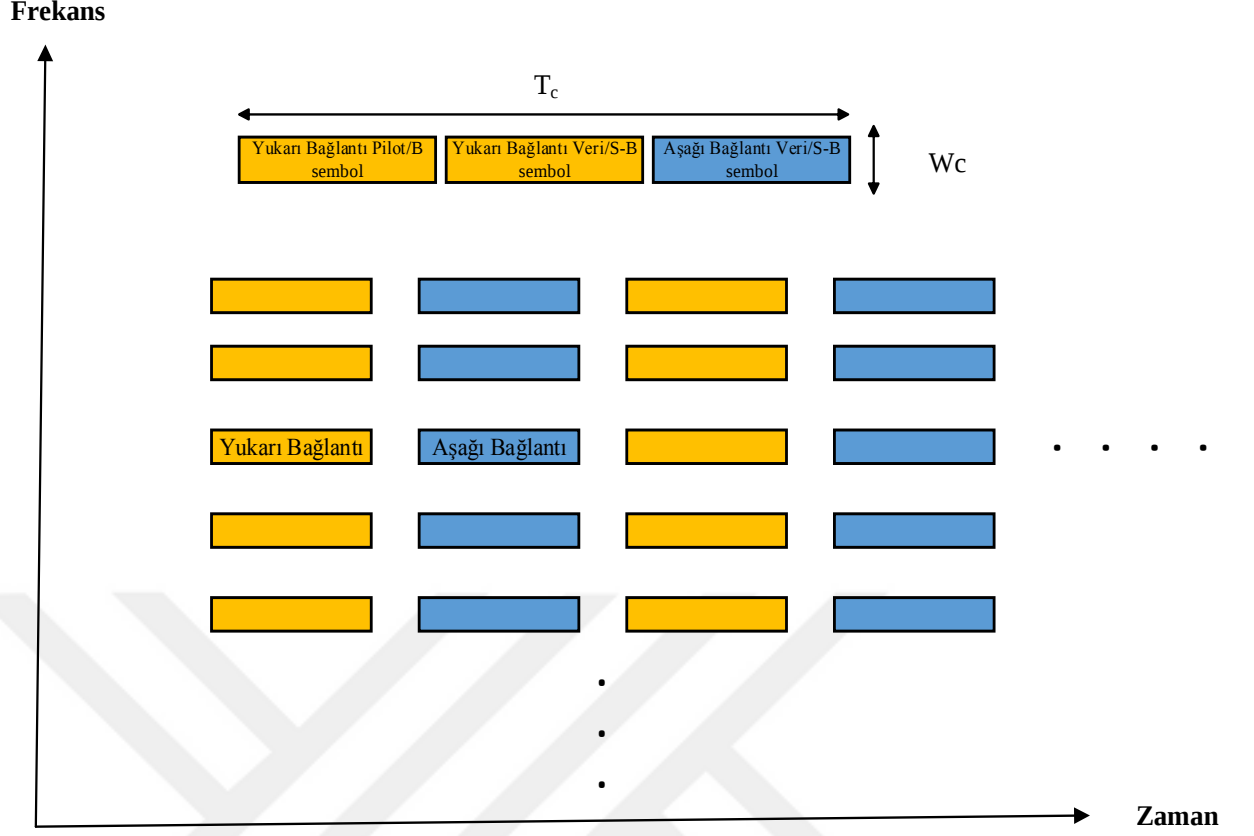
Masif MIMO hakkındaki çalışmalar incelendiğinde, araştırmacıların genel olarak kanal durum bilgisinin elde edilmesi, hücreler arası girişimlerin engellenmesi gibi temel fiziksel katman özelliklerine yoğunlaştıkları gözlemlenmektedir [3], [4], [119]. Daha sonraki bazı çalışmalarda masif MIMO'nun enerji verimliliğindeki iyileştirmelere olan katkılarına değinilmiştir [5]–[7]. Bununla birlikte, alıcı-vericilerin donanım bozulmalarının masif MIMO sistemlerde etkisinin eski sistemlere göre daha azaldığı ile alakalı da çalışmalar yapılmıştır [8]–[10]. Fakat kullanıcıların programlanması, kaynak tahsisinin ideal bir şekilde gerçekleştirilmesi üzerine çalışmalar yeteri kadar gerçekleştirilmediği anlaşılmıştır. Bununla alakalı ilk çalışmaların mevcut olduğu [11]'de, kullanıcılar belli gruplara ayrıştırılmıştır. Burada temel mantık, sınırlı ortogonal pilot dizilerinin kullanıcılar arasında uygun bir şekilde paylaştırılmasıdır. Bu paylaştırma işleminin ise çeşitli yöntemlerle gerçekleştirildiği bazı çalışmalarda mevcuttur [12], [13]. Spektrum verimliliğini en st düzeye çıkarmak için kaynak tahsisinin ele alınması önemli bir konudur. Hücre başına programlanması gereken kullanıcı sayısının belirlenmesi çok hücreli sistemler için cevaplandırılmış bir nokta değildir. Literatüre genel olarak bakıldığında tek hücreli sistemler için bu konuda bazı çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmalardan biri [122]'dir. Burada genel olarak sabit kullanıcı sayısı ile işlemler gerçekleştirilmiş olsa da sembol sayısına göre belirli bir anten sayısında kullanıcı sayısının optimum alabileceği değerler hesaplanmıştır. Bu bölümün ana konusu, “ok kullanıcılı MIMO bir sistemin sıfırdan, maksimum spektrum verimliliğine sahip belirli bir alanı düzgün bir şekilde kapatacak şekilde tasarlandığı varsayıldığında ideal anten sayısı ve ideal aktif kullanıcı sayısı nedir?” sorusunun cevaplanmasıdır.

Masif MIMO'nun yerine noktadan noktaya MIMO'nun kullanıldığı çalışmaların fiziksel olarak gerçekçi modellerle teorik olarak adlandırılan modeller arasında bir çelişki ortaya koyduğu belirtilmektedir [119]. Fakat tezin bu kısmında, çok kullanıcılı MIMO

sistemlerinde ise uçbirimler rastgele dağıtılmış olacaktır. Burada, altıgen hücrelerden oluşan bir hücresel sistem düşünülmektedir. TDD senaryosu ve ortogonal frekans bölmeli çoğullama (OFDM) dikkate alınacak olup baz istasyonundaki anten sayısı M kadardır, burada M 'nin sonsuz sayıda olduğu varsayılmaktadır. Her bir baz istasyonu ise K kadar uçbirime hizmet etmektedir. Baz istasyonu da uçbirimler de kanal hakkında bilgi sahibi değildir. Dolayısıyla CSI belirli bir sürede tutarlılık aralığında elde edilmektedir. Bir hücre içerisinde bulunan her bir uçbirime ortogonal pilot dizileri tahsis edilmektedir. Bunlar pilot yeniden kullanım faktörlerine göre diğer hücrelerde yeniden kullanılabilir. Baz istasyonu ise alınan pilot dizileri sayesinde kendine ait kanal bilgisini hesaplamaktadır. Buradaki pilot dizileri diğer hücreler yüzünden bozulmaya uğramış olabilirler. Fakat hücreler arasında herhangi bir bilgi paylaşma durumu söz konusu değildir. Yukarı bağlantıda doğrusal sinyal sezme yöntemleri kullanılmaktadır. Aşağı bağlantıda ise alınan anten sinyalleri ön kodlama yöntemleri ile birleştirilmektedir.

6.2. SİSTEM MODELİ

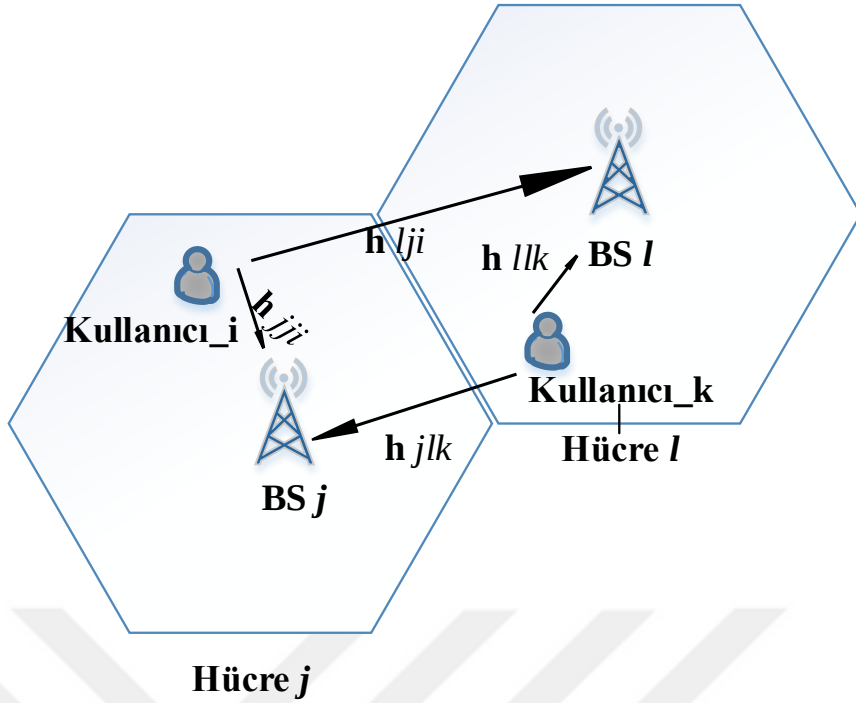
Düşünülen sistem modeli hücresel bir ağ topolojisidir. L hücre sayısı olarak ifade edilmektedir. Hücrelerdeki baz istasyonu M sayıda anten dizisine sahiptir. Bu baz istasyonları K tek antenli uçbirimlerle iletişim halindedir. Uçbirimlerin aktif olan alt birimleri $k \in \{1, \dots, K\}$ şeklinde ifade edilmektedir. Herhangi bir l hücresindeki kullanıcı k 'nın yerleştiği bölge $\mathbf{z}_{lk} \in \mathbb{R}^2$ olarak düşünülmektedir. Bu şekilde ifade edilmesinin temel nedeni, kullanıcıların farklı yerleşimlerinin dikkate alınmasıdır. Zaman-frekans kaynakları bakımından tutarlılık süresi T_c sn ve tutarlılık bant genişliği W_c Hz önemli değişkenlerdir [122]. $S = T_c \times W_c$ ile iletim sembolleri hesaplanmaktadır. Burada T_c 'nin tüm kullanıcıların tutarlılık süresinden küçük, W_c 'nin ise tüm kullanıcıların tutarlılık bant genişliğinden küçük olduğu belirtilmektedir [123]. Çerçeve yapısını içeren zaman-frekans bloğu Şekil 6.1'deki gibi gösterilmiştir [122].



Şekil 6.1. Çerçeve yapısı.

Veri iletimi $S = T_c \times W_c$ sembollerinin bloklarına bölünmüştür. B sembolleri pilot iletiminde kullanılmıştır. Geriye kalan S-B sembolleri ise veri yükleri için kullanılmıştır. Masif MIMO’da, yukarı bağlantı pilot iletimi, yukarı bağlantı yük taşıma iletimi ve aşağı bağlantı iletimi gibi bütün faaliyetler tutarlılık aralığında gerçekleşmektedir. Bu tutarlılık aralığıyla alakalı olarak bazı temsili değerler [124]’te yer almaktadır.

Şekil 6.2’deki gibi bir hücreli sistemde $\mathbf{h}_{jlk} \in \mathbb{C}^{N \times 1}$, kanal katsayıları vektörünü göstermektedir. Burada l, j ve k sırasıyla hücreyi, BS ve kullanıcıyı ifade etmektedir [123].



Şekil 6.2. Hücresel ağ.

Kanal katsayıları sıfır ortalamalı karmaşık Gauss vektörleridir ve Denklem (6.1)'deki gibi ifade edilmektedir.

$$\mathbf{h}_{jlk} \sim \mathcal{CN}(\mathbf{0}, d_j(\mathbf{z}_{lk})\mathbf{I}_M) \quad (6.1)$$

Burada, $d_j(\mathbf{z})$ yol kayıplarını ve gölgeleme etkilerini ifade eden kanal varyansı olarak ifade edilmiştir. Bu varyans BS j ile $\mathbf{z}$ konumundaki herhangi bir kullanıcı arasındaki uzaklığa bağlı kayıplardır. Dolayısıyla $d_j(\mathbf{z}_{lk})$ değerinin baz istasyonu tarafından bilindiği varsayılmaktadır. Fakat diğer çalışmalardan farklı olarak $\mathbf{z}_{lk}$ konumları bilinmemektedir. $M \times M$ birim matrisi $\mathbf{I}_M$ ile ifade edilirken, karmaşık sayıların kümesi $\mathcal{C}$ ile belirtilmektedir.

Masif MIMO sisteminde TDD işlemi düşünülmektedir. Bunun en önemli sebeplerinden biri TDD'deki kanal karşılıklılığıdır [125]. Kanal karşılıklılığı ters kanal matrisinin ileri kanal matrisinin transpozisyonuna eşit olmasıdır [126]. Böylece baz istasyonunun, yukarı bağlantı pilot sinyallerini tahmin ederek aşağı bağlantı kanal durum bilgisini elde edeceği varsayılmaktadır. Sadece yukarı bağlantı kanal ölçümleri ile yukarı ve aşağı bağlantı sinyallerinin işlemleri gerçekleştirilebilmektedir. Bu özelliklerden dolayı masif MIMO'da TDD senaryosu ön plandadır.

6.2.1. Yukarı Bağlantı

Baz istasyonlarında yukarı bağlantı pilotlarının kullanılmasıyla birlikte aşağı bağlantı kanallarının tahmini gerçekleştirilmektedir. Bu işlemler sırasında tüm kullanıcılar yukarı bağlantı verisini baz istasyonlarına gönderirler. Dolayısıyla baz istasyonu j 'de alınan yukarı bağlantı sinyali [4], [127] ve [128]'deki çalışmalara benzer şekilde Denklem (6.2)'deki gibi ifade edilmektedir.

$$\mathbf{y}_j = \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^K \sqrt{p_{lk}} \mathbf{h}_{jlk} x_{lk} + \mathbf{n}_j \quad (6.2)$$

Burada, $\mathbf{h}_{jlk}$ kanal katsayıları vektörü, x_{lk} l hücresindeki k kullanıcısı tarafından iletilen sembolü, p_{lk} yukarı bağlantı iletim gücünü ve $\mathbf{n}_j$ ise gürültü vektörünü temsil etmektedir.

6.2.2. Aşağı Bağlantı

Hücre j 'deki k kullanıcısında alınan sinyal [64]'teki çalışmaya benzer şekilde Denklem (6.3)'teki gibi ifade edilmektedir.

$$z_{jk} = \sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^K \mathbf{h}_{ljk}^T \mathbf{w}_{lm} s_{lm} + \mathbf{n}_j \quad (6.3)$$

Burada, s_{lm} l hücresindeki m kullanıcısına gönderilen sembolüdür. $\mathbf{w}_{lm}$ ön kodlama vektörüdür. $(.)^T$ ise transpoz olarak temsil edilmektedir.

6.3. KANAL TAHMİNİ

Baz istasyonunda sahip olduğu çok sayıdaki antenler aracılığıyla yukarı bağlantı ve aşağı bağlantı işlemleri ile birlikte çeşitli kazanımlar gerçekleştirebilir. Bunun için baz istasyonunun kanallar hakkında bazı bilgileri bilmesi gerekmektedir. CSI olarak adlandırılan $\sqrt{p_{lk}} \mathbf{h}_{jlk}$, bu bilgilerden birisidir. Çok hücreli sistemler için CSI elde edilmesi hücreler arası girişimden dolayı kolay değildir. Bu girişim pilot kirliliği olarak belirtilmektedir.

Pilot kirliliği probleminin tüm hücrelerde aynı ortogonal pilot dizisinin kullanılmasından kaynaklı olduğu anlaşılmıştır [64]. Bu çalışmada ise her bir hücrenin aynı pilot dizilerini kullanması yerine pilotların farklı alt kümelerini kullanması düşünülmektedir. Pilot sinyalleri $\mathbf{v}$ vektörü ile temsil edilmektedir. Kullanıcı k tarafından hücre l 'de iletilen pilot sinyali $\mathbf{v}_{i_{lk}}$ ile gösterilir, $i_{lk} \in \{1, \dots, B\}$ pilot dizinleridir. Denklem (6.4)'ün yukarı

bağlantı sistem modelinde bu pilot sinyallerin B sembolleri üzerinden iletilmesiyle, BS j 'de toplu olarak alınan yukarı bağlantı sinyali $\mathbf{Y}_j \in \mathbb{C}^{M \times B}$ olarak gösterilmektedir. Böylece Denklem (6.2) yeniden yazılarak Denklem (6.4) elde edilmiştir.

$$\mathbf{Y}_j = \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^K \sqrt{p_{lk}} \mathbf{h}_{jlk} \mathbf{v}_{i_{lk}}^T + \mathbf{N}_j \quad (6.4)$$

Burada $\mathbf{N}_j \in \mathbb{C}^{M \times B}$, pilot sinyali sırasındaki alıcıdaki ek gürültüyü içermektedir.

Masif MIMO'da kanal tahmini için MMSE çok yaygın olarak kullanılmaktadır [64]. Bu çalışmada da bu yöntemle kanal tahmini işlemleri gerçekleştirilecektir. Denklem (6.4) aracılığıyla MMSE ile kanal tahmini düşünülmektedir. Kanal tahmini [129]'a benzer şekilde aşağıdaki gibi elde edilebilmektedir.

$$\hat{\mathbf{h}}_{jlk}^{MMSE} = \frac{d_j(\mathbf{z}_{lk})}{d_l(\mathbf{z}_{lk})} \mathbf{Y}_j (\boldsymbol{\varphi}_j)^{-1} \mathbf{v}_{i_{lk}} \quad (6.5)$$

Burada, $\boldsymbol{\varphi}_j$ kovaryans matrisi olarak tanımlanmakta olup aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$\boldsymbol{\varphi}_j = \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^K \frac{d_j(\mathbf{z}_{lm})}{d_l(\mathbf{z}_{lm})} \mathbf{v}_{i_{lm}} \mathbf{v}_{i_{lm}}^H + \sigma^2 \mathbf{I}_B \quad (6.6)$$

Burada $(.)^H$ eşlenik transpoz (Hermitian) temsil etmektedir. Kanal tahmin hatası [130]'daki gibi Denklem (6.7) olarak verilmiştir.

$$\tilde{\mathbf{h}}_{jlk}^{MMSE} = \mathbf{h}_{jlk} - \hat{\mathbf{h}}_{jlk}^{MMSE} \quad (6.7)$$

Kanal tahmin hatasının kovaryans matrisinin beklenen değer ifadesi ise şöyledir:

$$\begin{aligned} \mathbf{C}_{jlk}^{MMSE} &= \mathbb{E} \{ (\tilde{\mathbf{h}}_{jlk}^{MMSE}) (\tilde{\mathbf{h}}_{jlk}^{MMSE})^H \} = \mathbb{E} \{ (\mathbf{h}_{jlk} - \hat{\mathbf{h}}_{jlk}^{MMSE}) (\mathbf{h}_{jlk} - \hat{\mathbf{h}}_{jlk}^{MMSE})^H \} \\ &= \mathbb{E} \{ (\mathbf{h}_{jlk} \mathbf{h}_{jlk}^H) \} - \mathbb{E} \{ \hat{\mathbf{h}}_{jlk}^{MMSE} (\hat{\mathbf{h}}_{jlk}^{MMSE})^H \} \end{aligned} \quad (6.8)$$

Burada $\mathbb{E} \{ (\mathbf{h}_{jlk} \mathbf{h}_{jlk}^H) \} = \frac{d_j(\mathbf{z}_{lk})}{d_l(\mathbf{z}_{lk})} \mathbf{I}_M$ olarak ifade edilmektedir.

Dolayısıyla kanal tahmin hatasının kovaryansı

$$\mathbf{C}_{jlk}^{MMSE} = \frac{d_j(\mathbf{z}_{lk})}{d_l(\mathbf{z}_{lk})} \left(1 - \rho \frac{d_j(\mathbf{z}_{lk})}{d_l(\mathbf{z}_{lk})} \mathbf{v}_{ilm}(\boldsymbol{\varphi}_j)^{-1} \mathbf{v}_{ilm}^H \right) \mathbf{I}_M \quad (6.9)$$

olarak yazılır. Bu ifadenin sadeleştirilmesi [129], [131] ve [132] yardımıyla şu şekilde gerçekleştirilir:

$$\mathbf{v}_{ilm}(\boldsymbol{\varphi}_j)^{-1} = \frac{1}{\sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^K \frac{d_j(\mathbf{z}_{lm})}{d_l(\mathbf{z}_{lm})} \mathbf{v}_{ilm} \mathbf{v}_{ilm}^H + \sigma^2} \mathbf{v}_{ilm} \quad (6.10)$$

$$\mathbf{C}_{jlk}^{MMSE} = \rho \frac{d_j(\mathbf{z}_{lk})}{d_l(\mathbf{z}_{lk})} \left(1 - \frac{\frac{d_j(\mathbf{z}_{lk})}{d_l(\mathbf{z}_{lk})}^B}{\sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^K \frac{d_j(\mathbf{z}_{lm})}{d_l(\mathbf{z}_{lm})} \mathbf{v}_{ilm} \mathbf{v}_{ilm}^H + \frac{\sigma^2}{\rho}} \right) \mathbf{I}_M \quad (6.11)$$

Denklem (6.11)'de verilen kovaryans ifadesi, hataların sinyal gürültü oranı (SNR) ve aynı pilot sinyali kullanan kullanıcılara bağlı olduğunu göstermektedir [54]. Burada $\text{SNR} \frac{\sigma^2}{\rho}$ olarak tanımlanmaktadır. Aynı pilot sinyali kullanan kullanıcıların ifadesi ise $\mathbf{v}_{ilm} \mathbf{v}_{ilk}^H$ 'nin sıfır olmaması demektir. $\frac{d_j(\mathbf{z}_{lm})}{d_l(\mathbf{z}_{lm})}$ ifadesi l hücresindeki m kullanıcılarından baz istasyonu j 'de alınan girişimi nitelendirmektedir. Bu girişim 0-1 arasında bir değer olarak düşünüldüğünde, hücre kenarlarında en yüksektir. Hücre l olarak dikkate alındığında, bu hücre baz istasyonundan ne kadar uzaksa girişim o kadar düşüktür [54].

6.4. SPEKTRUM VERİMLİLİĞİ

Bu bölümde, SINR'nin kapalı form ifadeleri elde edilerek buna bağlı genel bir spektrum verimliliği ifadesi oluşturulmuştur. Genel bir spektrum verimliliği ifadesi oluşturulurken dikkat edilen nokta kapasitedir. Burada j hücresindeki k kullanıcısı için; B sistemdeki pilot dizisini, S ise iletim sembollerini göstermek üzere spektrum verimliliğin ulaşılabilir kapasitesi [133]'teki çalışmaya benzer şekilde aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$R_{jk} = \left(1 - \frac{B}{S} \right) \{ \log_2(1 + \text{SINR}_{jk}) \} [\text{bit} / \text{s} / \text{Hz}] \quad (6.12)$$

6.4.1. Yukarı Bağlantı için Spektrum Verimliliği

Kullanıcılardan gelen sinyallerin BS'de düzgün bir şekilde tespit edilmesiyle birlikte kanal tahminleri gerçekleştirilmektedir. Bu işlemler gerçekleştirilirken BS'de bazı sezme

teknikleri kullanılmaktadır. Bunlar sayesinde ilgili kullanıcının sinyalleri diğer kullanıcılardan gelen parazitlikten ayrılmaktadır. Burada daha önce bahsedilmiş olan MRC ve ZF üzerinde durulmuştur. MRC ve ZF'ye göre ilgili SINR ifadeleri hesaplanarak ve buna bağlı olarak spektrum verimliliği denklemleri oluşturulmuştur.

Her bir hücre için yukarı bağlantı spektrum verimliliği ifadesi aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$SE_{jk}^{ul} = K \left(1 - \frac{B}{S}\right) \{\log_2(1 + SINR_{jk})\} [bit / s / Hz] \quad (6.13)$$

Kanal tahmini gerçekleştirildikten sonra, Denklem (6.2)'deki iletilen sinyalin uygun bir $\mathbf{v}$ sezme vektörü ile tespit edilmesi aşağıdaki gibi gerçekleştirilmektedir.

$$\begin{aligned} \hat{x}_{jk} = \mathbf{v}_{jk}^H \mathbf{y}_j &= \sqrt{p_{jk}} \mathbf{v}_{jk}^H \mathbf{h}_{jk} x_{jk} + \sqrt{p_{jk}} \sum_{m=1, m \neq k}^K \mathbf{v}_{jk}^H \mathbf{h}_{jk} x_{jk} \\ &+ \sqrt{p_{lm}} \sum_{l=1, l \neq j}^L \sum_{m=1}^K \mathbf{v}_{jk}^H \mathbf{h}_{lm} x_{lm} + \mathbf{v}_{jk}^H \mathbf{n}_j \end{aligned} \quad (6.14)$$

Burada, birinci terim istenilen sinyali, ikinci ve üçüncü terim sırasıyla hücre içi girişimi ve hücreler arası girişimi, son terim gürültüyü temsil etmektedir. Denklem (6.2)'de belirtilmiş olan alınan yukarı bağlantı sinyal vektörü, [50]'deki çıkarımdan yararlanılarak alınan yukarı bağlantı sembolü olarak aşağıdaki gibi yeniden yazılabilmektedir.

$$\begin{aligned} y_{jk} &= \mathbb{E}[\mathbf{v}_{jk}^H \mathbf{h}_{jk}] \sqrt{p_{jk}} x_{jk} + (\mathbf{v}_{jk}^H \mathbf{h}_{jk} - \mathbb{E}[\mathbf{v}_{jk}^H \mathbf{h}_{jk}]) \sqrt{p_{jk}} x_{jk} \\ &+ \sqrt{p_{jk}} \sum_{m \neq k} \mathbf{v}_{jk}^H \mathbf{h}_{jk} x_{jk} + \underbrace{\sqrt{p_{lm}} \sum_{(l,m) \neq (j,k)} \mathbf{v}_{jk}^H \mathbf{h}_{jm} x_{jm}} + \mathbf{v}_{jk}^H \mathbf{n}_j \end{aligned} \quad (6.15)$$

Burada, $[\mathbf{v}_{jk}^H \mathbf{h}_{jk}]^2$ kanal kazancıdır. Bu kanal kazancının varyansı ise $\text{var}[\mathbf{v}_{jk}^H \mathbf{h}_{jk}] = \mathbb{E}[\mathbf{v}_{jk}^H \mathbf{h}_{jk} - \mathbb{E}[\mathbf{v}_{jk}^H \mathbf{h}_{jk}]]^2 = \mathbb{E}[\mathbf{v}_{jk}^H \mathbf{h}_{jk}]^2 - |\mathbb{E}[\mathbf{v}_{jk}^H \mathbf{h}_{jk}]|^2$ olarak hesaplanmaktadır.

Son olarak girişim gücü $\sum_{(l,m) \neq (j,k)} \mathbb{E}[\mathbf{v}_{jk}^H \mathbf{h}_{jm}]^2 = \sum_{l,k} \mathbb{E}[\mathbf{v}_{jk}^H \mathbf{h}_{jm}]^2 - \mathbb{E}[\mathbf{v}_{jk}^H \mathbf{h}_{jk}]^2$

şeklinde. Ayrıca tüm bu değerlerin bilindiği varsayılmaktadır. SINR ifadesi alınan sinyal gücünün girişim gücü ile gürültü toplamına oranı olarak ifade edildiği bilinmektedir [134]. Böylece SINR ifadesi aşağıdaki gibi yazılır:

$$SINR_{jk}^{ul} = \frac{p_{jk} |\mathbb{E}[\mathbf{v}_{jk}^H \mathbf{h}_{jk}]|^2}{\sum_{j=1}^L \sum_{m=1}^K p_{lm} \mathbb{E} [|\mathbf{v}_{jk}^H \mathbf{h}_{jm}|^2] - (p_{jk} |\mathbb{E}[\mathbf{v}_{jk}^H \mathbf{h}_{jk}]|^2 + \sigma^2 \mathbb{E} [\|\mathbf{v}_{jk}\|^2])} \quad (6.16)$$

Burada $p_{jk} |\mathbb{E}[\mathbf{v}_{jk}^H \mathbf{h}_{jk}]|^2$ istenilen sinyalin gücüdür, $\sum_{j=1}^L \sum_{m=1}^K p_{lm} \mathbb{E} [|\mathbf{v}_{jk}^H \mathbf{h}_{jm}|^2]$ çok kullanıcı girişimi temsil eder, $p_{jk} |\mathbb{E}[\mathbf{v}_{jk}^H \mathbf{h}_{jk}]|^2$ hücre içi girişimdir ve son olarak $\sigma^2 \mathbb{E} [\|\mathbf{v}_{jk}\|^2]$ toplam gürültü gücüdür. Dolayısıyla, Denklem (6.13)'te verilen spektrum verimliliğın sezme tekniklerine bağılı olduğı anlaşılmaktadır. Denklem (6.16)'daki beklenen değeri hesaplamak için daha önce bahsedilmiş olan sezme teknikleri ile SINR ifadeleri yeniden yazılmaktadır [135].

6.4.1.1. Maksimum Oran Birleştirme (MRC)

MRC, [5]'te belirtildiğı gibi $\mathbf{V} = \hat{\mathbf{H}}$ olarak tanımlanmaktadır. Burada $\mathbf{V}$ sezme matrisi olup $\hat{\mathbf{H}}$ kanal tahminin matrisidir. Bu tanım göz önüne alındığında Denklem (6.16), Denklem (6.17) olarak yeniden yazılmaktadır [67].

$$SINR_{jk}^{ul} = \frac{p_{jk} |\mathbb{E}[\hat{\mathbf{h}}_{jk}^H \mathbf{h}_{jk}]|^2}{\sum_{j=1}^L \sum_{m=1}^K p_{lm} \mathbb{E} [|\hat{\mathbf{h}}_{jk}^H \mathbf{h}_{jm}|^2] - p_{jk} |\mathbb{E}[\hat{\mathbf{h}}_{jk}^H \mathbf{h}_{jk}]|^2 + \sigma^2 \mathbb{E} [\|\hat{\mathbf{h}}_{jk}\|^2]} \quad (6.17)$$

Yukarıdaki ifadedeki beklenen değeri hesaplanması aşağıdaki gibi olmaktadır. $V\{\cdot\}$ varyansı simgelemektedir [67].

$$p_{jk} |\mathbb{E}[\hat{\mathbf{h}}_{jk}^H \mathbf{h}_{jk}]|^2 = M^2 p_{jk} (V\{\hat{\mathbf{h}}_{jk}\})^2 \quad (6.18)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^L \sum_{m=1}^K p_{lm} \mathbb{E} [|\hat{\mathbf{h}}_{jk}^H \mathbf{h}_{jm}|^2] - p_{jk} |\mathbb{E}[\hat{\mathbf{h}}_{jk}^H \mathbf{h}_{jk}]|^2 + \sigma^2 \mathbb{E} [\|\hat{\mathbf{h}}_{jk}\|^2] = \\ & \sum_j p_{lk} \mathbb{E} [|\hat{\mathbf{h}}_{jk}^H \mathbf{h}_{lk}|^2] + \sum_j \sum_{m=1, m \neq k} p_{lm} \mathbb{E} [|\hat{\mathbf{h}}_{jk}^H \mathbf{h}_{lm}|^2] + \\ & \sum_{m=k} p_{lm} \mathbb{E} [|\hat{\mathbf{h}}_{jk}^H \mathbf{h}_{lm}|^2] - p_{jk} |\mathbb{E}[\hat{\mathbf{h}}_{jk}^H \mathbf{h}_{jk}]|^2 + \sigma^2 \mathbb{E} [\|\hat{\mathbf{h}}_{jk}\|^2] = \\ & M^2 V\{\hat{\mathbf{h}}_{jk}\} \sum_j p_{lm} V\{\hat{\mathbf{h}}_{lk}\} + M V\{\hat{\mathbf{h}}_{jk}\} \sum_{m=1} p_{lm} V\{\hat{\mathbf{h}}_{lk}\} + \\ & M V\{\hat{\mathbf{h}}_{jk}\} \sum_{m=1} p_{lm} V\{\hat{\mathbf{h}}_{lk}\} + M V\{\hat{\mathbf{h}}_{jk}\} \sigma^2 \end{aligned} \quad (6.19)$$

Dolayısıyla SINR ifadesi MRC sezme ile sadeleştirilerek Denklem (6.20)'deki gibi yeniden yazılabilir [67].

$$SINR_{jk}^{MRC,ul} = \frac{Mp_{jk}V\{\hat{\mathbf{h}}_{jkm}\}}{\sum_j p_{lm}V\{\hat{\mathbf{h}}_{lkm}\} + \sum_{m=1} p_{lm}V\{\hat{\mathbf{h}}_{lkm}\} + \sigma^2} \quad (6.20)$$

6.4.1.2. Sıfıra Zorlama (ZF)

ZF, [5]'te belirtildiği gibi $\mathbf{V} = \hat{\mathbf{H}}(\hat{\mathbf{H}}^H \hat{\mathbf{H}})^{-1}$ olarak tanımlanmaktadır. Buradaki asıl amaç hücre içi girişimleri en aza indirmeye çalışmaktır. ZF durumunda ters kanal yapısından dolayı $\mathbb{E}[\mathbf{v}_{jk}^H \mathbf{h}_{jk}] = 1$ 'dir. Gürültü teriminin hesabı ise aşağıdaki gibidir.

$$\sigma^2 \mathbb{E}[\|\mathbf{v}_{jk}\|^2] = \frac{\sigma^2}{(M-K)V\{\hat{\mathbf{h}}_{jkm}\}} \quad (6.21)$$

Bu hesaplamaların ardından ZF için SINR ifadesi Denklem (6.22)'deki gibi türetilmektedir [67].

$$SINR_{jk}^{ZF,ul} = \frac{p_{jk}}{\sum_{j=1}^L \sum_{m=1}^K p_{lm} \mathbb{E}[\|\hat{\mathbf{v}}_{jk}^H \mathbf{h}_{jm}\|^2] - p_{jk} + \frac{\sigma^2}{(M-K)V\{\hat{\mathbf{h}}_{jkm}\}}} \quad (6.22)$$

6.4.2. Aşağı Bağlantı için Spektrum Verimliliği

Bu kısımda, yukarı bağlantıdaki hesaplamaların masif MIMO aşağı bağlantı sistemi düşünüldüğünde elde edilen ifadeleri gerçekleştirilmiştir. $\mathbf{x}_l \in \mathcal{C}^M$ BS l 'de iletilen sinyal vektörü, $\mathbf{w}_{lm} \in \mathcal{C}^M$ ön kodlama vektörü ile aşağıdaki gibi hesaplanabilmektedir [4].

$$\mathbf{x}_l = \sum_{m=1}^K \sqrt{p_{lm}} \mathbf{w}_{lm} s_{lm} \quad (6.23)$$

Burada $s_{l,m}$ l hücresindeki m kullanıcısı için yük sembolünü belirtmektedir ve $\mathbb{E}[|s_{lm}|^2] = 1$ 'dir. p_{lm} ise m kullanıcısına ait verici gücüdür. Hücre j 'deki kullanıcı m 'de alınan y_{jm} sinyali aşağıdaki gibi ifade edilmektedir [4].

$$y_{jm} = \sum_{l=1}^L \mathbf{h}_{ljm}^H \mathbf{x}_l + n_{jm} \quad (6.24)$$

Burada $\mathbf{h}_{ljm}$ kanal vektörüdür, n_{jm} σ^2 varyanslı gürültüdür. Denklem (6.24), Denklem (6.23) kullanılarak aşağıdaki gibi genişletilmektedir.

$$y_{jm} = \sqrt{p_{lk}} \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^K \mathbf{h}_{ljm}^H \mathbf{w}_{lk} s_{lk} + n_{jm} \quad (6.25)$$

Bu ifade [92]'ye benzer şekilde aşağıdaki gibi yeniden yazılmaktadır.

$$y_{jm} = \sqrt{p_{jm}} s_{jm} \mathbb{E}[\mathbf{h}_{jjm}^H \mathbf{w}_{jm}] + (\mathbf{h}_{jjm}^H \mathbf{w}_{jm} - \mathbb{E}[\mathbf{h}_{jjm}^H \mathbf{w}_{jm}]) \sqrt{p_{jm}} s_{jm} + \sqrt{p_{lk}} \sum_{l,k \neq j,m} \mathbf{h}_{ljm}^H \mathbf{w}_{lk} s_{lk} + n_{jm} \quad (6.26)$$

Burada $[\|\mathbf{h}_{jjm}^H \mathbf{w}_{jm}\|^2]$ kanal kazancının, bunun varyansının $\text{var}[\mathbf{h}_{jjm}^H \mathbf{w}_{jm}]$ ve girişim gücü $\sum_{l,k \neq j,m} \mathbb{E}[\|\mathbf{h}_{ljm}^H \mathbf{w}_{lk}\|^2]$ 'nin bilindiği varsayılmaktadır. SINR tanımı [136]'da aşağıdaki gibi belirtilmiştir. Bu tanımdan yola çıkılarak aşağı bağlantı için SINR Denklem (6.29)'daki gibi elde edilir [67].

$$SINR = \frac{\mathbb{E}[|Useful Signal|^2]}{\text{var}[Pilot Cont. Interf.] + \text{var}[Interf. plus Noise Terms]} \quad (6.27)$$

$$SINR_{jm} = \frac{p_{jm} |\mathbb{E}[\mathbf{h}_{jjm}^H \mathbf{w}_{jm}]|^2}{p_{jm} \text{var}[\mathbf{h}_{jjm}^H \mathbf{w}_{jm}] + p_{lk} \sum_{l,k \neq j,m} \mathbb{E}[\|\mathbf{h}_{ljm}^H \mathbf{w}_{lk}\|^2] + \sigma^2} \quad (6.28)$$

Dolayısıyla $\text{var}[\mathbf{h}_{jjm}^H \mathbf{w}_{jm}] = \mathbb{E}[\|\mathbf{h}_{jjm}^H \mathbf{w}_{jm}\|^2] - |\mathbb{E}[\mathbf{h}_{jjm}^H \mathbf{w}_{jm}]|^2$, $\sum_{l,k \neq j,m} \mathbb{E}[\|\mathbf{h}_{ljm}^H \mathbf{w}_{lk}\|^2] = \sum_{l,k} \mathbb{E}[\|\mathbf{h}_{ljm}^H \mathbf{w}_{lk}\|^2] - \mathbb{E}[\|\mathbf{h}_{jjm}^H \mathbf{w}_{jm}\|^2]$ olmak üzere SINR ifadesi aşağıdaki gibi oluşturulmaktadır.

$$SINR_{jm} = \frac{p_{jm} |\mathbb{E}[\mathbf{h}_{jjm}^H \mathbf{w}_{jm}]|^2}{p_{jm} \sum_{l,k} \mathbb{E}[\|\mathbf{h}_{ljm}^H \mathbf{w}_{lk}\|^2] - p_{lk} |\mathbb{E}[\mathbf{h}_{jjm}^H \mathbf{w}_{jm}]|^2 + \sigma^2} \quad (6.29)$$

Görüldüğü üzere SINR kanal vektörüne ve ön kodlama vektörüne bağlıdır. Dolayısıyla sinyal kazancının yüksek, hücre içi ve hücrelerarası girişimin düşük olması için ön kodlama vektörünün iyi seçilmesi gerekmektedir [50].

6.5. SPEKTRUM VERİMLİLİĞİ DENKLEMLERİNİN ELDE EDİLMESİ

Bu bölümde, spektrum verimliliği için gerekli denklemlerin elde edilmesi gerçekleştirilmiştir. Denklemler, kullanıcıların farklı yerleşimlerine göre türetilmiştir. Kullanıcıların farklı yerleşimleri düşünüldüğünden dolayı spektrum verimliliğin kapalı form ifadeleri oluşturulurken dikkate alınan üç farklı girişim seviyeleri aşağıdaki gibi açıklanmıştır. Ayrıca spektrum verimliliği denklemleri için bu üç farklı girişim seviyelerine göre düşünülen işleme şemalarının ifadeleri de aşağıda yer almaktadır. Bu ortamların girişim seviyelerine göre belirlendiği benzer çalışmalar [54], [137] ve [138]'teki gibidir. Bu çalışmalardan elde edilen değerlendirmelerden de görüldüğü üzere yayılım ortamlarının belirlenmesinde girişimlerin etkinliği göze çarpmaktadır. Aşağıdaki verilmiş olan yayılım ortamların değerlendirilmesi de benzer çıkarımlar neticesinde elde edilmiştir.

6.5.1. Kırsal Bölge Yayılım Ortamı

Bu durum aslında ideal bir ortam kavramını simgelemektedir. Yani, çok hücreli bir sistem içerisinde belirli bir hücre göz önüne alındığında diğer hücrelerdeki kullanıcılar BS'den çok uzaktadırlar. Dolayısıyla herhangi bir girişim söz konusu değildir. Fakat bu durum neredeyse imkânsızdır. Ama teorik olarak karşılaştırma açısından belirtilmektedir.

6.5.2. Kasaba Bölgesi Yayılım Ortamı

Tüm hücrelerdeki kullanıcıların benzer, birbirine yakın konumlarının olduğu varsayımı altında ortalamalarının dikkate alındığı bir girişim seviyesidir. Düşünülen sistem için en uygun seviyenin bu olacağı tahmin edilmektedir.

6.5.3. Şehir Bölgesi Yayılım Ortamı

Bu durum kırsal bölge ortamındaki tanımındaki mantığa benzer şekilde karşılaşılabilecek en kötü girişimi temsil etmektedir. Diğer hücrelerdeki kullanıcıların BS'ye en yakın olduğu durumları simgelemektedir. En ideal durum ile en kötü durum gösterilerek objektif bir karşılaştırmanın yapılması amaçlanmaktadır.

Çok hücreli bir yapı düşünüldüğünden dolayı oluşacak olan yukarıdaki girişim seviyelerini ifade etmesi açısından bir girişim seviyesi denklemi oluşturulmalıdır. Burada dikkat edilecek nokta bir hücre için düşünüldüğünde diğer hücrelerdeki baz istasyonlarıyla olan ilişkidir. Aşağıdaki denklem girişim seviyesini belirtmektedir.

$$\alpha_{toplam} = 1 + (\text{hücre sayısı}) \left(\sum \alpha_{jl_{ortam}} - 1 \right) \quad (6.30)$$

Burada l hücresindeki herhangi bir kullanıcı için baz istasyonu j 'deki kanal varyansının baz istasyonu l 'deki kanal varyansına oranı α_{jl} olarak düşünülmüştür. Dolayısıyla bu ifade aşağıdaki gibi yazılabilmektedir [139].

$$\alpha_{jl_{ortam}} = \mathbb{E} \left\{ \left(\frac{|d_j(\mathbf{z})|}{|d_l(\mathbf{z}) + \mathbf{b}_j|} \right)^\kappa \right\} \quad (6.31)$$

Burada $\mathbf{z}$ ile kullanıcıların pozisyonları, $\mathbf{b}$ ile baz istasyonlarının konumları temsil edilmektedir. Bu konumların belirlenmesi ile alakalı detaylı ifadeler [140] ve [141]'den ulaşılabilir. κ ise yol kaybı üssü'dür. α_{jl} 'nin değeri yukarıda bahsedilen durumlara göre değişmektedir. Denklem (6.30)'daki temel mantık; bir tane merkez hücre kabul edildiğinden girişim vektöründeki her bir elemanın toplamından 1 çıkartılmış ve düşünülen hücre sayısı ile çarpılmıştır. Buradaki -1 ifadesi merkez hücrenin kaldırıldığını göstermektedir. Daha sonra ise bu merkez hücre +1 olarak eklenmiştir. Aşağıdaki varsayımda, birinci, ikinci ve üçüncü ortam olarak belirtilen durumlar için girişim seviyesinin hesaplanması belirtilmiştir.

$$\alpha_{jl_{KırsalOrt.}} = \min \mathbb{E} \left\{ \left(\frac{|d_j(\mathbf{z})|}{|d_l(\mathbf{z}) + \mathbf{b}_j|} \right)^\kappa \right\} \quad (6.32)$$

$$\alpha_{jl_{KasabaOrt.}} = \text{mean} \mathbb{E} \left\{ \left(\frac{|d_j(\mathbf{z})|}{|d_l(\mathbf{z}) + \mathbf{b}_j|} \right)^\kappa \right\} \quad (6.33)$$

$$\alpha_{jl_{ŞehirOrt.}} = \max \mathbb{E} \left\{ \left(\frac{|d_j(\mathbf{z})|}{|d_l(\mathbf{z}) + \mathbf{b}_j|} \right)^\kappa \right\} \quad (6.34)$$

Bu denklemlerden de görüleceği üzere belirli bir hücre göz önüne alındığında diğer hücrelerdeki kullanıcıların BS'den çok uzakta olduğu kırsal bölge yayılım ortamı için herhangi bir girişim söz konusu olmaması (ihmal edilecek seviyede az olması) Denklem (6.31)'de belirtilen ifadenin minimum değeri bulunarak belirlenmektedir. Benzer şekilde şehir bölgesi yayılım ortam için yani girişimlerin çok fazla olduğu durum için Denklem (6.31)'de belirtilen ifadenin maksimum değeri alınmıştır. Kasaba bölgesi yayılım ortamı

için ise bu ifadenin ortalama değeri kullanılmıştır. Böylece bu girişim seviyelerine göre önceki bölümde SINR değerlerine göre hesaplanan SE denklemleri MRC ve ZF göz önüne alınarak yeniden yazılacaktır. Bu işlemler gerçekleştirilirken yukarı bağlantı sistemi düşünülmüştür. Benzer yaklaşımlar yapılarak SE ifadeleri yukarı bağlantı için de gerçekleştirilebilir.

Denklem (6.16)'da verilen yukarı bağlantı sistemi için [9]'daki SINR ifadesi gerekçeleri ve [5]'teki MRC ve ZF yaklaşımları düşünülerek yukarıda bahsedilen girişim seviyelerinin durumu da göz önüne alınarak aşağıdaki gibi düzenlenmektedir [139].

$$SINR_{jk}^{MRC,ul} = \frac{B}{\left\{ \sum_l \left(\alpha_{jl_{ortam}}^{(2)} + \frac{(\alpha_{jl_{ortam}}^{(2)} - (\alpha_{jl_{ortam}}^{(1)})^2)}{M} \right) \right\} + \frac{\left(\sum_l \alpha_{jl_{ortam}}^{(1)} K + \frac{\sigma^2}{\rho} \right) \left(\sum_l \alpha_{jl_{ortam}}^{(1)} + \frac{\sigma^2}{B\rho} \right)}{M}} \quad (6.35)$$

$$SINR_{jk}^{ZF,ul} = \frac{B}{\left\{ \sum_l \left(\alpha_{jl_{ortam}}^{(2)} + \frac{(\alpha_{jl_{ortam}}^{(2)} - (\alpha_{jl_{ortam}}^{(1)})^2)}{M - K} \right) \right\} + \frac{\left(\sum_l \alpha_{jl_{ortam}}^{(1)} K \left(1 - \frac{\alpha_{jl_{ortam}}^{(1)}}{\sum_l \alpha_{jl_{ortam}}^{(1)} + \frac{\sigma^2}{B\rho}} \right) + \frac{\sigma^2}{\rho} \right) \left(\sum_l \alpha_{jl_{ortam}}^{(1)} + \frac{\sigma^2}{B\rho} \right)}{M}} \quad (6.36)$$

Burada B pilot iletimi için sinyal aralığını göstermektedir. M baz istasyonundaki anten sayısını, ρ tasarım parametresini belirtmektedir [142]. Yukarıda verilmiş olan denklemler girişim seviyelerinin de dâhil olduğu genel ifadeleri belirmektedir. Girişim seviyelerinin sonucuna göre işlem sonucu değişkenlik gösterip vurgulanan ortamlara göre değerler elde edilmektedir. Ayrıca bu ifadeler Denklem (6.13) ile verilmiş olan spektrum verimliliği denkleminde yerine yazıldığında her iki durum için aşağıdaki denklemler elde edilmektedir.

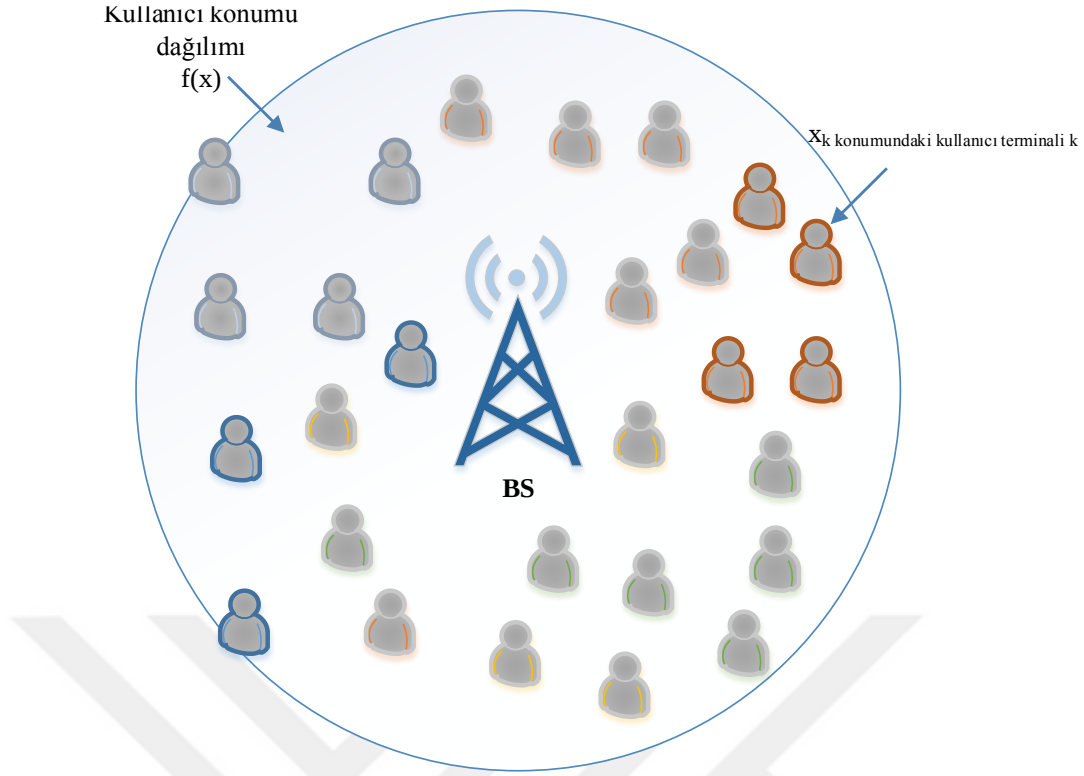
$$SE_{jk}^{MRC,ul} = K \left(1 - \frac{B}{S}\right) \left\{ \log_2 \left(1 + \frac{B}{\left\{ \Sigma_l \left(\alpha_{jl_{ortam}}^{(2)} + \frac{(\alpha_{jl_{ortam}}^{(2)} - (\alpha_{jl_{ortam}}^{(1)})^2}{M}) \right) \right\} + \frac{(\Sigma_l \alpha_{jl_{ortam}}^{(1)} K + \frac{\sigma^2}{\rho})(\Sigma_l \alpha_{jl_{ortam}}^{(1)} + \frac{\sigma^2}{B\rho})}{M}} \right) \right\} \quad (6.37)$$

$$SE_{jk}^{ZF,ul} = K \left(1 - \frac{B}{S}\right) \left\{ \log_2 \left(1 + \frac{B}{\left\{ \Sigma_l \left(\alpha_{jl_{ortam}}^{(2)} + \frac{(\alpha_{jl_{ortam}}^{(2)} - (\alpha_{jl_{ortam}}^{(1)})^2}{M-K}) \right) \right\} + \frac{(\Sigma_l \alpha_{jl_{ortam}}^{(1)} K \left(1 - \frac{\alpha_{jl_{ortam}}^{(1)}}{\Sigma_l \alpha_{jl_{ortam}}^{(1)} + \frac{\sigma^2}{B\rho}}\right) + \frac{\sigma^2}{\rho})(\Sigma_l \alpha_{jl_{ortam}}^{(1)} + \frac{\sigma^2}{B\rho})}{M}} \right) \right\} \quad (6.38)$$

6.5.4. Kullanıcı Konumlarının Belirlenmesi

Bu çalışmada kullanıcıların bir hücreye Şekil 6.3'teki gibi bir biçimli (uniform) olarak dağıldığı düşünülmüştür. Hücrenin yarıçapının r_{max} ve kullanıcılar ile BS arasındaki minumum mesafe d_{min} olarak belirlenmiştir. Herhangi bir k kullanıcısının yeri $x_k \in \mathbb{R}^2$ olarak gösterilmektedir. Bu, merkezde olduğu varsayılan BS'ye göre belirlenmektedir. Kullanıcı konumları [142]'deki gibi rastgele kullanıcı dağılımı $f(x)$ yoğunluk fonksiyonundan seçilmektedir.

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\pi(r_{max}^2 - d_{min}^2)}, & d_{min} \leq \|x\| \leq r_{max} \\ 0, & \text{diğer} \end{cases} \quad (6.39)$$



Şekil 6.3. Kullanıcı konumları dağılımı.

6.5.5. Spektrum Verimliliği Üst Sınırı

Yukarıda analizleri MRC ve ZF için yapılmış olan spektrum verimliliği denklemleri belirli bir anten sayısı ve kullanıcı terminali sayısı için gerçekleştirilebilmektedir. Bu bölüm baz istasyonundaki anten sayısının yani M 'nin sonsuza gittiği düşünüldüğünde elde edilecek sonuçların spektrum verimliliği için üst sınır olduğunu göstermektedir. Denklem (6.35) ve Denklem (6.36)'da yer alan SINR ifadelerindeki M 'nin sonsuza gittiği durum hesaba katılırsa spektrum verimliliği ifadesi aşağıdaki gibi tekrar yazılabilmektedir.

$$SE_{jk} = K \left(1 - \frac{B}{S} \right) \left\{ \log_2 \left(1 + \frac{1}{\sum_l (\alpha_{jl}^{(2)} \alpha_{ortam})} \right) \right\} \quad (6.40)$$

Burada elde edilen sonuç bu tezin ana katkılarından biridir. Çünkü bu üst sınır denklemi sayesinde bir sonraki bölümde ideal kullanıcı sayısının bulunması gerçekleştirilecektir. Nitekim belirtilmiş olan sistem modelinde ideal kullanıcı sayısının bulunması baz istasyonundaki anten sayısı M 'nin sonsuza gittiği durumda belirlenecektir. Aşağıdaki bölümde ideal kullanıcı sayısının tespit edilmesi için gerekli ifadeler ve sonuçlar

gösterilmektedir.

6.6. HER BİR HÜCREDEKİ İDEAL KULLANICI SAYISININ BELİRLENMESİ İÇİN BENZETİM SONUÇLARI

Bu bölümde analizleri yapılan spektrum verimliliği denkleminin benzetimi gerçekleştirilmiştir. Burada MRC ve ZF şemaları dikkate alınmıştır. Temel olarak M anten sayısı için tüm değerleri göz önünde bulundurarak ideal kullanıcı sayısı U bulunmaya çalışılmıştır. Ayrıca bu işlem yapılırken spektrum verimliliğinin maksimize edilmesi sağlanmıştır. Bu, pilot yeniden kullanım faktörü f dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Çizelge 6.1’de benzetim için kullanılan bazı parametreler gösterilmektedir. Bu tez çalışmasında parametreler Matlab ve Monte-Carlo benzetimi ile test edilmiştir. Bunlarla ilgili literatürdeki çalışmalarda bazı faydalı kodlar da bulunmaktadır. Tez çalışmasında da yararlanılan kodların bazıları [54]’te belirtilmiştir. Çizelge 6.1’deki parametreler genellikle [54], [141], [142] gibi çalışmalarda Massive MIMO sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Çizelge 6.1. Benzetimde kullanılan bazı parametreler.

Parametre	Değer
Tutarlılık Blok Uzunluğu, S	400
Tutarlılık Süresi	2 ms
Tutarlılık Bant Genişliği	200 kHz
$SNR, \frac{\sigma^2}{\rho}$	5 dB
Yol Kaybı Üssü, κ	3.8
Düşünülen Hücre Sayısı	6

Bazı pozitif tam sayı değerine sahip pilot yeniden kullanım faktörü f (örneğin 1, 3, 4, 7,...) için $B = fK$ denklemi söz konusudur [139]. Bu eşitlik Denklem (6.40)’taki yerine $B = fU$ olarak yazıldığında aşağıdaki ifade elde edilmiş olur.

$$SE_{jk} = U \left(1 - \frac{fU}{S} \right) \left\{ \log_2 \left(1 + \frac{1}{\sum_l (\alpha_{jl}^{(2)}(ortam))} \right) \right\} \quad (6.41)$$

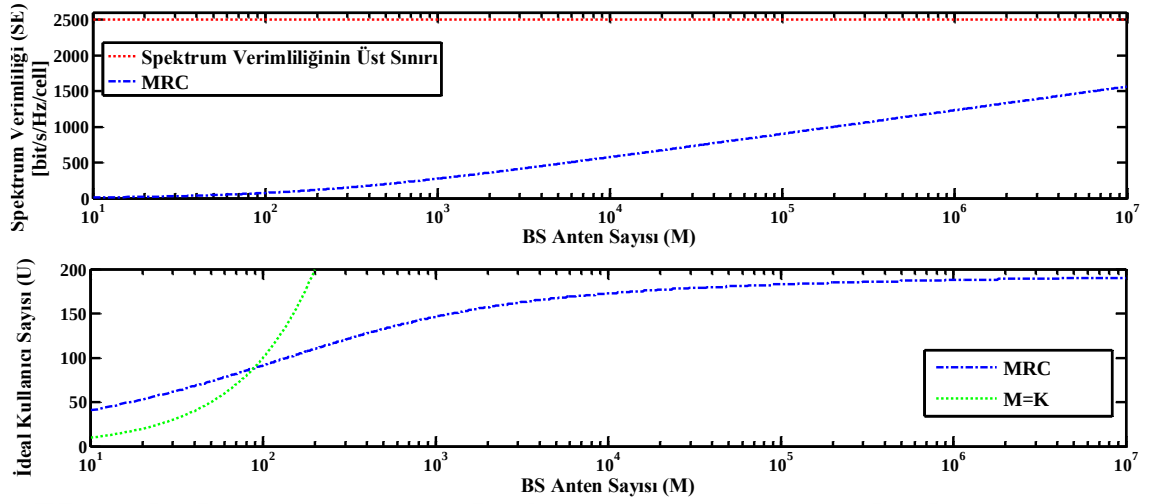
Bu ifadenin yani spektrum verimliliğın maksimum olacağı noktayı bulmak için gerekli analitik işlem gerçekleştirilirse ideal kullanıcı sayısının $U = \frac{S}{2f}$ olacağı görölmektedir. Şöyle ki tasarlanan sistem için ilgili yayılım ortamlarının modellenmesinden bağımsız olarak Denklem (6.41)'deki ifadede yer alan ideal kullanıcı sayısının belirlenmesi denklemdeki ifadenin ideal kullanıcı sayısı U 'ya göre türev işleminin gerçekleştirilerek maksimum değerin bulunmasıyla tespit edilebilmektedir. Dolayısıyla elde edilecek ideal kullanıcı sayısındaki spektrum verimliliğın hangi pilot yeniden kullanım faktörü için gerçekleştiğı de anlaşılacaktır. Bu nokta bu tezin diğeri bir ana katkılarındanır.

Aşağıdaki grafikler sırasıyla kırsal bölge yayılım ortamı, kasaba bölgesi yayılım ortamı ve şehir bölgesi yayılım ortamı olarak belirlenen durumlara göre elde edilen sonuçları göstermektedir.

6.6.1. Birinci Ortam

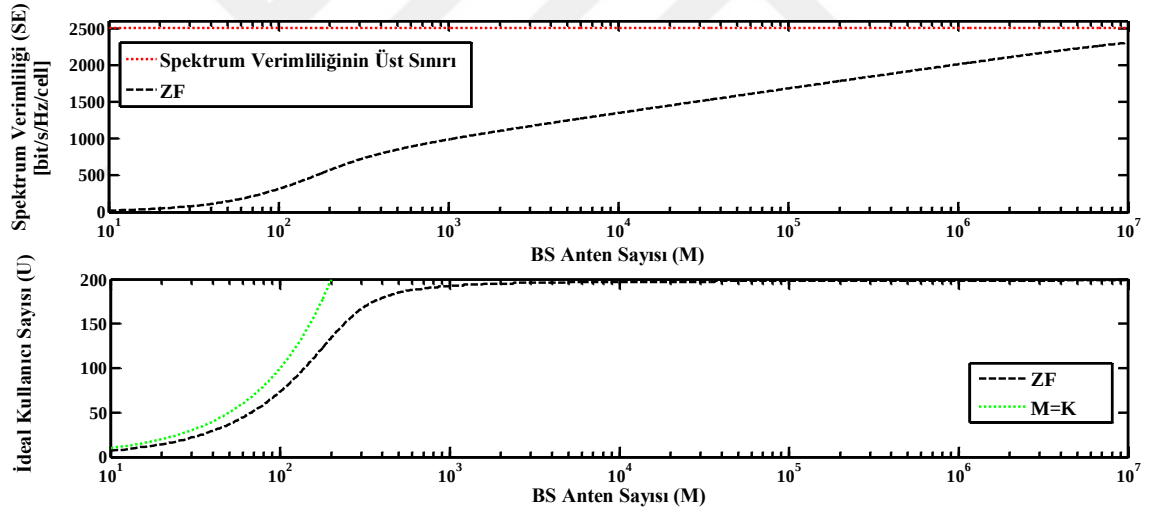
Bu ortam, yayılım ortamları için planlaması yapılan kırsal bölge yayılım ortamının modellendiğı durumu temsil etmektedir. Grafikler için girişim seviyesinin ifadesinin minimum olarak hesaplandığı durumun dikkate alındığı sonuçlardır. Gerek grafiklerin neticesinden gerekse spektrum verimliliğı için düşünölen denklem ifadesinde baz istasyonundaki anten sayısının sonsuza gittiğı durum için gerçekleştirilen hesaplamalar ile birlikte sonuçların tutarlı olduğı gözlemlenmektedir.

6.6.1.1. MRC



Şekil 6.4. MRC için spektrum verimliliğinin maksimize edildiği ideal kullanıcı sayısı.

6.6.1.2. ZF

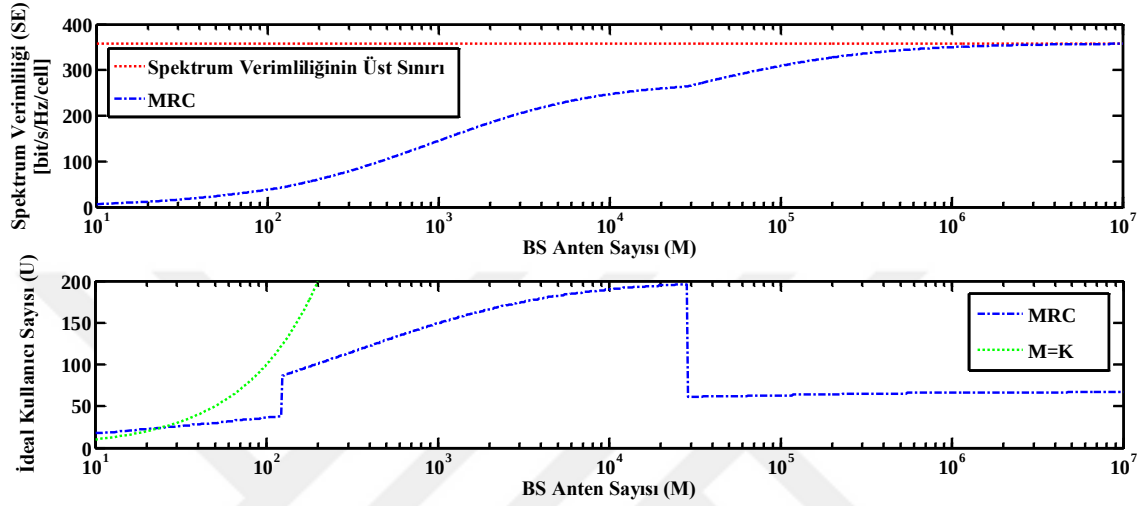


Şekil 6.5. ZF için spektrum verimliliğinin maksimize edildiği ideal kullanıcı sayısı.

6.6.2. İkinci Ortam

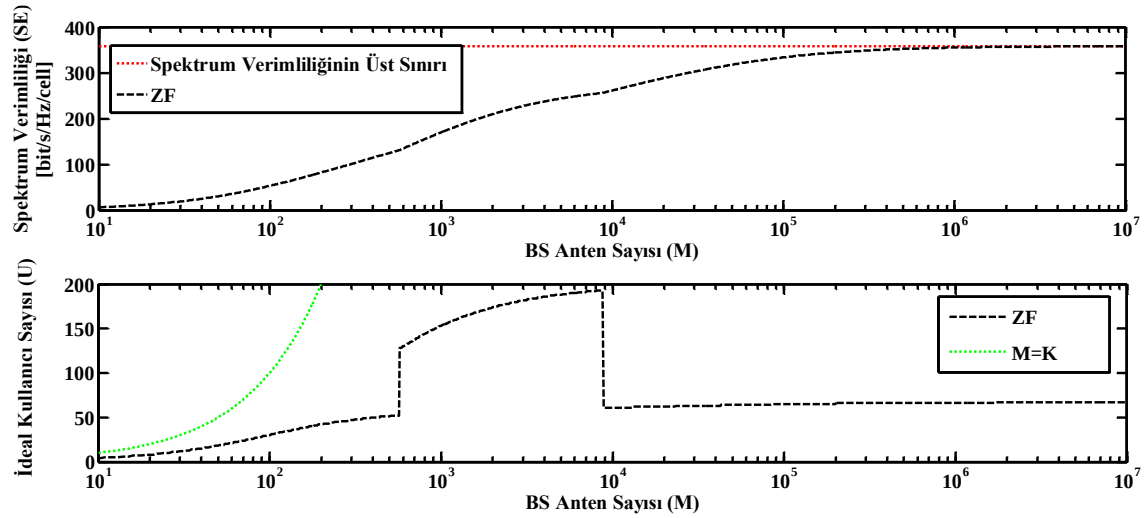
Bu ortam, yayılım ortamları için planlaması yapılan kasaba bölgesi yayılım ortamının modellendiği durumu temsil etmektedir. Grafikler için girişim seviyesinin ifadesinin ortalama olarak hesaplandığı durumun dikkate alındığı sonuçlardır.

6.6.2.1. MRC



Şekil 6.6. MRC için spektrum verimliliğin maksimize edildiği ideal kullanıcı sayısı.

6.6.2.2. ZF

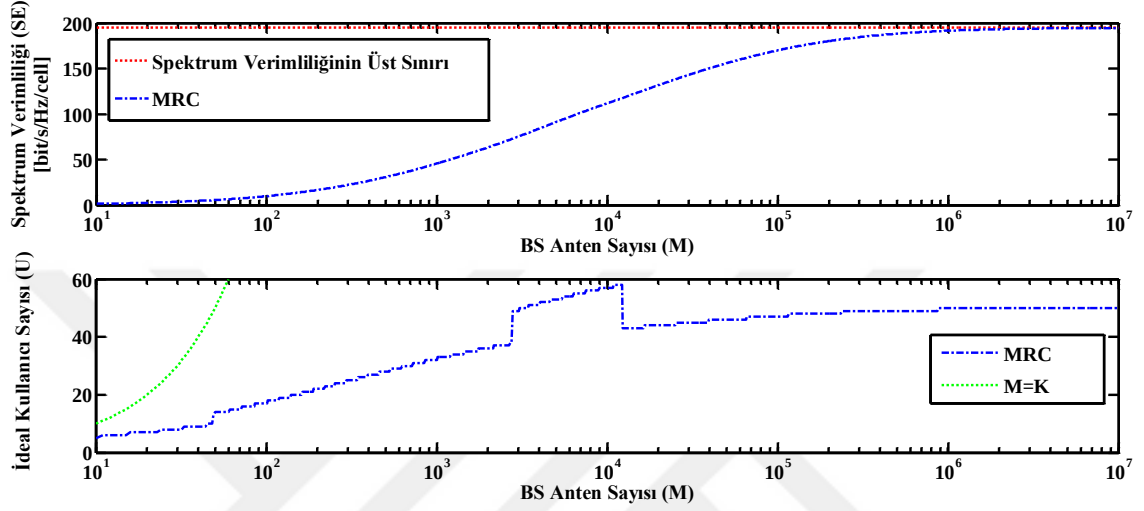


Şekil 6.7. ZF için spektrum verimliliğin maksimize edildiği ideal kullanıcı sayısı.

6.6.3. Üçüncü Ortam

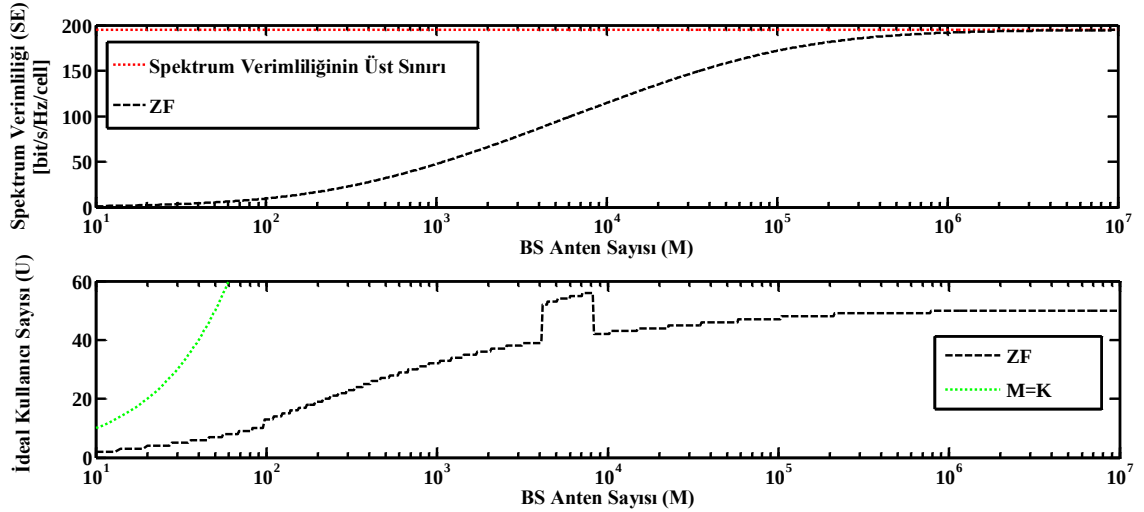
Bu ortam, yayılım ortamları için planlaması yapılan şehir bölgesi yayılım ortamının modellendiği durumu temsil etmektedir. Grafikler için girişim seviyesinin ifadesinin maksimum olarak hesaplandığı durumun dikkate alındığı sonuçlardır.

6.6.3.1. MRC



Şekil 6.8. MRC için spektrum verimliliğın maksimize edildiğı ideal kullanıcı sayısı.

6.6.3.2. ZF



Şekil 6.9. ZF için spektrum verimliliğın maksimize edildiğı ideal kullanıcı sayısı.

Yukarıdaki şekillerde her üç durum için spektrum verimliliğinin maksimize edildiği ve buna karşılık gelen ideal kullanıcı sayısının sonucu gösterilmiştir. Şekillerdeki üstteki grafik baz istasyonundaki anten sayısına karşılık spektrum verimliliğini gösterirken, alttaki grafik ise buna karşılık gelen ideal kullanıcı sayısının hangi değere yakınsadığını göstermektedir. Sonuçlar her durum için MRC ve ZF düşünülerek gerçekleştirilmiştir.

Şekillerden de görüleceği üzere spektrum verimlilikleri incelendiğinde birinci ortamın çok iyi üçüncü ortamın ise çok kötü olduğu anlaşılmaktadır. Nitekim bu, Denklem (6.30) ve Denklem (6.31) olarak sunulan ifadeleri doğrulamaktadır. Ayrıca birinci durum için spektrum verimliliği bakımından ZF'nin MRC'den daha iyi olduğu anlaşılmaktadır. Çünkü birinci durumun tanımı yapılırken hücrelerarası girişimin olmadığı ideal bir ortam olması düşünülmüştür. Ama hücre içi girişim mevcuttur. Böylece ZF'nin amaçlarından olan hücre içi girişim azaltılması gerçekleştirilmektedir ve MRC'ye göre çok daha iyi bir spektrum verimliliği sağlamaktadır. Genel olarak değerlendirildiği zaman ZF'nin ve MMSE'nin girişimi azaltmak bakımından MRC'den daha iyi olduğu da ayrıca belirtilmiştir [5].

Bu bölümdeki asıl amaç spektrum verimliliğinin nasıl sağlandığı açıklamak değildir. Spektrum verimliliğinin hangi ideal kullanıcı sayısı U 'da ve hangi pilot yeniden kullanım faktöründe gerçekleştirildiğidir. Burada istenilen durumlardan birisi de U 'nun en yüksek değerinin elde edilmesidir. Şekiller incelendiğinde görülen atlama noktaları MRC ve ZF'nin ideal kullanıcı sayısını sağlamak ve spektrum verimliliği maksimize edebilmek için değiştirdikleri pilot yeniden kullanım faktörlerini göstermektedir.

Tezin ana katkısı olan Denklem (6.41)'i hatırlayacak olursak baz istasyonundaki anten sayısı sonsuz olarak düşünüldüğünde ideal kullanıcı sayısının $U = \frac{S}{2f}$ olarak ifade edilebildiğinden her durum için ideal kullanıcı sayısı birinci ortam için $U = 200$, $f = 1$; ikinci ortam için $U = 67$, $f = 3$ ve üçüncü ortam için $U = 50$, $f = 4$ olarak belirlenmektedir. Elde edilen grafikler de bu değerleri doğrulamaktadır.

6.7. SONUÇ

Bu bölümde çok kullanıcılu masif MIMO sistemlerinde spektrum verimliliğini maksimize edebilmek için baz istasyonundaki anten sayısı ile birlikte ideal kullanıcı sayısının ne olması gerektiğinin cevabı araştırılmıştır. Spektrum verimliliği denklemleri kullanıcı terminallerinin konumlarına bağlıdır. Bu durum aslında ideal kullanıcı sayısının

belirlenmesini zorlaştırmaktadır. Dolayısıyla tez çalışmasının bu bölümünde kullanıcı konumlarının durumlarına göre ideal kullanıcı sayısını belirleyebileceğimiz yeni spektrum verimliliği ifadeleri oluşturulmuştur. Spektrum verimliliği maksimize ederken ideal kullanıcı sayısının belirlenmesine yardımcı olacak olan bu ifadeler MRC ve ZF işleme altında benzetimle doğrulanmıştır.

Analitik olarak elde edilen sonuçlar MRC ve ZF işlemleri altında gerçekleştirilmiştir. Analizler doğrusal sezme şemalarından bağımsız olarak ideal kullanıcı sayısı $U \frac{S}{2f}$ 'ye yaklaşmaktadır. Bununla birlikte spektrum verimliliği maksimize etmek için anlık olarak değiştirilen pilot yeniden kullanım faktörünün de etkisi unutulmamalıdır. Ayrıca bu çalışma herhangi bir donanım bozukluğunun veya diğer başka parametrelerin etkisi dışında incelenmiştir. Donanım bozukluğu ve diğer başka sistem parametrelerinin eklenmesi ve bunların etkilerinin incelenmesi ileriki çalışma konuları olarak düşünülmektedir.

7. GÜÇ TAHSİSİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Masif MIMO çeşitli performans iyileştirmeleri için 5G, 6G ve ötesi gibi yeni nesil kablosuz iletişim sistemlerinde etkinliğini hala korumaktadır. Spektrum verimliliği, enerji verimliliği (EE), yüksek veri hızı ve daha az gecikme süresi gibi noktalar bu iyileştirmeler olarak göze çarpmaktadır. Gün geçtikçe kullanımı artan birbirleriyle iletişim halinde olan cihazlar, IoT sistemlerinin çok fazla yayılması gibi durumlara rağmen mevcut olan kullanılabilecek kaynakların sınırlı olmasından dolayı bazı iyileştirmelere odaklanması gerekmektedir. Masif MIMO sistemleri kullanılarak kablosuz iletişim teknolojilerinde ile çeşitli performans iyileştirmeleri gerçekleştirmek için çok sayıda çalışmaların gerçekleştirildiği gözlemlenmektedir. Daha ayrıntılı olarak spektrum verimliliği ve enerji verimliliği konusu üzerinde daha ayrıntılı birçok araştırmaların mevcut olduğu görülmektedir. Çünkü günümüzde enerji konusu ve bant genişliği problemi yeni nesil kablosuz iletişim teknolojilerinin devam edebilmesi için odaklanması ve çözüm üretilmesi gereken konular arasındadır. Son yıllardaki çalışmalarda bu iki problemin çözümü için güç tahsis algoritmalarının önerildiği ve geliştirildiği anlaşılmaktadır. Bu tez çalışmasının bu bölümünde, literatürdeki çeşitli güç tahsis algoritmalarına odaklanılmış ve sağladığı çeşitli performans iyileştirmeleri incelenmiştir. Bu önerilen çeşitli algoritmaların ayrıntılı analizleri üzerinde durulmuş, çeşitli olumlu ve olumsuz özelliklerin çıkarımı gerçekleştirilmiştir. Ayrıca genel olarak literatürde çeşitli çalışmalarda kullanılan güç tahsis algoritmaları üç farklı başlık altında toplanmıştır. Ek olarak, bu üç farklı güç tahsis algoritmalarının spektrum verimliliği açısından kıyaslanması gerçekleştirilmiştir. Böylece bu konuda çalışacak araştırmacıların teşvik edilmesi düşünülmüştür. Ayrıca bu bölümün son kısmında yeni bir güç tahsis algoritması yaklaşımına yer verilmiştir.

Kablosuz iletişim teknolojileri kullanımı hızlı bir şekilde artmaktadır. Masif MIMO alıcı ve verici tarafta çoklu anten donanımları sayesinde bu ilerlemelere yardımcı olan bir teknolojidir. Özellikle akıllı şehirler, endüstriyel atılımlar, birbirleriyle haberleşen cihazlar ve bunların uygulamaları gibi gelişmeler ile birlikte spektrum verimliliğinin ve enerji verimliliğinin önemi gün geçtikçe artmıştır. Şöyle ki, kullanıcı verilerinin artmasıyla birlikte sınırlı olan spektrum kaynakları etkili kullanılması gerekmektedir. Buna ilaveten, enerji kaynaklarının da sonsuz olmamasından dolayı kullanımı artan

teknolojilerin bu konuda verimliliği ön planda tutulmalıdır.

Masif MIMO çalışmaları [2]'deki çalışma ile birlikte gün geçtikçe artmaya devam etmiştir. Sağladığı kazançlar bakımından araştırmacıların ilgisini çekmektedir. Özellikle son yıllarda gündemde olan 5G ve ötesi teknolojilerin spektrum verimlilikleri ve enerji verimliliklerinin geliştirilmesinde önemli bir yer tutmaktadır [143]. Bu konuya yönelik çeşitli çalışmalar literatürde yer almaktadır. Masif MIMO, spektrum ve enerji verimliliğini geliştirmedeki avantajları nedeniyle [2], [5], [53] ve [55], 5G sistemleri için potansiyel bir teknolojidir [143], [144]. Masif MIMO'nun karmaşıklık sorununun üstesinden gelmek için, MRC, ZF veya MMSE tabanlı düşük karmaşıklıkla doğrusal sezme teknikleri geliştirilmiştir, [4], [5], [55], [72], [145] ve [146]. Mükemmel olmayan CSI gibi pratik koşullar uygulandığında, kullanıcılar arasındaki kanal ortogonalitesi bozulur ve çok kullanıcı girişimleri ortaya çıkar.

Masif MIMO, 5G ve ötesi sistemler için önemli bir teknolojidir. Aynı frekans bloğunda birçok kullanıcıya hizmet vermesini sağlamaktadır. Bunu ön kodlama veya hüzmleme teknikleriyle gerçekleştirmektedir. Bu sayede spektrum, enerji ve kapasite gibi verimlilikleri artırmaktadır. MIMO sistemlerde karşılaşılan en büyük zorluk birbiriyle sürekli iletişim halinde olan cihazların artmasıdır. Spektrum verimliliği daha iyi hale getirmek iletim gücünü artırarak gerçekleştirilebilir, fakat bu çeşitli sebeplerden ötürü devam ettirilebilir görülmemektedir [117]. Bununla birlikte, çok sayıda radyo frekansı (RF) zincirinin enerji tüketiminden dolayı, masif MIMO, 5G'nin EE gereksinimi için bir sorun olarak ortaya çıkmaktadır.

Son zamanlarda, güç tahsisi algoritmaları masif MIMO sistemlerde spektrum verimliliği ve enerji verimliliğini iyileştirmek için odaklanılmış bir alandır. Geleneksel bir metrik olarak spektrum verimliliği, sınırlı bant genişliği ve artan kullanıcı yoğunluğu nedeniyle iletişim sistemlerinde geniş çapta araştırılmaktadır. Hüzm şekillendirme teknolojisi, spektrum verimliliği ve sistem kapasitesini iyileştirmek için Zaman Bölmeli-Uzun Vadeli Evrim- İleri (TD-LTE-A) ve 5G aşağı bağlantısında kullanılmaktadır. Kullanıcı ekipmanı (UE) gereksinimlerini karşılama öncülüğünde spektrum verimliliğini artırmak için uygun bir güç tahsis algoritması da kullanılabilir. Son yıllarda, iletişim sistemlerindeki güç tüketiminin hızla artması ile birlikte enerji verimliliği de gittikçe daha fazla ilgi görmektedir. Dolayısıyla, güç tahsisi, sistem performansını artırmak ve enerji tasarrufunu teşvik etmek için gerekli bir tekniktir. Güç tahsisinin avantajlarından daha fazla yararlanmak için, masif MIMO ağlarında güç tahsisi için gittikçe daha fazla çalışma

önerilmiştir [54], [118], [147] ve [148].

Güç tahsisi ile ilgili mevcut literatürü üç kategoriye ayırabiliriz: 1) maks-min fayda, 2) enerji verimliliğini en üst düzeye çıkarmak, ve 3) toplam SE'yi maksimuma çıkarmak. Maks-min fayda [149], [150], [151], [152], [153], [154] ve [155]'te araştırılmıştır ve önerilen algoritma tüm kullanıcılara benzer SE sağlamaktadır. Bununla birlikte, dağıtılmış sistemlerde, "kötü" kanallara sahip kullanıcılara fayda (fairness) sağlamak, "tüm ağ" performansını ciddi şekilde düşürebilir [156]. İkinci olarak, cell-free (hücresiz) MIMO sistemlerinin enerji verimliliğini maksimize etmeyi amaçlayan bir güç optimizasyonu [157], [158] ve [159]'da incelenmiştir. Son olarak, herhangi bir fayda garantisi olmaksızın veri çıkışı maksimize ederek "iyi" kanallara sahip kullanıcılara öncelik veren toplam SE'yi maksimize etmek için oluşturulan problem [154], [155]'te incelenmiştir.

Güç tahsisi yöntemleri bir hücredeki tüm kullanıcılar için en iyi veri çıktılarını sunmak için önemlidir. En çok kullanılan yöntemlerden biri maks-min fayda güç tahsisi (MMFPA)'dır. Son zamanlarda, masif MIMO sistemler için maks-min fayda güç tahsisi algoritmaları önerilmiştir [160]–[163]. Genel amacı tüm kullanıcılar arasında bulunan en kötü SINR değerini maksimum yapmaktır. Mevcut çoğu masif MIMO çalışmasında, tüm kullanıcılar eşit güçle iletim yapmaktadır. Bununla birlikte, çok kullanıcılu müdahalelerin varlığında, kullanıcılar arasında eşit güç tahsisi mutlaka en iyi strateji olmayabilir. Çünkü güç sınırına sahip olan sistemlerde, eşit güç tahsisi, enerji kaynağından tam olarak yararlanılmadığından dolayı en uygun bir çözüm değildir. Kullanıcıların büyük ölçekli sönümleme katsayılarının bilgisinden yararlanılarak ZF veya MRC alıcısı ile masif MIMO yukarı bağlantısı için güç tahsis stratejilerini keşfetmeye motive edilmektedir. Böylece MIMO sistemlerindeki güç tahsisi gün geçtikçe incelenmeye devam etmektedir. Bu bölümde, masif MIMO için özellikle spektrum ve enerji verimliliği noktasında önerilen, geliştirilen güç tahsisi algoritmaları incelenmiştir. Çalışmaların temel dayanak noktaları ortaya çıkarılmıştır. Bazı avantaj ve dezavantajlarından bahsedilmiştir. Sonuç olarak genel bir değerlendirme çalışması ortaya konulmuştur. Elde edilmiş olan bu literatür kazanımı ile birlikte son bölümde yeni bir güç tahsisi algoritması yaklaşımı önerilmiş ve bazı benzetim sonuçları verilmiştir.

Tez çalışmasının bu bölümünün katkıları, masif MIMO sistemler için spektrum ve enerji verimliliği sağlayan güç tahsisi algoritmalarının performans metriklerini sunmaktır. Ayrıca güç tahsisi algoritmaları geliştirilen çalışmalardaki masif MIMO senaryolarını

belirlemektir. Kanal durum bilgisinin mükemmel ya da mükemmel olmayan durumlarına göre sınıflandırmasını sağlamaktır. İlaveten, güç tahsisi algoritmalarının geliştirilirken temel alındığı geleneksel güç tahsisi algoritmalarını belirlemektir. Bununla birlikte önerilen algoritmaların hangi yöntem ile kıyaslandığı bilgisini oluşturmaktır. Ek olarak, çalışmalardaki güç tahsisi algoritmalarının oluşturulması için yararlandıkları tekniklerden bahsetmektir. Ayrıca güç tahsisini uygularken masif MIMO sistemlerde kullanılan ön kodlama ve sinyal sezme tekniklerini belirtmektir. Dolayısıyla özellikle spektrum ve enerji verimliliğinin bahsedilen önemi için böyle bir çalışmanın literatüre kazandırılması bu konularda çalışacak olan araştırmacıları teşvik edecektir. Son olarak elde edilen bulgular neticesinde yeni bir güç tahsisi algoritma yaklaşımının belirlenerek sonuçların elde edilmesi gerçekleştirilmiştir.

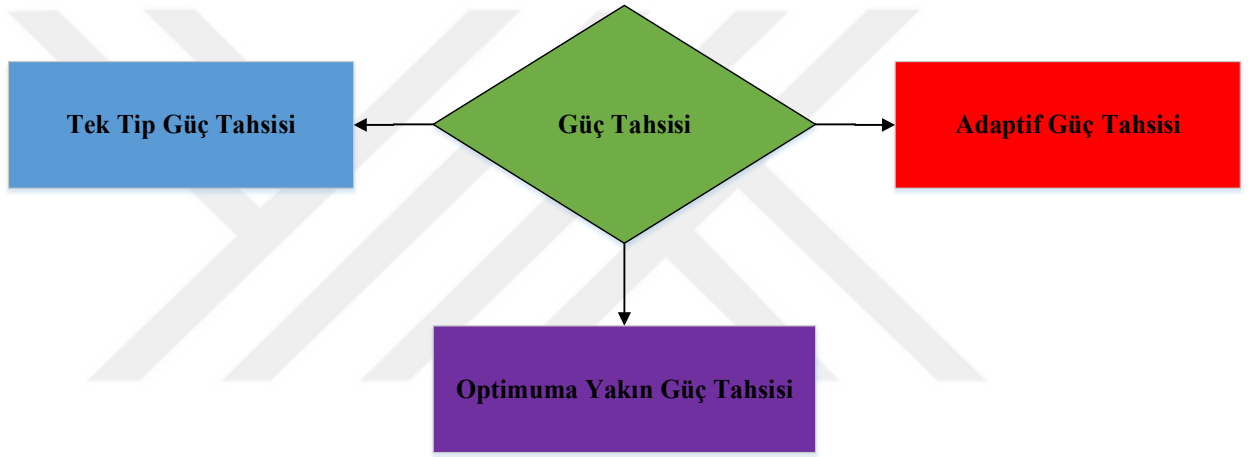
7.1. MIMO SİSTEMLER İÇİN GÜÇ TAHSİSİ

MIMO sistemler baz istasyonunda yüzlerce antenin donatılmasıyla birlikte ortaya çıkan bir teknolojidir. Dolayısıyla verici tarafta klasik yöntemlere göre daha fazla anten yer almaktadır. Klasik sistemlerdeki tek veya birkaç anten durumunda kullanılan gücü paylaşmak nispeten daha kolaydı. Çünkü genellikle toplam güç bu antenlere aktarılmaktaydı. Fakat MIMO sistemlerin gelişmesi ve 5G ve ötesi teknolojilerin kapasitelerinin artırılmasında önemli bir rol oynadığı açık bir şekilde ortaya konduktan sonra toplam gücün nasıl kullanılması gerektiğine dair sorunlar ortaya çıkmaya başlamıştır. Toplam gücün verici antenlere en iyi bir şekilde tahsis edilmesi MIMO kapasitesini artırmak için çözülmesi gereken bir optimizasyon problemidir [164]. Bu problem düşünülmeyen önce genellikle tüm antenlere güç eşit olarak dağıtılmaktaydı. Böyle bir optimizasyon probleminin olduğu düşünülerek farklı stratejiler geliştirilmeye başlanmıştır. Böylece MIMO kanallarının iyi olanlarına daha fazla güç tahsisi yapılarak kapasitenin artırılması mümkün olmaktadır. Dolayısıyla güç tahsisi için CSI önemlidir. Bu bilginin durumuna göre tek tip güç tahsisi, su-doldurma (water-filling) tabanlı adaptif güç tahsisi algoritması gibi stratejiler geliştirilmektedir. Ayrıca yüksek ve düşük sinyal gürültü oranı (SNR) durumuna göre de çeşitli optimal güç tahsisleri düşünülmüştür.

MIMO sistemlerde CSI'nın tamamen bilindiği varsayıldığında güç tahsisi kanalların durumunun bilgisine göre yapılmaktadır. Bir MIMO sistemi için aşağı bağlantı ve yukarı bağlantı durumlarında iletim gücünün gösterildiği şekiller [165]'teki çalışmada belirtilmiştir. İletimi iyi olan kanallara daha fazla güç tahsis edilir ve kötü olan kanallara

daha az güç tahsis edilir veya hiçbir güç tahsis edilmez. Dolayısıyla genel olarak değerlendirildiğinde MIMO sistem kapasitesi için uygun bir güç tahsisi önemli bir konudur [166]. Bu konuyu geliştirmek ve kapasiteyi artırmak için su-doldurma (WF) algoritması önerilmiştir [167], [168]. Fakat WF algoritması yüksek kapasite gerektiren hizmetler için yeterli değildir. Bu sebepten dolayı hem WF tabanlı hem de diğer teknikler ile birlikte güç tahsisi stratejileri geliştirilmektedir. Bunlardan birisi ise hizmet kalitesi (QoS) tabanlı WF algoritmasıdır [169].

Genel olarak değerlendirildiğine MIMO sistemler için güç tahsisi Şekil 7.1’de görüldüğü gibi tek tip (eşit) güç tahsisi, adaptif güç tahsisi ve optimuma yakın güç tahsisi olarak üç başlık altında incelenebilmektedir [164].



Şekil 7.1. Güç tahsisi gruplandırma şeması.

7.1.1. Tek Tip (Eşit) Güç Tahsisi

Tek tip güç tahsisi diğer bir ifadeyle eşit güç tahsisi CSI'nın alıcıda bilindiği fakat vericide bilinmediği MIMO sistemlerde kullanılmaktadır [170]. Bu yöntemin tercih edilmesindeki en önemli etkenlerden biri düşük karmaşıklık sağlamasıdır [171]. Dolayısıyla özellikle MIMO sistemlerin ilk zamanlarında çoğunlukla tercih edilmiştir. Fakat sınırlı bir güç limitinin olduğu durumlar göz önüne alındığında daha farklı stratejiler geliştirilmesi önemlidir. Çünkü eşit güç tahsisinden dolayı derin sönmölenmelerin yoğun olduğu kanala sahip kullanıcıya da aynı güç tahsis edildiğinden gücün etkili kullanımı söz konusu olmamaktadır [172].

Haberleşme sistemlerinin ulaşabileceği maksimum kapasite oranının üst sınırı Shannon tarafından yapılan çalışma ile belirlenmiştir [173]. Dolayısıyla MIMO sistemlerin

kapasitelerinin artırılabilceği en üst nokta da açıktır. $\mathbf{N}_T$ verici antene sahip, $\mathbf{N}_R$ alıcı anten sahip bir MIMO sisteminde $\mathbf{x}$ giriş sinyal vektörünü $\mathbf{y}$ çıkış sinyal vektörünü temsil ettiği varsayımıyla MIMO sistemin kapasitesi

$$\mathbf{C} = \mathbf{H}(\mathbf{Y}) - \mathbf{H}(\mathbf{N}) \quad (7.1)$$

ile verilmektedir [174], [175].

Bu ifadedeki $\mathbf{H}(\mathbf{Y})$ ve $\mathbf{H}(\mathbf{N})$ sırasıyla alınan sinyalin ve gürültü sinyalinin entropisidir. $\mathbf{R}_x = E\{\mathbf{x}\mathbf{x}^H\}$, $\mathbf{R}_n = E\{\mathbf{n}\mathbf{n}^H\}$ ve $\mathbf{R}_y = E\{\mathbf{y}\mathbf{y}^H\}$ sırasıyla iletilen sinyalin, gürültü sinyalinin ve alınan sinyalin kovaryans matrisini ifade etmektedir. Bu durumda, ρ SNR temsil etmek üzere

$$\mathbf{R}_y = E[\mathbf{y}^H \mathbf{y}] = \rho \mathbf{H}^H \mathbf{R}_x \mathbf{H} + \mathbf{I}_{N_R} \quad (7.2)$$

ile verilmektedir [175]. Bu bilgiler doğrultusunda kapasite ifadesi,

$$\mathbf{C} = \log_2 \det(\rho \mathbf{H}^H \mathbf{R}_x \mathbf{H} + \mathbf{I}_{N_R}) \quad (7.3)$$

olarak yeniden yazılabilir. Ayrıca, $\mathbf{R}_x$ iletilen sinyalin kovaryans matrisi olduğundan dolayı bu ifade aşağıdaki gibi gösterilebilir [164].

$$\mathbf{R}_x = \frac{P}{N_T} \mathbf{I}_{N_T}. \quad (7.4)$$

Bu denklemler sonucunda kapasite ifadesi [176]'da ifade edilmiş olan aşağıdaki denklemde verilmiş olan halini alır.

$$\mathbf{C} = \log_2 \det \left(\mathbf{I}_{N_R} + \frac{P}{N_T \sigma^2} \mathbf{H}^H \mathbf{H} \right) \quad (7.5)$$

7.1.2. Adaptif Güç Tahsisi

MIMO sistemlerde hem alıcı tarafta hem de verici tarafta CSI'nın bilindiği durumlar için genellikle su-doldurma algoritması tabanlı uyarlanabilir güç tahsisi gerçekleştirilmektedir [164]. CSI'nın vericide de bilinmesi geri beslemeli bir sistem ile mümkün olmaktadır. Böyle bir MIMO sistemi kapalı döngü olarak da adlandırılır [164]. Su-doldurma

algoritması sayesinde kanal durumu iyi olanlara daha fazla güç, kötü olanlara ise sıfır güç tahsisi gerçekleştirilmektedir.

7.1.2.1. Su-Doldurma (WF) Algoritması

Su-doldurma algoritmasının amacı yüksek SNR'ye sahip kanallara daha fazla güç tahsis etmektir [175]. Kanal matrisinin öz değerlerine göre toplam güç antenlere dağıtılmaktadır [177]. Bu sayede kanal durum bilgisinin alıcı ve vericide bilindiği MIMO sistemlerde maksimum kapasite WF ile gerçekleştirilebilir [178].

P_i i . kanaldaki güç, λ_i $\mathbf{H}^H \mathbf{H}$ matrisinin öz değerleri ve $\mathbf{H}$ kanal matrisinin rankı r olmak üzere kanal kapasitesi

$$\mathcal{C} = \sum_{i=1}^r \log_2 \left(1 + \frac{P_i \lambda_i}{\sigma^2} \right) \quad (7.6)$$

olarak yazılabilir [177]. P_i uygun seçilerek, kapasitenin maksimum olması sağlanmaktadır. WF algoritması

$$\sum_{i=1}^{N_T} P_i = P_T \quad (7.7)$$

güç kısıtlaması altında gerçekleştirilmektedir. Burada P_T toplam güçtür. WF algoritmasından dolayı P_i aşağıdaki gibi verilmektedir [178].

$$P_i = \left(\mu - \frac{\sigma^2}{\lambda_i} \right)^+ \quad (7.8)$$

Burada,

$$(a)^+ = \begin{cases} a, & a > 0 \\ 0, & a \leq 0 \end{cases} \quad (7.9)$$

Denklem (7.6)'daki ifadeye [179] ve [180]'deki gibi Lagrange çarpanları metodu uygulanırsa yeni ifade [175]'teki halini alır.

$$Z = \sum_{i=1}^r \log_2 \left(1 + \frac{P_i \lambda_i}{\sigma^2} \right) + L(P - \sum_{i=1}^r P_i) \quad (7.10)$$

Burada L Lagrange çarpanıdır. P_i , Denklem (7.10)'un kısmi türevlerinin sıfıra eşitlenmesiyle bulunmaktadır [176].

$$\frac{\delta Z}{\delta P_i} = 0 \quad (7.11)$$

$$\frac{\delta \left\{ \log_2 \left(1 + \frac{P_i \lambda_i}{\sigma^2} \right) - L P_i \right\}}{\delta P_i} = 0 \quad (7.12)$$

$$\frac{1}{\ln 2} \left(\frac{\lambda_i / \sigma^2}{1 + P_i \lambda_i / \sigma^2} \right) - L = 0 \quad (7.13)$$

$$\mu = \frac{1}{L \ln 2} \quad (7.14)$$

Böylece Denklem (7.8)'deki P_i elde edilmiş olur. μ ise toplam güç kısıtlaması altında sabit bir değer olup Denklem (7.14)'teki gibi hesaplanmaktadır [176].

WF algoritması sayesinde güç tahsisi optimum bir çözüm olmaktadır [175]. Dolayısıyla MIMO sistemin durumuna göre uygulanacak yöntem ile maksimum kapasiteye ulaşılabilmektedir. Eşit güç tahsisi ve optimum bir güç tahsisi sunan WF'den ayrı olarak optimum çözüme yakın bir güç tahsisi çözümü de mevcuttur. Aşağıda optimuma yakın güç tahsisi hakkında kısaca değerlendirmeler yer almaktadır.

7.1.3. Optimuma Yakın Güç Tahsisi

Optimum güç tahsisi yaklaşımları genellikle birçok yineleme gerektirmektedir [181]. Çünkü adaptif çözüm yaklaşımı optimum güç tahsisi çok amaçlı dışbükey olmayan bir problemdir. Bundan dolayı hesaplama karmaşıklığı çoktur [182]. Bu dışbükey problemten dolayı analitik bir çözüm elde edebilmek için daha basit bir yöntem olarak optimuma yakın güç tahsisi algoritmaları geliştirilmektedir [183]. Optimum güç tahsisi yaklaşımlarındaki hesaplama karmaşıklığı daha basit çözümler olan optimuma yakın güç tahsisi yöntemlerinde daha azdır. Optimuma yakın güç tahsisi SNR seviyesinin durumuna göre aşağıdaki kapalı form ifadelerine dönüştürülebilir [184].

$$\text{Düşük SNR: } \mathbf{C}(\mathbf{H}) \xrightarrow{\rho \rightarrow 0} \log_2(1 + \rho \lambda_{max}) \quad (7.15)$$

Yukarıdaki şart altında, WF algoritmasındaki duruma göre en derindeki kısma güç aktarmamız avantajlı olacaktır. Böylece toplam güç daha güçlü öz değerlere aktarılmış

olacaktır. Yani en iyi alt kanala gücün aktarımı gerçekleştirilmiş olmaktadır [164].

$$\text{Yüksek SNR: } \mathbf{C}(\mathbf{H}) \xrightarrow{\rho \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^r \log_2 \left(1 + \frac{\rho \lambda_i}{r} \right) \quad (7.16)$$

SNR seviyesinin yüksek olduğu durumda, tüm güç sıfır olmayan öz değerler arasında dağıtılmaktadır [184]. Bu işlem eşit olarak gerçekleştirilmektedir.

Optimuma yakın güç tahsis yöntemleri üzerinde özellikle karmaşıklığı azaltmak için literatürde çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmalardan bazıları [183], [185]–[188]'dir. Bu çalışmaların temel aldıkları noktalar değişiklik gösterse de asıl amaçları optimum güç tahsisindeki basit olmayan durumu daha basit bir şekilde optimuma yakın bir çözüm sunarak indirgemektir.

7.2. GÜÇ TAHSİSİ YÖNTEMLERİ

Masif MIMO, gelecekteki 5G ve ötesi iletişimlerde yüksek hız ve büyük kapasite gereksinimlerini karşılayabilen anahtar teknolojilerden biridir. Devredeki ve antenlerdeki donanım bozukluğu, iletim verimliliği ve enerji tüketimi, masif MIMO ağlarında rol oynamaktadır. QoS'yi sağlamak için, her kullanıcı ve sistem için minimum oran kısıtlamasını göz önünde bulundurulmaktadır, bu da masif MIMO sisteminde enerji ve spektrum verimliliğini en üst düzeye çıkarmak için güç tahsis sorununun karmaşıklığını artırmaktadır.

MIMO sistemlerin performansının artırılmasında güç tahsisinin etkisi önemli bir yer tutmaktadır. Güç tahsis kanal durum bilgisine ve kullanıcı ekipmanına bağlıdır [189]. MIMO sistemleri için optimum güç tahsis çalışmaları son yıllarda odaklanılan bir konudur [190], [191]. Fakat çoğu çalışmada güç tahsis algoritmaları mükemmel CSI altında önerilmiştir [192], [193].

Masif MIMO çalışmalarının çoğunda pilot ve yük veri güçleri sabit olarak düşünülmektedir. Fakat [148] ve [194]'teki çalışmalardan da görüleceği üzere optimum güç tahsis kullanılarak performanslar artırılabilir. Her bir kullanıcının kapasitesinin maksimize edilmesi için, güç tahsisinin verimli bir şekilde yapılması gerekmektedir [195]. Çok hücreli masif MIMO sistemlerinde ulaşılabilir yukarı bağlantı oranını maksimize etmek için, [147]'de bir pilot güç tahsis stratejisi önerilmiştir. [148]'de, masif MIMO ağlarında enerji verimliliği EE'yi maksimize etmek için yaklaşık

bir güç tahsis şeması önerilmiştir. Masif MIMO sistemlerde kullanıcılar arası girişimler problem oluşturmaktadır. Güç tahsisi ile birlikte bu probleme yönelik iyileştirmeler bazı çalışmalarda yapılmıştır [135] ve [196]. Ayrıca güç tahsisi algoritmaları, kanal sönümlemenin olumsuz etkileri neticesinde bit hata oranını (BER) azaltır veya daha iyi bir veri hızı imkânı sunar [197].

Güç tahsisi yöntemlerinde görüldüğü üzere dikkate alınan birçok metrik vardır. Ama çoğunlukla güç tahsisi ile birlikte sistem kapasitesini artırmaya yönelik çalışmalar göze çarpmaktadır. Tezin bu kısmında ise MIMO sistemlerde spektrum ve enerji verimliliğini artırmak için güç tahsisi yöntemlerine yoğunlaşmış çalışmaları incelenmektedir. Sonraki kısımlar bu konular hakkındaki güç tahsisi yöntemlerini içermektedir.

7.2.1. Spektrum Verimliliği için Güç Tahsisi Stratejileri

Bu kısımda literatürdeki güç tahsisi yöntemleri hakkındaki çalışmalar spektrum verimliliği açısından incelenmiştir. Masif MIMO senaryoları dikkate alınarak çalışmaların yaklaşımları değerlendirilmiştir. Bu kısımda bahsedilen çalışmaların genel bir özeti Çizelge 7.1’de gösterilmiştir.

Maks-min fayda algoritması üzerine yapılan mevcut çalışmaların çoğu, genel amaçlı bir dışbükey optimizasyon çözücüsü ile bir dizi dışbükey alt problemi çözmeye veya belirli durumlarda geometrik programlamadan yararlanmaya dayanmaktadır, [149], [151], [152], [153], [154] ve [155]. [150]’deki çalışmada, dağıtılmış operasyondakinden çok daha az sayıda güç katsayısına sahip merkezi cell-free (hücresiz) mMIMO operasyonu için düşük karmaşıklıkta bir güç tahsis algoritması önerilmiştir. Fakat önerilen algoritma dağıtılmış hücresiz mMIMO kurulumu için geçerli değildir. Benzer şekilde, enerji verimliliğini veya toplam-SE maksimizasyonunu dikkate alan diğer çalışmaların çoğu, genel amaçlı bir sayısal çözücü gerektirir. Bununla birlikte [158]’deki çalışmada Dinkelbach’ın kesirli programlama algoritmasının, sıfıra zorlama ve mükemmel CSI ile merkezi aşağı bağlantı işlemi için enerji verimliliğini en üst düzeye çıkarmak için kullanılabileceğini göstermektedir. Fakat bu algoritma herhangi bir ön kodlama tekniği ile dağıtılmış işlem için kullanılamaz.

Hem aşağı bağlantı hem de yukarı bağlantı iletimleri için maks-min güç tahsisi sorunları çözülmüş ve elde edilebilir spektrum verimliliğinde önemli gelişmelere yol açmıştır. Maks-min güç tahsisinin performansını daha da artırmak için, [153]’teki yazarlar hücresiz bir masif MIMO sisteminin alıcı tarafında bir filtreleme bloğu eklediler ve filtre ve güç

kontrol katsayılarını birlikte optimize ettiler. 5G kablosuz ağlarda kullanıcı başına aşağı bağlantı SE'nin 30 bit/s/Hz'e ulaşmasının beklendiğini göz önünde bulundurarak, sınırlı ana taşıyıcı kapasitesi, dağıtılmış uygulamalar için önemli problemi temsil ettiği belirtilmiştir. Karşılaştırmalarında, minimum yukarı bağlantı oranının (Bits/s/Hz) CDF'si incelenmiştir. [149]'daki çalışmada kullanılan Maks–min güç kontrolü şemasına göre karşılaştırma yapılmıştır.

Çizelge 7.1. Spektrum verimliliği için güç tahsisi çalışmalarının özeti.

Kaynak	Metrik	Senaryo	İletim	CSI Bilgisi	Kıyaslama	Sinyal Sezme/Ön Kodlama Tekniği
[18]	CDF-SE	Masif MIMO	Aşağı bağlantı	Mükemmel olmayan	Eşit güç tahsisi,	MRT
[28]	Ortalama toplam oran-SNR, Kullanıcı sayısı	Masif MIMO	Aşağı bağlantı ve Yukarı bağlantı	Mükemmel olmayan	Eşit güç tahsisi,	ZF
[63]	CDF-Kullanıcının hizmet kalitesi	Masif MIMO	Yukarı bağlantı	-	Eşit güç tahsisi	MRC
[198]	Pmax-SE	Masif MIMO	Yukarı bağlantı	Mükemmel olmayan	Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO), Standart altı PA	ZF
[199]	CDF-elde edilebilir oran	Hüresiz Masif MIMO	Aşağı bağlantı	-	Maks-Min Güç Tahsisi	MMSE
[200]	SNR-Toplam oran	Masif MIMO	Yukarı bağlantı	Mükemmel ve Mükemmel olmayan	Eşit Güç Tahsisi, Optimal Güç Tahsisi ve Su-Doldurma Algoritması	MRC ve ZF
[204]	Sistem net çıktısı-Kullanıcı sayısı, Anten sayısı	Kablosuz Enerjili İletişim Ağı (WPCN)	Yukarı bağlantı	Mükemmel	Su-Doldurma Algoritması, Eşit güç tahsisi	MF

Çizelge 7.1. (Devam).

Kaynak	Metrik	Senaryo	İletim	CSI Bilgisi	Kıyaslama	Sinyal Sezme/Ön Kodlama Tekniği
[205]	Toplam kapasite-SNR, İterasyon sayısı	Çok hücreli Masif MIMO	Aşağı bağlantı	Mükemmel	Genetik Algoritma ve Üst sınırı maksimize etme [78]	-
[210]	CDF-SE	Hüresiz Masif MIMO	Aşağı bağlantı	-	Eşit güç tahsisi, Maks-Min güç tahsisi	MRC, RZF
[212]	CDF-SE	Tek hücreli Masif MIMO	Yukarı bağlantı	Mükemmel olmayan	Eşit güç tahsisi, Maks-Min güç tahsisi	MRC, RZF
[215]	Hücre kenarı kapsama mesafesi-SE	Çok hücreli Masif MIMO	Aşağı bağlantı	Mükemmel	-	ZF-BF
[217]	Zaman dilimlerinin uzunluğu-Elde edilebilir oran	Masif MIMO Bilişsel Radyo Ağları	Aşağı bağlantı	Mükemmel	-	MF
[218]	SE-Toplam güç, Anten sayısı	Çok çiftli Masif MIMO iki yönlü yükseltme ve ileri (AF) geçişi	Aşağı bağlantı ve Yukarı bağlantı	Mükemmel olmayan	Eşit güç tahsisi	MRC/MRT-ZFR/ZFT
[219]	CDF-Elde edilebilir oran	Çok hücreli çok kullanıcılı Masif MIMO	Yukarı bağlantı	Mükemmel	Eşit güç tahsisi	LS, MMSE
[220]	CDF-Toplam güç tüketimi	Hüresiz Masif MIMO	Aşağı bağlantı	Mükemmel olmayan	-	MRT, ZF
[221]	CDF-SE	Masif MIMO	Aşağı bağlantı	Mükemmel olmayan	-	M-MMSE, MRC
[223]	CDF-SE	Hüresel Masif MIMO	Yukarı bağlantı	Mükemmel		MMSE, MRC

Masif MIMO sistemlerde özellikle yukarı bağlantı durumunda spektrum verimliliği ve enerji verimliliği iyileştirmesi için çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Bunlardan bir tanesi olan [198]'deki çalışmada tahmin hatalarının olduğu bir Masif MIMO sisteminde adaptif bir güç tahsisi algoritması, SE maksimize etmek için geliştirilmiştir.

[199]'daki çalışmada hücreli masif MIMO sistemlerde aşağı bağlantı için güç tahsisi problemi ele alınmıştır. Bu çalışmada, güç tahsisi probleminin yeni bir formülasyonu kısıtlı bir optimizasyon olarak sunulmuştur; burada amaç, hedef fonksiyon olarak toplam SE'yi maksimize ederken, her bir erişim noktasının (AP) iletim gücünü sınırlandırmak ve farklı kullanıcıların ulaşılabilir SE'lerine alt ve üst sınırlar getirmektir. Ortaya çıkan optimizasyon probleminin dışbükey olmadığı, yani amaç fonksiyonunun içbükey olmadığı ve kullanıcı SE'lerindeki üst sınırlayıcı kısıtlamaların dışbükey olmadığı gösterilmiştir. İlişkisiz ve ilişkili gölge sönmleme modelleri altında Monte Carlo benzetimleri aracılığıyla önerilen aşağı bağlantı güç tahsis şemasının performansı değerlendirilmiştir. Sonuçlar, her iki model için de önerilen optimum altı algoritmanın, bir kıyaslama yaklaşımına kıyasla toplam güç tüketiminde önemli bir azalmaya yol açabildiğini, aynı zamanda gücü AP'lere doğru bir şekilde tahsis ettiğini ve böylece her bir kullanıcının SE kısıtlamasının zorunlu tutulan sınırlar içinde karşılanacağını göstermektedir. Bu önerilen model minimum SE'sini maksimize eden maks-min güç tahsisi yaklaşımıyla karşılaştırılmıştır. Önerdikleri güç tahsisi yöntemi için karşılaştırmada metrik olarak her bir kullanıcının elde edilebilir kapasitesinin (Mbits/s) birikimli dağılım fonksiyonu incelenmiştir.

[200]'deki çalışmada en yüksek güç kısıtlaması altında güç tahsisi stratejileri geliştirmişlerdir. Bu çalışmada mükemmel ve mükemmel olmayan CSI ile MRC ve ZF sezme tekniklerini kullanan Masif MIMO yukarı bağlantısı ele alınmıştır. Toplam oran maksimizasyonu problemi zor bir problemdir [201], [202] ve [203]. [200]'deki çalışmada, toplam oran alt sınırına dayalı olan, güç tahsisi için alternatif bir optimizasyon stratejisi önerilmiştir. Böylece kullanıcıların SINR değeri maksimize edilecektir. SINR değerini maksimize eden ve geometrik programlama ile çözülebilen bir güç tahsisi stratejisi önerilmiştir. Alt sınır toplam oranını maksimize etmede asimptotik olarak optimal olduğu belirtilmektedir. MRC alıcısı için mevcut şemalara göre önemli bir iyileştirme sunduğunu bildirmişlerdir. Pilot tepe gücü, veri tepe gücü ile en azından aynı olduğunda, tüm kullanıcılar için maksimum güç tahsis stratejisinin ZF alıcısı için en uygun olduğunu da ayrıca kanıtlamışlardır. Güç tahsisi algoritmaları SNR değerinin

toplam orana (Bits/s/Hz) göre karşılaştırması ile incelenmiştir. Önerilen güç tahsisi algoritması eşit güç tahsisi, optimal güç tahsisi ve su-doldurma algoritması güç tahsisi ile kıyaslanmaktadır.

[204]'teki çalışmada, asimptotik olarak optimal kapalı form aşağı bağlantı güç tahsisi stratejisi, uyumlu süzgeç bazlı hüzme şekillendirme kullanılarak yukarı bağlantı toplam oranını maksimize etmek için elde edilmiştir. Üstelik yukarı bağlantı toplam hızı maksimizasyonu için elde edilen güç tahsisinin, asimptotik Masif MIMO senaryosu altında eşzamanlı olarak minimum kullanıcı oranını maksimize ettiği tespit edilmiştir. Bu çalışmada güç tahsisi masif MIMO kullanılan kablosuz enerjili iletişim ağı (WPCN) için düşünülmüştür. Çok kullanıcıli masif MIMO WPCN çerçevesinde yukarı bağlantı toplam oran maksimizasyonuna odaklanılmıştır. Asimptotik olarak optimal olduğu kanıtlanan ve iyi bilinen su-doldurma stratejisinden farklı şekilde davranan kapalı form bir aşağı bağlantı güç tahsis stratejisi türetilmiştir. Ayrıca, toplam oran maksimizasyonu için önerilen çözümün aynı zamanda minimum kullanıcı oranı maksimizasyonu için de geçerli olduğu belirtilmiştir. Önerilen yöntemin su-doldurma güç tahsisi ile kıyaslaması yapılmıştır. Ayrıca güç tahsisi yöntemlerinden olan eşit güç tahsisi ile yapılan bir kıyaslamada önerdikleri yöntemin eşit güç tahsisine göre daha üstün olduğu belirtilmiştir. Önerilen güç tahsisi sistem net çıktısının (bps/Hz) hem kullanıcı sayısına hem de anten sayısına göre kıyaslamasını içermektedir.

[205]'teki çalışmada, ışın bölmeli çoklu erişim (BDMA) iletme sahip MIMO sistemler için güç tahsisine odaklanılmıştır. Bunun için iki farklı güç tahsisi yöntemi önermişlerdir. Bunlardan ilki içbükey-dışbükey prosedür (CCCP) [206], [207] ve [208] tabanlı güç tahsisi yöntemidir. Diğerisi ise deterministik eşdeğer (DE) tabanlı güç tahsisi yöntemidir. Bu algoritmaların ortogonalite koşullarını karşılayan çözümlere yakınsadığı vurgulanmıştır. Benzetim sonuçları ile birlikte, yinelemeli algoritmaların hızlı yakınsamasını ve optimuma yakın performans gösterdikleri belirtilmiştir. Önerdikleri her iki güç tahsisi algoritmasını, genetik algoritma [209] ile kıyaslamışlardır. Burada hücre başına toplam oran hesabı gerçekleştirmişlerdir. Benzetim sonuçlarından her üç algoritmanın da benzer performansa sahip olduğu açıktır. Kullanılan metrik ise SNR değerine göre hücre başına toplam oran (Bit/s/Hz) kıyaslamasıdır.

[210]'daki çalışmada hücresiz masif MIMO sistemleri için daha önce yüksek karmaşıklıkli genel amaçlı çözümler kullanılarak yaklaşılacak maksimum, minimum ve toplam-SE güç tahsisi algoritmaları yeniden gözden geçirilmiştir. Büyük sistemlerde

kullanım için uygun olan birkaç farklı yüksek performanslı, düşük karmaşıklıkla güç tahsisi algoritmaları önermişler ve bunları karşılaştırmışlardır. Ağırlıklı minimum ortalama kare hatası (WMMSE) minimizasyonundan ve kesirli programlama (FP) esinlenerek toplam SE güç optimizasyonu için iki yeni algoritma önermişlerdir. Ayrıca, maksimum-min fayda güç tahsisi için yeni bir FP tabanlı algoritma önerilmiştir. Önerilen algoritmaların, masif sistemler için küresel veya yerel optimum güç tahsisi çözümlerini bulduğu belirtilmiştir. Bunun yanı sıra, önceki çalışmalara kıyasla daha düşük hesaplama süresi olduğunu da vurgulamaktadırlar. Yazarların önerilen algoritmadaki ana katkıları şöyledir; ergodik aşağı bağlantı kapasitesi üzerinde bir alt sınır türetilmiştir. Sonuçların içerisinde kanal tahmin hataları, güç tahsisi ve pilot kirlenmesi hesaba katılmıştır. Önerdikleri algoritmanın sonuçları yerel optimum noktasına yakınsamaktadır. Ayrıca sayısal olarak elde ettikleri sonuçların karmaşıklık ve performans açısından etkili olduğunu belirtmişlerdir. Geliştirdikleri güç tahsisi algoritmaları eşit güç tahsisi algoritması ile kıyaslanmıştır. Ayrıca [211]'deki yazarların önerdikleri kanal tabanlı güç tahsisi yöntemi ile de kıyaslama mevcuttur. Ayrıca dışbükey olmayan problemi çarpanların alternatif yön yöntemi ile çözmeye çalışmışlardır. Bu kıyaslamalarda aşağı bağlantıdaki her bir kullanıcı spektrum verimliliğinin (bit/s/Hz) CDF'i değerlendirilmektedir.

[18]'deki çalışmada masif MIMO aşağı bağlantı sisteminde kullanıcılar arasında ortaklaşa en uygun pilot ve veri gücü tahsisini araştırmaktadır. Bu sistemde baz istasyonu çok sayıda antenle donatılmıştır. Ayrıca aynı frekans bandında aynı anda tek anten kullanıcılarına yönelik hizmet vermektedir. Yazarlar, spektrum verimliliğini dikkate almışlardır. Dışbükey olmayan problem için geometrik programlama yöntemini dikkate almışlardır. Hüzmeleme eğitimi (BT) şemasında spektrum verimliliğini iyileştirmek için bazı güç tahsisi yöntemleri önerilmiştir [35], [212]. Bu iki çalışmada küçük ölçekli sönümlenme dikkate alınmıştır. Fakat [213]'te bahsedilen MIMO'daki kanal sertleştirme etkisi nedeniyle büyük ölçekli sönümlenme kullanılmaktadır. [18]'deki çalışmada büyük ölçekli sönümlenmeyi dikkate alarak veri gücünü ve pilot güç tahsisini birlikte belirleyen bir güç tahsisi problemine değinilmiştir. Önerilen güç tahsisi yöntemi eşit güç tahsisi yöntemi ve [212]'deki pilot dizileri ve veri sinyalleri arasındaki güç tahsisi algoritması, [35]'teki kullanıcılar arasında güç tahsisi için önerilen algoritma ile kıyaslama gerçekleştirilmiştir. Burada spektrum verimliliğinin (bits/s/Hz) CDF'i incelenmiştir.

[213]'teki çalışmada yazarlar masif MIMO sistemleri için maks-min fayda ve toplam

SE'yi maksimum yapma optimizasyonunu araştırmışlar. Masif MIMO sistemi tek hücrelidir. Bu sistemde pilot ve veri gücü değişkenleri üzerinde durulmuştur. Ayrıca spektrum verimliliği için de ifadeler türetilmiştir.

[214]'teki çalışmada çok kullanıcılı uzay-zaman satırı kodu (STLC) sistemi düşünölmektedir. Bu sistem birden çok tek kullanıcılı MIMO sistemlerine dönüştürölmektedir. Böylece her bir kullanıcı için toplam oranı maksimum yapmak için güç tahsisi yöntemi önerilmiştir. Önerdikleri güç tahsisi yöntemi su-doldurma temeline dayanmaktadır. Farklı olarak, optimal olmayan kullanıcı başına fayda bilinci (FAPU) adı altında basit bir güç tahsisi yöntemi de önerilmiştir. Bu yöntemin de neredeyse optimum bir performansa sahip olduğu gösterilmiştir. Güç tahsisi algoritmaları SNR'a göre kullanıcı başına ortalama oran kıyaslaması ile gösterilmiştir. Ayrıca baz istasyonundaki anten sayısı ve kullanıcı sayısına karşı kullanıcı başına ortalama oran sonucu gösterilmiştir.

[215]'de gerçekleştirilen çalışmada MIMO-ortogonal olmayan çoklu erişim (NOMA) aşağı bağlantı sistemleri için dinamik güç tahsisi önerilmiştir. Kullanıcı anten sayıları ile baz istasyonundaki anten sayıları arasında bir çeşit küme oluşturma yöntemine dayanan araştırmalarında önerdikleri güç tahsisi özömleri ile birlikte genel hücre kapasitesini artırmayı hedeflemişlerdir. Klasik sistemlerle kendi yöntemlerini karşılaştırmışlardır. Dikkate aldıkları metrik hücre kenarı kapsama mesafesine göre spektrum verimliliğin güç tahsisi altında incelenmesidir.

[28]'deki çalışmada tam dubleks küçük hücreli masif MIMO sistemler için güç tahsisi yöntemi önerilmiştir. Spektrum verimliliği sağlamak için önerilen güç tahsisi yönteminde amaç fonksiyonu olarak belirtilen spektrum verimliliği maksimize problemi dışbükey değildir. Dolayısıyla öncelikle bu fonksiyon dışbükey yapılmıştır. Daha sonra gerekli iterasyonlar ile birlikte spektrum verimliliği için güç tahsisi algoritması Karush Kuhn–Tucker noktasına yakınsamıştır. Önerilen algoritma bir biçimli güç tahsisi ile kıyaslanmıştır. Bunun sonucunda önerdikleri algoritmaların daha iyi performans gösterdiğini benzetim sonuçları ile desteklemişlerdir. SNR ve kullanıcı sayısının durumuna göre ortalama toplam oran (bits/s/Hz) kıyaslaması gerçekleştirilmiştir.

[216]'daki çalışmada güç tahsisi algoritması MIMO iki yönlü röle sistemleri için önerilmiştir. Burada hem simetrik hem de asimetrik kaynak durumları dikkate alınmıştır. Ayrıca eğitim ve veri durumlarına göre güç tahsisini gerçekleştirmişlerdir. Önerilen

algoritmayı farklı güç tahsisleri ile kıyaslamışlardır. Kullandıkları verilerdeki zaman dilimlerinin uzunluğunu elde edilebilir oran (b/s/Hz) ile karşılaştırmışlardır.

[217]'deki çalışmada, pilot kirliliğinin olduğu masif MIMO bilişsel radyo ağları için güç tahsisi yöntemi üzerinde durulmuştur. Aşağı bağlantı toplam oranını (bps/Hz) maksimum yapmak hedeflenmiştir. Gerekli olan minimum SINR için kullanmış oldukları kısıtlama önerilen güç tahsisinin tasarımını zorlaştırmaktadır. Ayrıca sadece ikincil kullanıcılar (SUs) için güç tahsisi problemi dikkate alınmıştır.

[218]'deki çalışmada masif MIMO sistemler için güç tahsisi araştırılmıştır. Kanal tahmini ideal olmayıp doğrusal işleme şemaları dikkate alınmıştır. Güç tahsisi spektrum verimliliğini maksimum yapmak için geliştirilmiştir. Önerilen algoritmanın eşit güç tahsisi algoritmasına göre daha iyi performans gösterdiği iddia edilmiştir. Güç tahsisi algoritması, yüksek SNR ve kullanıcıların anten sayısının sonsuz kabul edildiği durumda maksimum oran birleştirme/maksimum oran iletim (MRC/MRT) ve sıfıra zorlamalı alım/sıfıra zorlamalı iletim (ZFR/ZFT) için sunulmuştur.

[63]'teki çalışmada QoS içerisinde yer alan kullanıcıların ve hizmet kalitesi içerisinde olmayan kullanıcıların birlikte olduğu bir masif MIMO sistemi için güç tahsisi algoritması önerilmiştir. Her iki kullanıcı durumlarına göre iki farklı algoritma geliştirilmiştir. Bu iki algoritmanın da Karush-Kuhn-Tucker noktasına yakınsadığı belirtilmiştir. Her iki kullanıcının oranının (bit/s/Hz) CDF'i incelenmiştir. Geliştirmiş oldukları algoritmaları eşit güç tahsisi yöntemi ile kıyaslamışlardır.

[219]'daki çalışmada güç tahsisi için pilot ve veri gücü üzerinde durulmuştur. Her iki durumda da amaç spektrum verimliliğini maksimize etmektir. Pilot güç tahsisi ile birlikte kanal tahmin kalitesi iyileştirilmiştir. Bu spektrum verimliliğini artırmak için dolaylı bir yoldur. Önerdikleri diğer algoritma olan veri gücü tahsisi ile birlikte direkt olarak spektrum verimliliğini artırmışlardır.

[220]'deki çalışmada sıfıra zorlama sinyal sezme tekniğinin kullanıldığı bir masif MIMO sistemi için güç tahsisi analiz edilmiştir. Buradaki masif MIMO sistemi hücresiz bir sistemdir. Güç tahsisinin analizi spektrum verimliliğini artırmak için gerçekleştirilmiştir.

[221]'deki çalışma masif MIMO sistemler için araştırması son zamanlarda artan derin öğrenme (DL) temelli bir güç tahsisi analizidir. Burada aşağı bağlantı durumundaki masif MIMO sistemi düşünülmüştür. Güç tahsisini tüm kullanıcılar için sinir ağları ile belirlemişlerdir. Aşağı bağlantıdaki kullanıcı başına düşen spektrum verimliliğinin

(bit/s/Hz) CDF'i incelenmiştir. Sinir ağı (NN) tabanlı geliştirilen güç tahsisinde çarpımların maksimumu ve maks-min yöntemleri temel alınmıştır. Kullanıcıların konumlarına göre bu iki yöntem ile eğitilen sinir ağı sayesinde güç tahsisi geliştirilmiştir. Geliştirdikleri sonuçlardan maks-min yönteminde öğrenmenin daha zor olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca ön kodlayıcı olarak MRC ve çok hücreli minimum ortalama kare hatası (M-MMSE) kullanılmıştır. M-MMSE'nin MRC'ye göre daha iyi sonuç verdiği belirtilmiştir.

[222]'deki çalışmada da masif MIMO sistemler için derin öğrenme tabanlı güç tahsisi algoritması önerilmiştir. Hücreler arası girişim problemine çözüm üretebilmek adına iki tabanlı bir derin öğrenme kullanılarak güç tahsisi gerçekleştirilmiştir.

[223]'teki çalışma son yıllarda yapılan bir çalışma olup yeni bir metot olan artık yoğun blok (ResDense) yöntemi güç tahsisi için kullanılmıştır. Fakat DNN ile birlikte karmaşıklığın azalmasından dolayı güç tahsisi için klasik yöntemler yerine DNN kullanımı zamanla artacaktır.

[33]'teki çalışmada yazarlar bir masif MIMO sisteminde spektrum verimliliğini maksimize etmek için güç tahsisi algoritması önermişlerdir. Önerilen algoritma ile birlikte mükemmel CSI ve mükemmel olmayan CSI şartı altında baz istasyondaki anten sayısına göre toplam spektrum verimliliği (bit/s/Hz) karşılaştırılmıştır. Geleneksel olarak kullanılan spektrum verimliliği ifadeleri ile güç tahsisi sayesinde elde ettikleri yeni spektrum verimliliği ifadeleri dikkate alınmıştır. Bu işlemleri gerçekleştirirken farklı sayıdaki kullanıcılar düşünülmüştür. Ayrıca önerilen algoritma eşit güç tahsisi algoritması ile kıyaslanmıştır.

[224]'teki çalışmada TDD masif MIMO sistemlerde toplam oran (bit/s/Hz) kazançları için güç tahsisi problemine değinilmiştir. Hücreler arası herhangi bir girişimin olmadığı bir model için güç tahsisi üzerine odaklanılmıştır. Bunun yanı sıra karmaşıklıktan uzak durmak için tek bir zaman diliminde çalışıldığı varsayılmıştır. Önerdikleri algoritmanın eşit güç tahsisine kıyasla daha iyi performans gösterdiği belirtilmiştir. Ama burada dikkat edilmesi gereken nokta bu performansın anten sayısının çok fazla olmadığı durum için geçerli olmasıdır. Baz istasyonunda anten sayısının arttığı bir sistem modelinde eşit güç tahsisinin daha etkili olduğu açıktır. Sonuçlar hem aşağı bağlantı hem de yukarı bağlantı için gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmaların her biri yeni bir güç tahsisi algoritması önermesinden dolayı önemli

çalışmalardır. Her birinin kendi içerisinde avantajlı olduğu noktalar bulunmaktadır. Genel bir kısa değerlendirme yapılırsa; özellikle [210] ve [220]'deki çalışmalarda yazarlar önerileri sayesinde hesaplama karmaşıklığını ve süresini azaltmışlardır. Bu açıdan diğer çalışmalara göre üstünlükleri vardır.

[221]'deki çalışmada son yıllarda yaygın olarak kullanılan derin öğrenme yöntemine başvurulmuştur. Fakat kullandıkları sinir ağında özellikle maks-min fayda güç tahsisinin eğitilmesi için yeteri kadar fazla sayıda parametreye sahip değillerdir. Güncel bir konu hakkında çalışma yapıp böyle bir eksikliğe sahip olmaları çalışmanın olumsuz yanı olarak değerlendirilebilir. Ancak derin öğrenme ile masif MIMO'da özellikle gerçek zamanlı olarak güç tahsisi yöntemlerinin araştırılması gelecek çalışma konuları arasındadır.

7.2.2. Enerji Verimliliği için Güç Tahsisi Stratejileri

Bu kısımda literatürdeki güç tahsisi yöntemleri hakkındaki çalışmalar enerji verimliliği açısından incelenmiştir. Masif MIMO senaryoları dikkate alınarak çalışmaların yaklaşımları değerlendirilmiştir. Bu kısımda bahsedilen çalışmaların genel bir özeti Çizelge 7.2'de gösterilmiştir.

[186]'daki çalışmada, mükemmel olmayan CSI altında bir yukarı bağlantı masif MIMO sisteminde enerji verimliliği maksimize etmek için güç tahsisine değinilmiştir. Optimizasyon probleminin iç bükey olmamasından dolayı optimumu yakın bir güç tahsisi algoritması geliştirilmiştir. Bunun için içbükey-dışbükey prosedür (CCCP) yönteminden yararlanılmıştır. Böylece optimal bir güç tahsisi algoritmasına kıyasla yakın bir spektrum verimliliği performansı elde ettiğini göstermektedir. Enerji verimliliği (bit/Joule/Hz) SNR(dB) durumuna göre farklı kullanıcı sayılarında ve farklı hesaplama hatası değerleri altında değerlendirilmiştir.

[189]'daki çalışmada yazarlar MIMO sistemlerde enerji verimliliğini sağlamak için güç tahsisi yöntemi önermişlerdir. QoS şartlarını dikkate almışlardır. Ayrıca kanal durum bilgisinin sınırlı olduğunu varsaymışlardır. Önerdikleri güç tahsisi eşit olmayan bir güç tahsisi olup matematiksel denklik ve Lagrange çarpanı yaklaşımını kullanmışlardır. Eşit güç tahsisine kıyasla daha iyi sonuçlar elde ettiklerini benzetim sonuçları ile desteklemişlerdir. Enerji verimliliğini (Kbps/Hz/Joule) baz istasyonundaki anten sayısı ve SNR (dB) durumuna göre kıyaslamışlardır.

Çizelge 7.2. Enerji verimliliği için güç tahsisi çalışmalarının özeti.

Kaynak	Metrik	Senaryo	İletim	CSI Bilgisi	Kıyaslama	Sinyal Sezme/Ön Kodlama Tekniği
[28]	EE- Maksimum iletim gücü	Masif MIMO	Aşağı bağlantı, Yukarı bağlantı	Mükemmel olmayan	Eşit Güç Tahsisi	MRC/MRT, ZF
[33]	EE-SE	Çok Yönlü Masif MIMO Röle	Aşağı bağlantı, Yukarı bağlantı	Mükemmel	Eşit Güç Tahsisi	MRC
[186]	EE-SNR	Masif MIMO	Yukarı bağlantı	Mükemmel olmayan	PSO, Standart altı PA	ZF
[189]	EE- Baz istasyonundaki anten sayısı, SNR	Masif MIMO	Yukarı bağlantı	Mükemmel olmayan	Eşit Güç Tahsisi	MMSE
[225]	EE-Anten seçim katsayısı, Donanım bozulma katsayısı, Maksimum güç	Masif MIMO	Yukarı bağlantı	Mükemmel	Maksimum Güç Tahsisi	MRC
[226]	EE- Kullanıcı sayısı, İletilen maksimum güç	Masif MIMO	Aşağı bağlantı	-	Basit güç tahsisi	ZF, Blok Köşegenleştirme (BD)
[231]	EE- İletim gücü, Kullanıcı sayısı, Baz istasyonundaki anten sayısı	Masif MIMO	Aşağı bağlantı	Mükemmel	-	-
[234]	EE- İterasyon sayısı, Toplam güç	mmDalga MIMO-NOMA	Aşağı bağlantı	Mükemmel	Geleneksel Güç Tahsisi Yöntemleri	ZF

Çizelge 7.2. (Devam).

Kaynak	Metrik	Senaryo	İletim	CSI Bilgisi	Kıyaslama	Sinyal Sezme/Ön Kodlama Tekniği
[235]	EE- Kullanıcı sayısı	Masif MIMO	Aşağı bağlantı	Mükemmel	Eşit Güç Tahsisi	ZF
[236]	EE- Maksimum güç	Masif MIMO	Aşağı bağlantı	Mükemmel	-	-
[237]	EE- Kullanıcı sayısı, İterasyon sayısı	Masif MIMO	Aşağı bağlantı	Mükemmel olmayan	Eşit Güç Tahsisi, İkiye Bölme Güç Tahsisi	MRT, ZF
[240]	EE- Maksimum güç	Distributed MIMO	Aşağı bağlantı	Mükemmel	Eşit Güç Tahsisi	-
[242]	EE- SNR, Verici anten sayısı, Kullanıcı sayısı	MIMO Yayın Kanalları	-	Mükemmel	Eşit Güç Tahsisi	Sıfıra zorlama hüzmeleme (ZFBF)

[28]'deki çalışmada masif MIMO sistemler için güç tahsisi yöntemi önerilmiştir. Enerji verimliliğini sağlamak için önerdikleri güç tahsisi algoritmasındaki güç tüketim modelinde radyo frekans devresi güç tüketimi ile iletim güç tüketimi dikkate alınmıştır. Önerilen algoritma bir biçimli güç tahsisi ile kıyaslanmıştır. Bunun sonucunda önerdikleri algoritmaların daha iyi performans gösterdiğini benzetim sonuçları ile desteklemişlerdir. Burada masif MIMO'da tam-dubleks küçük hücre sistemlerine odaklanılmıştır. İterasyon sayısına ve maksimum iletim gücüne göre ortalama enerji verimliliği (bits/J) karşılaştırılmıştır.

[33]'teki çalışmada yazarlar bir masif MIMO sisteminde enerji verimliliğini maksimize etmek için güç tahsisi algoritması geliştirmişlerdir. Enerji verimliliği için önerilen modelde donanımsal güç tüketimini dikkate almışlardır. Her bir kullanıcının güç kısıtlamaları altında geliştirilen algoritma ile farklı kullanıcı ve farklı baz istasyonundaki

anten sayısı düşünülerek toplam spektrum verimliliğın (bit/s/Hz) enerji verimliliğaine (Mbit/Joule) göre kıyaslaması gerçekleştirilmiştir. Her iki durum için eşit güç tahsisi karşılaştırması yapılmıştır.

[225]'teki çalışma, enerji tasarrufunu teşvik etmek için anten seçimini ve güç tahsisi tasarımını ele almaktadır ve ardından tüm masif MIMO yukarı bağlantı ağı için iyi QoS sağlamaktadır. Masif MIMO yukarı bağlantı ağlarında optimum güç kontrol stratejisini elde etmek için kuantumdan ilham alan sosyal duygusal optimizasyon (QSEO) algoritması önerilmiştir. Benzetim sonuçları, önceki stratejilerin sahip olmadığı QSEO'nun büyük avantajlarını gösterdiğini belirtmişlerdir. Çözümlerin çeşitliliğini artırmak ve algoritmanın güçlü arama yeteneğini garanti etmek için iki farklı kuantum evrim kuralı tasarlanmıştır. Kuantum bireyler arasındaki etkileşimler, geleneksel sosyal duygusal optimizasyon (SEO) algoritmasına kıyasla yerel yakınsamayı önleyen, uygulanabilir bölgenin en uygun çözümünü elde etmek için tamamen kullanılmaktadır. Benzetim sonuçları sayesinde, QSEO, önceki stratejilerin sahip olmadığı avantajlara sahiptir. Önerdikleri güç tahsisini maksimum güç tahsisi yöntemi ile karşılaştırmışlardır. Burada enerji verimliliğini (Mbit/Joule) iterasyon sayısı, anten seçim katsayısı, donanım bozulma katsayısı (dB) ve maksimum güç (dBW) durumlarına göre kıyaslamışlardır.

[226]'daki çalışmada, enerji verimliliğini en üst düzeye çıkarmayı amaçlayan kaynak tahsisi ve güç tahsisi algoritması önerilmiştir. Bu öneri kullanıcı ekipmanı (UE) gereksinimlerini ve spektrum verimliliği aynı anda dikkate alarak gerçekleştirilmiştir. Önerilen algoritmanın temel mantığı ilk olarak kullanıcı önceliklerini hesaplamak ve gücün aynı kaynak blokları (RB) üzerindeki UE'ler arasında eşit olarak tahsis edildiği varsayımı altında kaynak bloklarını (RB'ler) farklı UE'lere tahsis etmek için bir UE gruplama yöntemi sağlamaktır. Bundan sonraki aşama, her bir RB'de, enerji verimliliğının iyileştirilmesini gerçekleştirmek için farklı UE'ler arasındaki güç tahsisini hesaplamaktır. Önerdikleri algoritmanın benzetim sonuçları ile sistem kapasitesini, yani spektrum verimliliği üzerinde mükemmel bir performans gösterdiğini ve ayrıca mevcut algoritmalarından daha yüksek enerji verimliliği sağladığını göstermişlerdir. Fakat UE gereksinimlerinin karşılanması algoritmaya bir kısıtlama olarak eklendiği göz ardı edilmemelidir. Önerdikleri güç tahsisi algoritmasını tek yönlü güç tahsisi algoritması ile karşılaştırmışlardır. Bu karşılaştırma, enerji verimliliğının (Mbit/Joule) kullanıcı sayısı ile değişimini sabit bir toplam güç altında yapılmıştır. Ayrıca sabit bir kullanıcı sayısında enerji verimliliğının iletilen maksimum güce göre değişimi izlenmiştir.

[227] ve [228]'deki çalışmalar, spektrum verimliliği dikkate almadan enerji verimliliğini artıran güç tahsisi algoritmalarını sunmaktadır. Fakat bu tür önerilen algoritmalar için yüksek karmaşıklık ve yüksek sinyalleşme ile ek bir yük olarak karşılaşılmaktadır. [229]'daki çalışma, enerji verimliliği optimize edilmiş güç tahsisinin klasik modelini araştırmıştır ve düşük karmaşıklıkta optimum çözümü sağladığı belirtilmiştir. Ancak sadece enerji verimliliğinin optimizasyonu dikkate alındığı unutulmamalıdır.

[230]'teki çalışmada, enerji verimli adaptif bir güç tahsisi algoritması önerilmiştir. Önerilen güç tahsisi algoritması eşit güç tahsisi algoritması (EPA) ile kıyaslanmaktadır. Bunun sonunda EPA'ya göre enerji verimliliği açısından daha yüksek performans gösterildiği belirtilmiştir.

[231]'deki çalışmada, enerji verimliliğini en üst düzeye çıkaran masif MIMO sisteminde temel bir ölçü olarak tanımlanan güç tahsisi sorununa bir çözüm sağlamayı amaçlamıştır. Bunun için enerji verimli düşük karmaşıklık algoritması (EELCA) önermişlerdir. Masif MIMO aşağı bağlantı sisteminde EE'yi maksimum yapmak için önerilen bu algoritma Newton yöntemleri ve Lagrange ayırıştırma yöntemi dayanan bir çözümü sunmaktadır. Performans metriği olarak iletim gücüne (dBm) göre enerji verimliliği (Mbits/Joule) kıyaslanmıştır. Ek olarak kullanıcı sayısına ve baz istasyondaki anten sayısına göre de enerji verimliliği önerilen algoritma altında incelenmiştir.

[232]'deki yazarlar, güç tahsisi sorununu ele alırken enerji verimliliğini en üst düzeye çıkarmayı hedeflemişlerdir. Bunu gerçekleştirmek için belirli bir düşük karmaşıklık algoritması kullanmışlardır. Hem güç kısıtlamasını hem de veri hızı kısıtlamasını dikkate almışlardır. [233]'teki çalışma DL tek hücreli masif MIMO sisteminde güç tahsisini ele almaktadır. Ağ kapasitesini artırmayı amaçlamışlardır. Ayrıca güç tüketimini de azalttıklarını belirtmişlerdir. Bunun için anten dizilerinin sayısını ve kullanıcı sayısını artırmışlardır.

[234]'teki çalışmada, MIMO-NOMA sistemleri için enerji verimli bir güç tahsisi yöntemi önerilmiştir. Burada milimetre dalga (mmWave) ışın alanı dikkate alınmıştır. Işın seçimi sonuçlarının durumuna göre ZF hüzmleme yöntemi ile ön kodlama matrisleri oluşturulmuştur. Sonrasında ise EE maksimizasyon optimizasyon problemini kesirli bir programlama olarak formüle etmişlerdir. Farklı şartlar altında, enerji verimliliğini (bit/Joule/Hz) iterasyon sayısı ve toplam güç (dBm) bakımından kıyaslamışlardır. Ayrıca kullanıcı sayısına göre de enerji verimliliği sonuçları gösterilmiştir.

[235]'teki çalışmada aşağı bağlantı masif MIMO sistemler için güç tahsisi yöntemi önerilmiştir. Mükemmel kanal durum bilgisinin varsayıldığı bu çalışmada enerji verimli optimizasyon problemi doğrusal olmayan kısıtlamalar altında ele alınmıştır. Bu kısıtlamalar çeşitli güç kısıtlamalarıdır. Ayrıca QoS de dikkate alınmıştır. Güç tahsisine ek olarak anten seçimini de incelemişlerdir. Böylece ortak anten seçimi ve güç tahsisi (JASPA) şeması ortaya koymuşlardır. Lagrange ikili yöntemi ile birlikte kapalı form ifadelerini türetmişlerdir. Yinelemeli algoritma sayesinde maksimum enerji verimliliği elde edilmiştir. Genel olarak literatürdeki çalışmalar anten seçimi ve güç tahsisini ayrı ayrı ele almışlardır. Bu çalışmada ise ortak anten seçimi ve güç tahsisi ele alınmasından dolayı önemlidir. Önerdikleri algoritmaları Lagrangian, ikiye bölme ve eşit güç tahsisi metodu ile karşılaştırmışlardır. Performans metriği kullanıcı sayısına göre enerji verimliliği (bits/Joule) incelemesidir.

[236]'da yazarlar, enerji verimliliğine odaklanan bir güç tahsisi algoritması önermişlerdir. Dikkate aldıkları nokta hücre içindeki kullanıcı sayılarıdır. Hücre içindeki kullanıcı sayılarının toplam iletilen güçle orantılı olduğunu vurgulamışlardır. Maksimum güç (W) durumuna göre enerji verimliliği (bits/Hz/Joule) kıyaslaması gerçekleştirilmiştir.

[237]'deki çalışmada yazarlar MIMO sistemler için enerji açısından verimli bir güç tahsisi yöntemi önermişlerdir. Lagrangian ikili yaklaşımı temeline dayalı olan önerdikleri algoritmayı dış bükey olmayan bir optimizasyon problemi olarak belirtmişlerdir. Çalışma mükemmel olmayan kanal durum bilgisi varsayımı altında gerçekleştirilmiştir. Önerdikleri algoritmaları ikiye bölme güç tahsisi ve eşit güç tahsisi yöntemi ile kıyaslamışlardır. Kullandıkları performans metriği ise enerji verimliliğinin (bits/Joule) kullanıcı sayısına ve iterasyon sayısına göre incelenmesidir.

[238]'de yazarlar masif MIMO heterojen ağları için ZF ulaşılabilir kapasite için bir güç dağıtım şeması tasarladılar. [148]'de ise MRT ön kodlamalı masif MIMO sistemleri için enerji verimliliğini maksimize etmek yeni bir güç tahsisi yöntemi önerilmiştir. [239]'daki çalışmada, masif MIMO bilişsel radyo ağlarının yukarı bağlantı durumu için güç tahsisi algoritması önerilmiştir. Enerji verimliliği için en iyi maks-min fayda performansını araştırmışlardır.

[240]'daki çalışmada yazarlar birden fazla güç tahsisi algoritması önermişlerdir. Amaçları dağıtılmış MIMO sistemlerinde enerji verimliliği sağlamaktır. Bu sistem için hüzmeleme ve anten seçimlerini de dikkate almışlardır. Geliştirdikleri ilk algoritma

gradyan projeksiyonu yöntemine dayanmaktadır. Fakat diğerlerine göre daha fazla karmaşıklığa sahiptir. Karmaşıklığı azaltmak için ikinci bir güç tahsisi algoritması geliştirmişlerdir. İkinci algoritmanın da benzer performansa sahip olduğu belirtilmiş olup Lambert fonksiyonu veya ikiye bölme yöntemi kullanılmıştır. Enerji verimliliğinin (bit/Joule/Hz) toplam maksimum güç (W) ile kıyaslanması performans metrikleridir.

[241]'de önerilen güç tahsisi algoritması masif MIMO sistemlerde enerji verimliliğini maksimum yapmak için gerçekleştirilmiştir. Konveks olmayan güç tahsisi problemi QoS ve iletim güç kısıtlamaları altında gerçekleştirilmiştir. Kanal durum bilgisi MMSE ile elde edilmiştir. Ayrıca doğrusal ZF kullanılmıştır. Optimum güç tahsisi ve eşit güç tahsisi tabanlı geliştirilen algoritmalar birbirleriyle kıyaslanmıştır. Bu kıyaslamalarda performans metriği olarak global enerji verimliliğinin (Mbits/Joule) iterasyon sayısına, maksimum iletim güç kısıtlamasına (dBm) ve maksimum toplam iletim güç kısıtlamasına (dBm) ve QoS eşiğine (bit/s/Hz) göre karşılaştırılması temel alınmıştır.

[242]'deki çalışmada, yazarlar MIMO sistemlerde enerji verimliliğini artırmak için güç tahsisi algoritması önermişlerdir. Bunun için QoS şartlarını dikkate almışlardır. Elde ettikleri optimizasyon probleminin çözümü için Lagrangian yöntemini kullanmışlardır. Önerilen algoritmanın karşılaştırılması eşit güç tahsisi ile yapılmıştır. Daha iyi sonuçların elde edildiği benzetim ile gösterilmiştir. Enerji verimliliğini (bits/Joule/Hz) SNR(dB), verici anten sayısı, maksimum SNR (dB) ve kullanıcı sayısına göre kıyaslamışlardır.

Enerji verimliliğine odaklanan güç tahsisi algoritmalarının genel karşılaştırmaları Çizelge 7.2'de verilmiştir. Burada bahsedilen çalışmaların güç tahsisi yöntemleri açısından her birinin ayrı ayrı katkıları mevcuttur. Bazı odaklanmadıkları veya dikkate almadıkları noktalar olmakla beraber genelde çalışmaların amacı güç tüketimini azaltabilmektir. Fakat özellikle [225]'deki çalışma güç tahsisi algoritması ile enerji verimliliği sağlarken diğer çalışmalardan farklı olarak masif MIMO sistemlerdeki enerji tüketiminin yanında donanım bozukluğu ve iletim verimliliği gibi noktaları da dikkate almaktadır. Bu sebepten dolayı daha kapsamlı bir çalışma olduğu anlaşılmaktadır.

7.3. EŞİT, MAKS-MİN FAYDA VE SINR ÇARPIMLARININ MAKSİMUMU GÜÇ TAHSİSİ YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde önerilen güç tahsisi algoritmalarının genellikle eşit güç tahsisi, maks-min fayda güç tahsisi, SINR çarpımların maksimumu güç tahsisi gibi temel yöntemlerle karşılaştırıldığı açıktır. Bu kısımda, kullanıcı başına düşen spektrum verimliliğin (bit/s/Hz) CDF durumu performans metriği altında bu üç temel güç tahsisi algoritmasının birbirleriyle karşılaştırılması MRC, ZF ve MMSE ön kodlama teknikleri için yukarı bağlantı iletimi dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Bu kısımda belirtilen denklemlerde kullanılan sembollerin ifadeleri Çizelge 7.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 7.3. Kullanılan sembollerin ifadesi.

Sembol	İfade
$\rho_{11}, \dots, \rho_{LK_L}$	Yukarı bağlantı iletim gücü
α_{jk}	Ortalama kanal kazancı
ρ_{li}	Herhangi bir kullanıcının iletim gücü
b_{jk}	Ortalama girişim kazancı
γ	Maks-Min fayda güç tahsisi SINR
P_{max}^{DL}	Maksimum yukarı bağlantı iletim gücü
σ_{UL}^2	Gürültü varyansı

7.3.1. Eşit Güç Tahsisi

Eşit güç tahsisi toplam gücün eşit bir şekilde paylaştırıldığı bir yöntemdir. Bu yöntemin temel analizleri hakkındaki bilgiler önceki kısımlarda verilmiştir.

7.3.2. Maks-Min Fayda Güç Tahsisi

Maks-min fayda güç tahsisi yöntemini amacı tüm kullanıcılar arasındaki en kötü SINR'i maksimum yapmaya çalışmaktır [243]. Bu yöntem masif MIMO sistemlerde çeşitli performans iyileştirmeleri için kullanılmaktadır [160]–[163]. Maks-min fayda güç tahsisi yönteminin temel matematiksel işlemi [153], [155], [163], [195], [243]–[245]'teki çalışmalara benzer olarak aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\underbrace{\max}_{\rho_{11} \geq 0, \dots, \rho_{LK_L} \geq 0, \gamma \geq 0} \min \gamma \quad (7.17)$$

$$\frac{\rho_{jk} \alpha_{jk}}{\sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^{K_l} \rho_{li} b_{lij} + \sigma_{UL}^2} \geq \gamma, j = 1, \dots, L, k = 1, \dots, K_j \quad (7.18)$$

$$\sum_{k=1}^{K_j} \rho_{jk} \leq P_{max}^{UL}, j = 1, \dots, L \quad (7.19)$$

Temel olarak verilen maks-min fayda güç tahsisi algoritması iyileştirilmesi istenilen performans kriterine uygulanabilmektedir. Bununla alakalı literatürde ilgili çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmalar önceki bölümlerde bahsedilmiştir. Maks-min fayda güç tahsisi algoritmasının dezavantajı, algoritma en kötü kullanıcının performansını iyileştirmeye odaklanmasına rağmen sistemin genel ağ veriminde bir kayıp oluşturmaktadır [245].

7.3.3. SINR Çarpımların Maksimumu Güç Tahsisi

SINR çarpımlarının maksimumu güç tahsisi algoritması spektrum verimliliği artırmak için masif MIMO sistemlerde düşünülmektedir. Çünkü spektrum verimliliği SINR'ın logaritmik bir ifadesine bağlıdır [246]. Spektrum verimliliği ifadelerinin ayrıntılı analizleri [135]'teki çalışmada incelenebilir. Güç tahsisi yöntemlerinin en basit olanı eşit güç tahsisidir. Bunun yanında toplam spektrum verimliliği ve fayda arasında bir denge sağlayan SINR çarpımlarının maksimumu güç tahsisi yöntemi de mevcuttur [247]. Amaç, tüm sistemdeki kullanıcıların SINR çarpımlarını maksimum yapmaktır. SINR çarpımlarının maksimumu güç tahsisi yönteminin matematiksel ifadesi [221], [246]–[248]'deki çalışmalara benzer şekilde aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\underbrace{\max}_{\rho_{11} \geq 0, \dots, \rho_{LK_L} \geq 0} \prod_{j=1}^L \prod_{k=1}^{K_j} \frac{\rho_{jk} \alpha_{jk}}{\sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^{K_l} \rho_{li} b_{lij} + \sigma_{UL}^2} \quad (7.20)$$

$$\sum_{k=1}^{K_j} \rho_{jk} \leq P_{max}^{UL}, j = 1, \dots, L \quad (7.21)$$

7.3.4. Yukarı Bağlantı Spektrum Verimliliği

Güç tahsisi yöntemlerinin karşılaştırılmasına yukarı bağlantı masif MIMO sistemlerinde spektrum verimliliği incelenmesi planlandığından dolayı bu kısımda yukarı bağlantı spektrum verimliliği ifadeleri hakkında bilgiler yer almaktadır. Bu ifadeler yeni denklemler olmayıp literatürdeki çoğu çalışmada detaylı bir şekilde analizi bulunabilmektedir [4], [50], [63], [127], [133], [153], [163], [249], [250]. Bu çalışmalara benzer olarak masif MIMO için yukarı bağlantı spektrum verimliliği ifadesi [244]'te sınırları belirtildiği gibi aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$SE_{jk}^{UL} = \left(1 - \frac{\tau_p}{\tau_c}\right) \log_2(1 + SINR_{jk}^{UL}) \text{ [bit/s/Hz]} \quad (7.22)$$

τ_c sembolü tutarlılık aralığı, τ_p pilot dizilerinin uzunluğudur [247].

7.3.4.1. Yukarı Bağlantı İletimi

Masif MIMO yukarı bağlantı iletiminde l hücresi baz istasyonu j 'deki alınan sinyal vektörünün ifadesi [127], [163]'te belirtildiği gibi yazılabilir.

$$\mathbf{y}_j = \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^{K_l} \mathbf{h}_{jk}^l s_{lk} + \mathbf{n}_j \quad (7.23)$$

$\mathbf{n}_j$ ortalaması sıfır, varyansı σ_{UL}^2 olan gürültü vektörüdür. s_{lk} l hücresindeki k kullanıcısı için yukarı bağlantı sinyalidir. Bu sinyalin gücü ρ_{lk} olmak üzere, $\mathbb{E}\{|s_{lk}|^2\} = \rho_{lk}$ ifadesi sağlanmaktadır. Denklem (7.23)'teki ifade [153]'teki çalışmaya benzer şekilde aşağıdaki gibi düzenlenebilir.

$$\mathbf{y}_j = \underbrace{\sum_{k=1}^{K_j} \mathbf{h}_{jk}^j s_{jk}}_{\text{İstenilen sinyal}} + \underbrace{\sum_{l=1, l \neq j}^L \sum_{i=1}^{K_l} \mathbf{h}_{li}^j s_{li}}_{\text{Hücreler arası girişim}} + \underbrace{\mathbf{n}_j}_{\text{Gürültü}} \quad (7.24)$$

İletim sırasında kullanılacak $\mathbf{v}_{jk}$ birleştirme vektörü ile birlikte bu ifade aşağıdaki gibi yazılmaktadır [251].

$$\mathbf{v}_{jk}^H \mathbf{y}_j = \underbrace{\mathbf{v}_{jk}^H \mathbf{h}_{jk}^j s_{jk}}_{\text{İstenilen sinyal}} + \underbrace{\sum_{i=1, i \neq k}^{K_j} \mathbf{v}_{jk}^H \mathbf{h}_{ji}^j s_{ji}}_{\text{Hüvre içi girişim}} + \underbrace{\sum_{l=1, l \neq j}^L \sum_{i=1}^{K_l} \mathbf{v}_{jk}^H \mathbf{h}_{li}^j s_{li}}_{\text{Hücreler arası girişim}} + \underbrace{\mathbf{v}_{jk}^H \mathbf{n}_j}_{\text{Gürültü}} \quad (7.25)$$

Alınan sinyalin en son ifadesi Denklem (7.25) sırasıyla, istenilen sinyal, hücre için girişim, hücreler arası girişim ve gürültü toplamından oluşmaktadır. Bu sonuçlar ile birlikte yukarı bağlantı için SINR ifadesi'deki aşağıdaki gibi belirtilmektedir [135], [163]. Bu sonuçların detaylı kanıtları verilmiş olan referanslardan görülebilir.

$$SINR_{jk}^{UL} = \frac{\rho_{jk} |\mathbb{E}\{\mathbf{v}_{jk}^H \mathbf{h}_{jk}^j\}|^2}{\sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^{K_l} \rho_{li} \mathbb{E}\{|\mathbf{v}_{jk}^H \mathbf{h}_{li}^j|^2\} - \rho_{jk} |\mathbb{E}\{\mathbf{v}_{jk}^H \mathbf{h}_{jk}^j\}|^2 + \sigma_{UL}^2 \mathbb{E}\{\|\mathbf{v}_{jk}\|^2\}} \quad (7.26)$$

Denklem (7.26)'daki sonuç Denklem (7.22)'de yerine yazılırsa Masif MIMO sistemler için yukarı bağlantı iletimi için spektrum verimliliği ifadesi elde edilir.

7.3.4.2. Sinyal Sezme Teknikleri

SINR ifadesinde ve dolayısıyla spektrum verimliliği analizinde, sinyal sezme teknikleri ile farklı sonuçlar ortaya çıkmaktadır. Çeşitli sinyal sezme tekniklerine [5], [142], [221], [252]–[254] gibi çalışmalardan ulaşılabilir. En çok kullanılan yaygın teknikler MRC, ZF ve MMSE'dir [255]. Bu sebepten dolayı bu kısımda yaygın olarak kullanılan teknikler dikkate alınmıştır.

- **Maksimum Oran Birleştirme:** MRC veya aynı zamanda MF olarak da bilinen, en düşük karmaşıklık veri sezme yöntemlerinden biridir [48]. MRC, sinyalin orijinal şeklini geri yüklemek için kullanılır. MRC'de alınan tüm sinyaller birleştirilir, yani birbirine eklenir. Sinyali aldıktan sonra, alınan her sinyal bir ağırlık faktörü ile çarpılır ve sonra birleştirilir. Sinyalin genliği, ağırlık faktörü ile doğru orantılıdır. Her antenden alınan her sinyal, kanalın gücüne ve fazına göre ağırlıklandırılır. Zayıf genlikli sinyalin zayıflatılmasını ve güçlü sinyalin daha da güçlendirilmesini sağlar. Mevcut tüm anten sinyalleri, sinyal ve gürültü terimleri arasında maksimum oran sağlamak için birleştirilir. Bu, bir alıcının yalnızca gerekli sinyallerin genliğini veya gücünü artırabilmesidir. MRC'de doğrusal birleştirme matrisi $\mathbf{G}$, $\mathbf{G} = \mathbf{H}$ kullanılarak seçilir. Böylece MRC diğer alt akışlardan gelen paraziti tamamen gürültü olarak ele alır. MRC detektörü için BS,

K akışlarının her birinin alınan SNR'sini maksimize etmeyi amaçlar, ancak çok kullanıcı girişimin etkisini göz ardı eder [256].

- Sıfıra Zorlama: ZF sezme, gürültü geliştirmeden bağımsız olarak kullanıcılar arası paraziti tamamen ortadan kaldırmak amacıyla kullanılan bir doğrusal sezme yöntemidir, yani kullanıcılar arası girişimi hesaba katar, ancak gürültünün etkisini ihmal eder. Bu, matris ters çevirme kullanan ve paraziti ortadan kaldıran basit bir doğrusal dedektördür. Bazen, kanal spektrumunun en yüksek zayıflamaya sahip olduğu frekanslarda gürültü artar. Bu nedenle ZF, gürültü artışından etkilenmektedir. Bu sezme yöntemi, zayıf bit hata oranı performansına da sahiptir. Girişim, alınan sinyalin kanal matrisinin sözde tersi ile çarpılmasıyla bastırılır. Yani, ZF, girişimi sıfıra zorlayan doğrusal bir sezme şemasıdır. ZF, MF dedektöründen daha iyi performans gösterir ve alınan sinyal-parazit oranını maksimize etmeyi amaçlar. ZF mekanizması, $\mathbf{H}$ kanal matrisinin tersine çevrilmesine ve böylece kanalın etkisinin kaldırılmasına dayanır. ZF dedektörünün eşitleme matrisi [88]'de belirtildiği gibi $\mathbf{G} = \mathbf{H}(\mathbf{H}^H \mathbf{H})^{-1}$ verilmektedir.
- Minimum Ortalama Kare Hatası (MMSE): MMSE aynı zamanda hem gürültüyü hem de girişimi azaltan doğrusal dedektördür. Dolayısıyla, MMSE dedektörü, gürültü ve sinyal istatistiklerini hesaba katarak dedektörün genel MIMO sezme performansını iyileştirebilen ZF sezmesinin özellikle yararlı bir uzantısı olarak görülebilir. Gürültüyü ve her bir bileşen üzerinde ayrı ayrı çalışmayı dikkate alarak, alınan ve iletilen vektörler arasındaki kare hatasını en aza indirir. MMSE dedektörünün ana fikri, iletilen $\mathbf{x}$ ile tahmini sinyal $\hat{\mathbf{x}}$ arasındaki ortalama kare hatasını (MSE) en aza indirmektir [257]. Burada birleştirme matrisi $\mathbf{G} = (\mathbf{H}\mathbf{P}^{ul}\mathbf{H}^H + \sigma^2\mathbf{I})^{-1}\mathbf{H}$ olarak gösterilmektedir [142]. $\mathbf{H} = [\mathbf{h}_1, \mathbf{h}_2, \dots, \mathbf{h}_K]$ olmak üzere tüm kullanıcıları temsil etmektedir. σ^2 gürültü varyansıdır. $\mathbf{P}^{ul}$ yukarı bağlantı iletim gücüdür.

Bu tekniklerdeki bilgiler ile birlikte yukarı bağlantı SINR ifadeleri her bir sinyal sezme tekniğine göre tekrar yeniden düzenlenmektedir. Bu işlemlerin detaylı bir şekilde analizi [4], [5], [28], [63], [135], [163]'te verilmektedir. Bu bilgiler altında sinyal sezme tekniklerinin matrislerinin genel ifadeleri Çizelge 7.4'te gösterilmektedir.

Çizelge 7.4. Sinyal sezme ifadeleri.

Sembol	İfade
MRC	$\mathbf{H}$
ZF	$\mathbf{H}(\mathbf{H}^H \mathbf{H})^{-1}$
MMSE	$(\mathbf{H}^H \mathbf{H} + \rho^{-1} \mathbf{I})^{-1} \mathbf{H}^H$

CSI durumuna göre bu teknikler için karşılık gelen SINR ifadeleri aşağıdaki gibidir.

$$SINR_{MRC}^{Mükemmel\ CSI} = \frac{\rho_{jk}(M-1)\beta_{kjl}}{\rho_{jk} \sum_{i \neq k}^K \beta_i + 1} \quad (7.27)$$

$$SINR_{MRC}^{Mükemmel\ Olmayan\ CSI} = \frac{\tau \rho_{jk}(M-1)(\beta_{kjl})^2}{(\tau \rho_{jk} \beta_{kjl} + 1) \sum_{i \neq k}^K \beta_i + (\tau + 1)\beta_{kjl} + \frac{1}{\rho_{jk}}} \quad (7.28)$$

$$SINR_{ZF}^{Mükemmel\ CSI} = (\rho_{jk}(M-K)\beta_{kjl}) \quad (7.29)$$

$$SINR_{ZF}^{Mükemmel\ Olmayan\ CSI} = \frac{\tau \rho_{jk}(M-1)(\beta_{kjl})^2}{(\tau \rho_{jk} \beta_{kjl} + 1) \sum_{i=1}^K \frac{\beta_i}{\tau \rho_{jk} \beta_i + 1} + (\tau)\beta_{kjl} + \frac{1}{\rho_{jk}}} \quad (7.30)$$

$$SINR_{MMSE}^{Mükemmel\ CSI} = \left\{ \left(\frac{(M-K+1+(K-1)\mu)^2}{M-K+1+(K-1)\kappa} - 1 \right) \frac{M-K+1+(K-1)\kappa}{M-K+1+(K-1)\mu} \rho_{jk} \beta_{kjl} \right\} \quad (7.31)$$

$$SINR_{MMSE}^{Mükemmel\ Olmayan\ CSI} = \left\{ \left(\frac{(M-K+1+(K-1)\hat{\mu})^2}{M-K+1+(K-1)\hat{\kappa}} - 1 \right) \frac{M-K+1+(K-1)\hat{\kappa}}{M-K+1+(K-1)\hat{\mu}} \omega \hat{\beta}_{kjl} \right\} \quad (7.32)$$

Burada M baz istasyonundaki anten sayısı olup K kullanıcı sayıdır. ρ_{jk} iletim gücünü, β_{kjl} büyük ölçek sönümlleme katsayısını, τ pilotlar için kullanılan sembol sayısını, β_i ise varyansı temsil etmektedir. μ , κ , $\hat{\mu}$, $\hat{\kappa}$, $\hat{\beta}_{kjl}$ ve ω değerlerinin hesaplanması [5]'te verilmiştir. Bu denklemler doğrultusunda yukarı bağlantı için her bir birleştirme tekniğine göre spektrum verimliliği ifadeleri son halini almış olur. Bir sonraki aşama spektrum verimliliği ifadelerinin düşünülen güç tahsisi durumuna göre benzetim sonuçlarının incelenmesidir.

7.3.5. Yukarı Bağlantı Güç Tahsisi

Masif MIMO sistemlerde yukarı bağlantı iletimi için spektrum verimliliği güç tahsisi ile artırmak için Denklem (7.26)'da verilmiş olan SINR ifadesi dikkate alınmıştır. Çünkü spektrum verimliliğini artırmak demek SINR ifadesini artırmak demektir. Dolayısıyla bu durum aşağıdaki şekliyle ifade edilmektedir.

$$\begin{aligned} & \max_{\rho_{11} \geq 0, \dots, \rho_{LK_L} \geq 0} \quad SINR_{11}^{UL}, \dots, SINR_{LK_L}^{UL} \\ & s. t. \quad \sum_{k=1}^{K_j} \rho_{jk} \leq P_{max}^{UL}, j = 1, \dots, L \end{aligned} \quad (7.33)$$

Bu ifade sezme şemaları dikkate alınmak iseniyorsa şemalara göre kullanılabilir. Düşünülen güç tahsisi algoritması veya geliştirilen güç tahsisi yöntemi belirlenen kısıtlar çerçevesinde uygulanabilmektedir. Bu çalışmada literatürde temel olarak bahsedilen üç farklı güç tahsisi algoritmasının sonuçlarını içermektedir.

Eşit güç tahsisi yönteminde tüm kullanıcılar için toplam gücün tüm kullanıcılara eşit bir şekilde paylaştırılma durumu söz konusudur. Dolayısıyla SINR ifadelerinde iletim gücü olarak belirtilen yerler bu durum dikkate alınarak gerçekleştirilir.

Denklem (7.17), Denklem (7.18) ve Denklem (7.19) olarak belirtilen maks-min fayda güç tahsisi yönteminde genel amaç $SINR_{jk}^{UL} \geq \gamma$ karşılık gelen γ değerini maksimuma çıkarmaktır. Dolayısıyla bu şartları sağlayan tüm noktaların değerini bulmak gereklidir. Böyle bir yaklaşım için CVX programı [258] kullanılabilir. Bunun yanı sıra bisection yöntemi [259] ile de çözüm mümkündür. Bu yöntemler ile alakalı çözümlere Masif MIMO sistemi için aşağı bağlantının dikkate alındığı [135], [254]'teki çalışmalardan ulaşılabilmektedir.

SINR ifadelerinin çarpımlarının maksimumu güç tahsisi yöntemi Denklem (7.20) ve Denklem (7.21)'de bahsedilmiştir. Denklem (7.17), Denklem (7.18) ve Denklem (7.19)'daki algoritmada çözülmesi gereken yaklaşımlar bu yöntemde de mevcuttur. Farklı olarak bu yöntemde geometrik program aracılığıyla bir çözüm mümkündür [135]. Geometrik programın dikkate alınmasında en büyük etken bu programın dışbükey bir program haline dönüştürülebilmesidir.

7.3.6. Benzetim Sonuçları

Bu kısımda bir önceki bölümde bahsedilen yukarı bağlantı iletiminde spektrum verimliliği için belirtilen güç tahsisi algoritmalarının karşılaştırılması gerçekleştirilmiştir. Bu karşılaştırmalar için gerekli olan analizlerin ve benzetimler için gerekli olan aşamaların detaylıca açıklandığı [135]'teki çalışmada da belirtildiği üzere çok hücreli masif MIMO sistemi için düşünülen parametreler Çizelge 7.5'teki gibi belirtilmiştir.

Çizelge 7.5. Kullanılan parametreler.

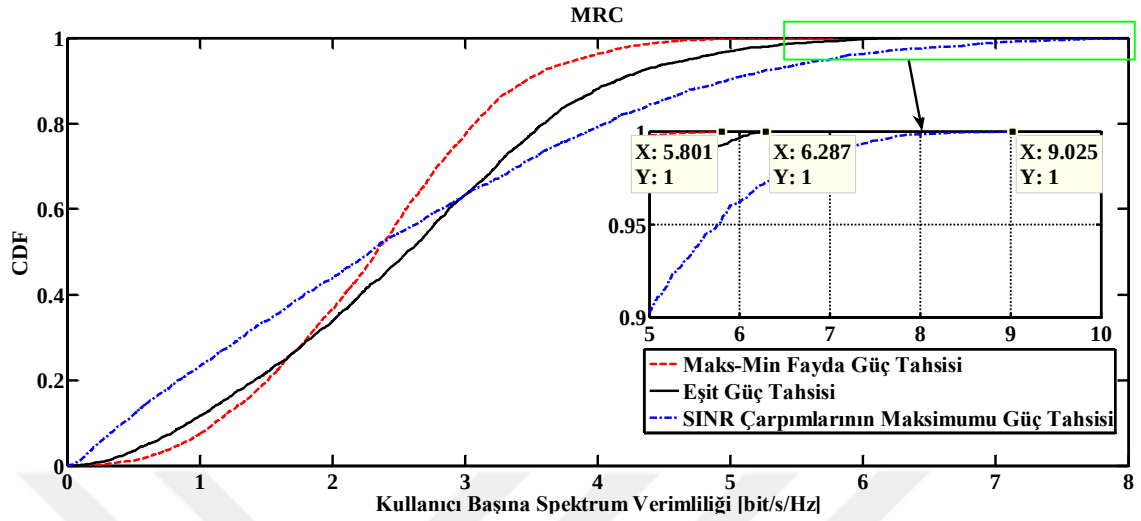
Parametre	Değer
Baz istasyonundaki anten sayısı, M	100
Her bir hücredeki kullanıcı sayısı, K	10
Baz istasyonu sayısı, L	16
Kullanılan pilot yeniden kullanım faktörü, f	2
Kullanıcı başına toplam iletim gücü, ρ (mW)	100
Tutarlılık bloğunun uzunluğu, τ_c	200

Monte Carlo benzetim sonuçlarının verildiği bu kısımda MRC, ZF ve MMSE şemaları çok hücreli bir masif MIMO sistemi için dikkate alınmıştır. Hücre sayısının 16 olarak düşünüldüğü bu sistemde her bir baz istasyonu sistem merkezinde yer almaktadır. Her bir hücrede bulunan kullanıcı sayısı 10 olmak üzere rastgele konumlandırıldığı varsayılmaktadır. Baz istasyonundaki anten sayısı ise 100 olarak belirlenmiştir.

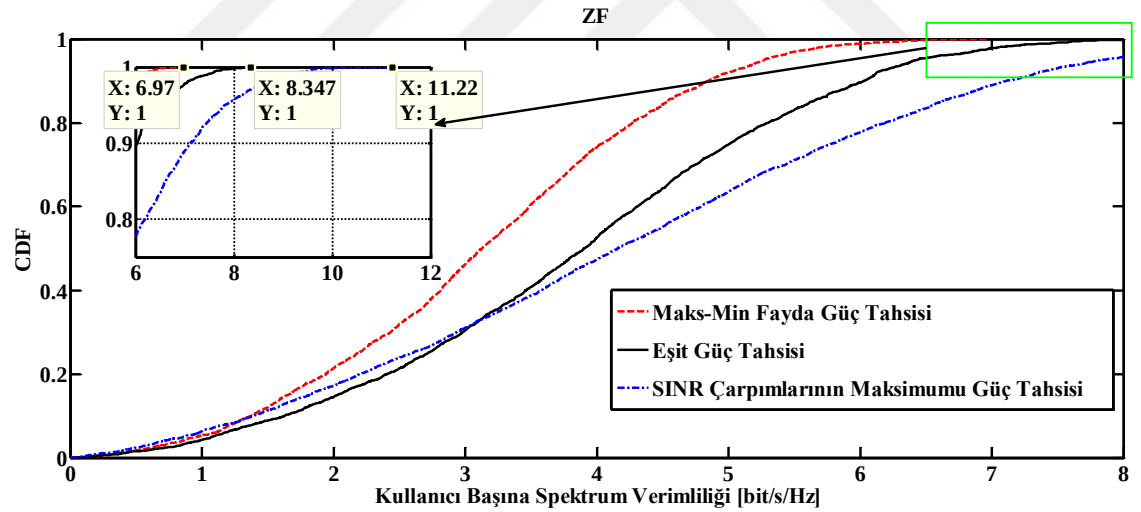
Benzetimlerde kullanılan performans metriği olarak kullanıcı başına düşen spektrum verimliliğin (bit/s/Hz) CDF'i dikkate alınmıştır. CDF, spektrum verimliliğin rastgele kullanıcı konumlarına bağlı olarak nasıl değiştiğini gösterir. Bazı kullanıcılar iletişim kalitesi bakımından "iyi" konumlardadır ve daha spektrum verimlidir ve diğer kullanıcılar "kötü" konumlardadır ve daha az spektrum verimlidir. Farklı güç tahsis algoritmaları, CDF eğrilerini farklı şekillerde oluşturmaya çalışır. Örnek olarak maks-min fayda güç tahsisi çözümü, kullanıcılar arasındaki spektrum verimliliği farklılıklarını sınırlamak için eğrileri neredeyse dikey hale getirmeye çalışır. Çünkü amaç iyi ve kötü konumlardaki kullanıcılar için spektrum verimliliği benzer hale getirmeye çalışmaktır.

Baz istasyonundaki anten sayısı 100, her bir hücredeki kullanıcı sayısı 10 ve toplam hücre sayısının 16 olduğu masif MIMO sisteminde kullanıcı konumlarının rastgele dağılımları

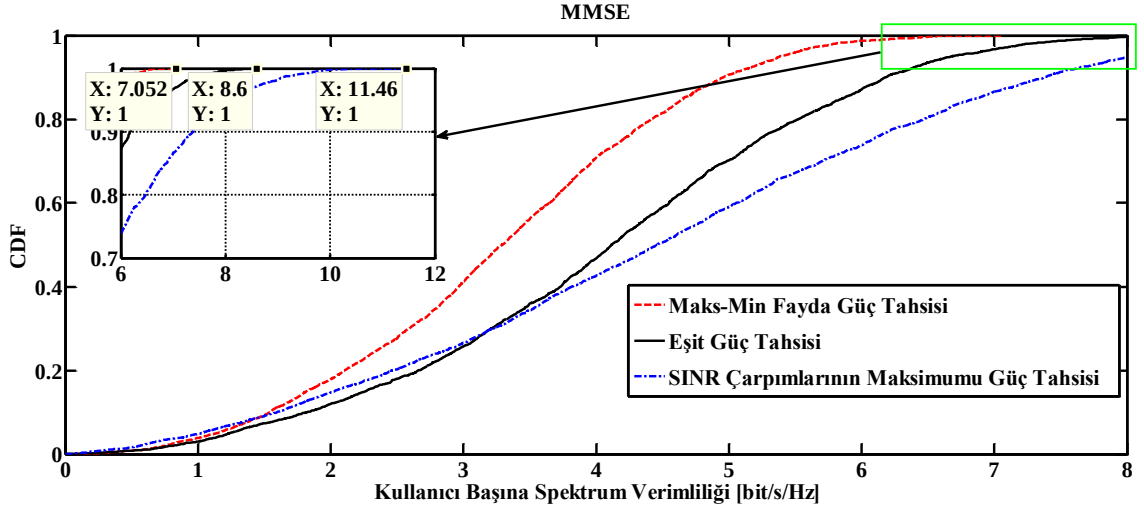
ile birlikte oluşturulan bir benzetimde Şekil 7.2, Şekil 7.3 ve Şekil 7.4 spektrum verimliliğinin CDF'sini sırasıyla MRC, ZF ve MMSE şeması altında göstermektedir.



Şekil 7.2. $M=100$, $K=10$, $L=16$ için MRC ile spektrum verimliliği CDF grafiği.



Şekil 7.3. $M=100$, $K=10$, $L=16$ için ZF ile spektrum verimliliği CDF grafiği.



Şekil 7.4. $M=100$, $K=10$, $L=16$ için MMSE ile spektrum verimliliği CDF grafiği.

Şekiller incelendiğinde görülmektedir ki en iyi sonuçlar toplamda MMSE için sağlanmaktadır. Bu şemanın MRC ve ZF'ye göre üstün olduğu çeşitli çalışmalarda da belirtilmektedir [5], [135], [252]. Kalan diğer iki şema olan MRC ve ZF'nin kıyaslanması yapılırsa [210], [218], [237]'deki çalışmalara benzer şekilde ZF'nin MRC'den daha etkili olduğu anlaşılmaktadır. Şekiller üzerinden incelendiğinde güç tahsisi algoritmalarına göre her bir şema için spektrum verimliliği CDF'sinin 0.95 ve 0.05 durumundaki sonuçları sırasıyla, Çizelge 7.6, Çizelge 7.7 ve Çizelge 7.8'de gösterilmektedir. Tüm kullanıcıların dahil edildiği durum için sonuçlar şekiller içerisinde yer almaktadır.

Çizelge 7.6. MRC için spektrum verimliliği değerleri.

Parametre	CDF Noktası	
	0.95	0.05
Maks-Min Güç Tahsisi	3.867 bit/s/Hz	0.846 bit/s/Hz
Eşit Güç Tahsisi	4.687 bit/s/Hz	0.608 bit/s/Hz
SINR Çarpımların Maksimumu Güç Tahsisi	5.759 bit/s/Hz	0.226 bit/s/Hz

Çizelge 7.7. ZF için spektrum verimliliği değerleri.

Parametre	CDF Noktası	
	0.95	0.05
Maks-Min Güç Tahsisi	5.270 bit/s/Hz	0.967 bit/s/Hz
Eşit Güç Tahsisi	6.427 bit/s/Hz	1.078 bit/s/Hz
SINR Çarpımların Maksimumu Güç Tahsisi	7.821 bit/s/Hz	0.863 bit/s/Hz

Çizelge 7.8. MMSE için spektrum verimliliği değerleri.

Parametre	CDF Noktası	
	0.95	0.05
Maks-Min Güç Tahsisi	5.385 bit/s/Hz	1.147 bit/s/Hz
Eşit Güç Tahsisi	6.676 bit/s/Hz	1.238 bit/s/Hz
SINR Çarpımların Maksimumu Güç Tahsisi	8.077 bit/s/Hz	1.024 bit/s/Hz

Şekillerden ve tablolardan görüleceği üzere MRC durumunda kullanıcıların küçük bir oranı maks-min fayda güç tahsisi ile birlikte daha iyi durumdadır. Diğer iki şemada ise kullanıcıların küçük bir oranının verimliliği eşit güç tahsisi ile daha iyi olmakla birlikte maks-min fayda güç tahsisi, SINR çarpımların maksimumu güç tahsisine göre daha üstündür.

Güç tahsisi algoritmaları açısından yorumlandığı zaman maks-min fayda güç tahsisi algoritmasının çalışma prensibi gereği daha az spektrum verimliliğe sahip kullanıcılara yöneldiği görülmektedir. Böylece bu kullanıcıların spektrum verimliliğini artırmaya çalıştığı anlaşılmaktadır. Bu, her üç şema için geçerlidir. Tüm kullanıcılar açısından incelendiği zaman, tüm şemalarda SINR çarpımlarının maksimumu güç tahsisi yönteminin en iyi sonucu verdiği anlaşılmaktadır. Eşit güç tahsisi algoritması ise her durumda bu ikisinin arasında bir sonuç vermektedir. Genel olarak, yukarı bağlantı için dikkate alınacak sinyal sezme şemalarının seçimi ile her üç güç tahsisi algoritması için CDF eğrilerinin durumunun etkilendiği gözlemlenmektedir.

Grafik eğrilerine odaklanıldığı zaman MRC haricindeki herhangi bir şema için kullanıcıların yaklaşık olarak yüzde 10'nuna denk gelen bir kısmının daha iyi kanallara sahip olması durumunda spektrum verimliliğin eşit güç tahsisi ile daha yüksek olarak elde edildiği görülmektedir. MRC durumunda ise maks-min fayda güç tahsisi bu konuda önde olmasına rağmen oranların birbirine yakın olduğu anlaşılmaktadır. Ama tablolardan da fark edileceği üzerine kullanıcıların küçük bir bölümünün iyi kanallara sahip olduğu durumda maks-min fayda güç tahsisi ön planda olmaktadır. Eğer ki kullanıcıların rastgele konumlarının dikkate alındığı ve bu konumdaki kullanıcı için belirli bir spektrum verimliliği değerinin olması gerekliliği söz konusu ise SINR çarpımların maksimumu güç tahsisi yöntemi tercih edilmesi gereken bir yöntemdir.

Özetle, yukarı bağlantı için kullanıcıların sahip olduğu spektrum verimliliklerde farklı

sonuçlar g tahsisi ile sağlanmaktadır. Genel olarak değerlendirildiğinde SINR çarpımların maksimumu güç tahsisi algoritmasının çoğunlukla ysek spektrum verimlilik sağladığı gzlemlenmiştir. Spesifik olarak dşnlen durumlar için hangi g tahsisinin etkili olduğu sonuçlardan elde edilebilmektedir. Bunun yanı sıra kullanılacak olan sinyal sezme şemasının da sonuçlara etkisi gsterilmektedir. Böylece en uygun şemanın seçimi de yapılabilmektedir.

7.3.7. Değerlendirme ve Sonuç

Bu bölümde, literatürdeki bazı masif MIMO sistemler için güç tahsisi algoritmaları detaylandırılmıştır. Gelecek nesil kablolu iletifim teknolojilerini sürekli olarak gelişmesiyle birlikte özellikle spektrum ve enerji verimliliğinin iyileştirilmesi elzem bir durumdur. Bu sebepten ötürü güç tahsisi algoritmalarının özellikle spektrum ve enerji verimliliği hakkındaki çalışmaları dikkate alınmıştır. Bu tez çalışmasının bu kısmında amaç güç tahsisi algoritmaları hakkındaki çalışmaların teknik detaylarını açıklamak değildir. Bu çalışmalarda önerilen güç tahsisi algoritmalarının hangi şartlar altında gerçekleştirildiğini vurgulamaktır. Bu şartların detaylandırması yapılarak kullanılan masif MIMO senaryoları da ortaya konmuştur. Ayrıca spektrum ve enerji verimliliğine odaklanılan bu çalışmalardaki performans metrikleri belirtilmiştir. Algoritmanın oluşturulmasında kullanılan teknikler detaylandırılmıştır. Çalışmalardaki avantajlı ve dezavantajlı noktalar vurgulanmıştır. Son olarak, kıyaslamada kullanılan güç tahsisi algoritmaları da belirtilmiştir. Bu bölümdeki çalışmadan anlaşılmaktadır ki g tahsisi algoritmaları hakkında özellikle gelecek nesil iletifim teknolojileri için çok fazla çalışma mevcuttur. Masif MIMO sistemin de önemli bir rol oynadığı bilindiğinden dolayı bu sistem için yapılan çalışmalar da bir hayli fazladır.

Güç tahsisi algoritmalarının genel bir bakışı yapıldıktan sonra literatürde temel olarak yer alan g tahsisi algoritmalarının kendi aralarında karşılaştırılması gerçekleştirilmiştir. Bu algoritmalar eşit güç tahsisi, maks-min fayda güç tahsisi ve SINR çarpımların maksimumu güç tahsisi algoritmalarıdır. Bildiğimiz kadarıyla masif MIMO sistemi için yukarı bağlantı iletiminde spektrum verimliliğin dikkate alınarak bu üç temel algoritmanın kıyaslaması mevcut değildir. Çok hücreli masif MIMO sistemi için spektrum verimliliğin incelenmesi güç tahsisi algoritmaları bakımından gerçekleştirilmiştir. Ayrıca sinyal sezme şemalarına göre de sonuçların gözlenmesi için MRC, ZF ve MMSE şemaları dikkate alınmıştır.

Özetle, masif MIMO sistemlerde güç tahsis algoritmalarının özellikle spektrum ve enerji verimliliği için incelenmesi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca genel bir değerlendirmeden sonra temel güç tahsis algoritmalarının sinyal sezme şemaları altında benzetimlerinin gerçekleştirilmesi de bu çalışmanın diğer bir katkısıdır. Umarız güç tahsis algoritmaları hakkında çalışacak araştırmacılar için teşvik edici olacaktır.

7.4. SINR'LARIN KUTUPLAŞTIRILMASINA BAĞLI YENİ BİR GÜÇ TAHSİSİ ALGORİTMASI YAKLAŞIMI

Baz istasyonunda yüzlerce antenin donanımı ile onlarca kullanıcıya hizmet vermekte olan masif MIMO sistemi yeni nesil kablosuz iletişim ağlarında önemli bir teknolojidir. Girişime karşı sağlamlığı, spektrum ve enerji verimliliğindeki çok önemli iyileştirmelere sahip olması, yüksek veri hızına imkân tanınması ve düşük gecikme süresi sağlaması nedeniyle özellikle 5G ve ötesi teknolojilerde kilit bir teknolojidir [2], [5], [53], [55], [260]. Masif MIMO'nun sağladığı bu avantajların her biri ayrı bir çalışma alanı konularıdır.

Masif MIMO mimari yapısı ortaya çıktığından beri birçok çalışma üzerinde durulmuştur. Bu konulardan birisi, joule başına iletilen bit olarak tanımlanan enerji verimliliğidir. Teknolojik çeşitliliğin artmasıyla birlikte özellikle mobil cihazların pil sorununun çözümü ve küresel bir sorun olan enerjinin verimli kullanılması büyük önem arz etmektedir. Bu nedenle son çalışmalarda odaklanılan konular arasında enerji verimliliği gelmektedir [261]–[264].

Enerji verimliliğinin sağlanması için gerçekleştirilen çalışmalarda optimum güç tahsisinin sağlanması üzerinde durulmaktadır. Bu araştırmalardan birinde, mükemmel olmayan CSI durumunda tek hücreli masif MIMO aşağı bağlantı sistemi için enerji verimli bir güç tahsis algoritması önerilmiştir [265]. Önerdikleri algoritma düşük karmaşıklıkla bir algoritma olmasına rağmen, optimal olmayan bir yaklaşımdır. [266]'da yazarlar, çok hücreli masif MIMO aşağı bağlantı sistemi için enerji verimli bir güç tahsis yöntemine odaklanmışlardır. Sistemlerindeki hücre sayısı üç olduğundan küçük hücreli bir sistem olarak düşünülmektedir. Hücrelerdeki her bir BS için kovaryans matrisini tasarlayarak, optimizasyon problemini Dinkelbach yöntemi ile birkaç alt probleme dönüştürmüşlerdir. Bu alt problemler su-doldurma tabanlı bir yaklaşımla çözülmüştür. [232]'deki çalışmada, yazarlar düşük karmaşıklıkla güç tahsis algoritmasında hem veri

hızını hem de güç sınırlamasını birlikte değerlendirmişlerdir. [118]'de, tek hücreli masif MIMO sisteminin minimum QoS sağlayan enerji verimli güç tahsis algoritması için minimum veri hızı dikkate alınmıştır. Önerdikleri algoritmanın yaklaşımı, kesirli programlamaya dayanmaktadır. [235]'te yazarlar, tek hücreli masif MIMO aşağı bağlantı sistemi için Lagrange yöntemini kullanan enerji verimli güç tahsis algoritmasını mükemmel kanal durum bilgisi altında gerçekleştirmişlerdir ve optimum anten seçimi ile birlikte minimum radyo frekansı (RF) zincirini dikkate almışlardır. Başka bir çalışmada [237], yazarlar tek hücreli masif MIMO aşağı bağlantı sistemi için toplam ulaşılabilir kapasitenin bir ifadesine dayalı olarak enerji verimliliğini en üst düzeye çıkarmayı amaçlayan bir güç tahsis algoritması geliştirmişlerdir. [267]'de yazarlar, dört hücreli bir masif MIMO yukarı bağlantı sisteminde enerji verimliliğine odaklanan bir güç tahsis algoritması geliştirmişlerdir. Hücreler arası girişimin neden olduğu pilot kirliliği dahil ederek oluşturulan kapalı form ifadelerindeki optimizasyon problemini çözmek için, pilot ve veri sinyallerinin sınırlı bir gücü ve her kullanıcının belirli bir QoS koşulu altındaki kısıtlamalarını dikkate almışlardır.

Literatür taraması sonucunda aşağıdaki noktalar yeni bir güç algoritması yaklaşımının belirlenmesi açısından önemli olarak tespit edilmiştir:

- Enerji verimli güç tahsis algoritmaları genellikle tek hücreli masif MIMO sistemleri için önerilmektedir,
- Çok hücreli Masive MIMO sisteminin düşünüldüğü çalışmalarda toplam hücre sayısı üç veya dördür. Bu nedenle bu sistemler küçük hücreli masif MIMO sistemleri olarak adlandırılabilir,
- Önerilen algoritmalarda temel alınan Lagrange yönteminin türevleri veya su doldurma algoritması ile ilgili işlemlerden dolayı bazı süreksizlik durumları bulunmaktadır.

Bu çıkarımlar neticesinde çok hücreli bir masif MIMO sistemine cevap verebilecek ve WF-PPA algoritmasının kötü kanal şartlarına sahip kullanıcıları göz ardı etmesine karşı başka bir yaklaşım getirecek yeni bir güç tahsis algoritması üzerinde durulmuştur. Önerilen güç tahsis algoritması ile alakalı olarak bir iş birliği çerçevesinde çeşitli çıktılar elde edildiği bir çalışma gerçekleştirilmiştir.¹ Bu algoritmanın temeli

¹ M. Pakyürek, O. Dikmen ve S. Kulaç ile birlikte gerçekleştirilmiş olan ortak bir çalışma neticesinde SCI-E kapsamındaki bir dergiye makale yüklenmiştir. Değerlendirme aşaması devam etmektedir.

kullanıcıların SINR ifadelerinin kutuplaştırılmasına dayanmaktadır. Dinamik bir yaklaşım olan bu algoritma SINR'ları kutuplaştıran pilot güç tahsisi (PS-PPA) olarak adlandırılmıştır.² Önerilen güç tahsisi ile birlikte amaç sistemin enerji verimliliğini artırmaktır. Bunun için bu algoritma, sistemin enerji verimliliğinde iyileştirme sağlamak için güç güncellemelerinde kullanıcıların en son SINR'sine ilişkin hücreyi her zaman güncellemektedir. Güç güncellemelerinde, PS-PPA, SINR farkının üstel bir fonksiyonunu kullanarak ağırlıkları hesaplamaktadır. Bu ağırlıklandırma fonksiyonu her bir gerçek sayı için tanımlanmıştır, böylece her zaman belirli bir sayı ile sonuçlanabilmektedir. Ayrıca, ağırlıklandırma işlevi, güç değerlerinin önceden tanımlanmış olduğu $[\rho_{min}, \rho_{max}]$ aralığında gerçekleştirilmektedir.

7.4.1. Sistem Modeli

Bu kısımda, benzetimler için tasarlanmış masif MIMO çalışma senaryolarına sahip çok hücreli çok kullanıcı bir yukarı bağlantı sistemini ele alınmaktadır. Bu L hücre sisteminde BS'ler M antene sahiptir ve her hücrede K kullanıcıya hizmet edilmektedir. j . hücredeki k . kullanıcıdan i . hücredeki BS'ye kanal vektörü $\mathbf{h}_{ijk}$ [147]'deki gibi yazılabilmektedir.

$$\mathbf{h}_{ijk} = \mathbf{g}_{ijk} \sqrt{\beta_{ijk}}, \quad (7.34)$$

burada $\mathbf{g}_{ijk}$ küçük ölçek sönümlleme katsayı vektörü olarak gösterilmektedir. Bu vektörün tüm elemanları, sıfır ortalamalı ve birim varyanlı karmaşık Gauss dağılımına sahiptir. Yol kaybıyla birlikte gölge sönmesine bağlı olan büyük ölçekli sönümlleme katsayısı β_{ijk} şu şekilde yazılabilir:

$$\beta_{ijk} = \frac{z_{ijk}}{r_{ijk}^\gamma} \quad (7.35)$$

Burada z_{ijk} gölge sönümllemesini, r_{ijk} ise j . hücredeki k . kullanıcı ile i . hücredeki BS arasındaki mesafedir ve γ yol üssü kaybını temsil etmektedir.

Yukarı bağlantı pilot iletim aşamasında CSI, tutarlılık aralığında yukarı bağlantı pilot dizilerini aldıktan sonra BS tarafından tahmin edilmektedir. Her hücre için τ_p

² Muhammet Pakyürek'in "Büyük Ölçekli MIMO Sistemlerde Makine Öğrenmesi ile Pilot Kirliliğinin Optimize Edilmesi" isimli Düzce Üniversitesi'ndeki doktora tez çalışmasındaki algoritmasından ilham alınmıştır. Algoritmanın geliştirilmesindeki katkılarından dolayı yazara teşekkür ederim.

uzunluğuna sahip kullanılan tüm yukarı bağlantı pilot dizileri, pilot set $\boldsymbol{\psi} = [\mathbf{p}_1 \dots \mathbf{p}_K]$ ile birlikte kullanılmaktadır. Aynı hücredeki kullanıcıların farklı ortogonal pilot dizileri olduğu varsayılmaktadır. Bu, kullanıcılardan daha fazla sayıda pilot dizisi kullanılarak sağlanmaktadır. Pilot gücünün her hücredeki kullanıcılar için farklı olduğu düşünülen bir sistemde, alınan sinyalin i . BS'deki ifadesi [268]'e benzer şekilde aşağıdaki gibi gösterilebilir.

$$\mathbf{Y}_i = \sum_{j=1}^L \sum_{k=1}^K \sqrt{\rho_{jk}} \mathbf{h}_{ijk} \mathbf{p}_k^H + \mathbf{N}_i \quad (7.36)$$

burada $\mathbf{N}_i$ ve ρ_{jk} , sırasıyla j . hücrede k . kullanıcı için pilotun Gauss gürültüsüne ve gücüne karşılık gelmektedir. Denklem (7.36) elde edildikten sonra, pilot dizisinin $\mathbf{p}_K$ kullanılarak i hücresindeki BS ile i hücresindeki k kullanıcısı arasındaki kanal tahmini aşağıdaki gibi gerçekleştirilmektedir,

$$\hat{\mathbf{h}}_{iik} = \mathbf{Y}_i \mathbf{p}_K = \sqrt{\rho_{ik}} \mathbf{h}_{iik} + \sum_{j \neq i}^L \sqrt{\rho_{jk}} \mathbf{h}_{ijk} + \mathbf{N}_i \mathbf{p}_K \quad (7.37)$$

Yukarı bağlantı veri iletim aşamasında, BS'ler, kanal tahmini tamamlandığında alınan sinyali sezmek için CSI'yi kullanmaktadır. Bazı çalışmalarda kullanılan MRC sezme gibi yöntemlerle BS'de i . hücrede k . kullanıcısının algılanan sinyali hesaplanabilmektedir [147]. BS'de i . hücrede alınan veriler şu şekilde gösterilmektedir:

$$\mathbf{Y}_i = \sqrt{\rho_u} \sum_{j=1}^L \sum_{k=1}^K \mathbf{h}_{ijk} x_{jk} + \mathbf{N}_i \quad (7.38)$$

burada j . hücredeki k . kullanıcıdan gelen veri sembolü x_{jk} ile temsil edilmektedir ve yukarı bağlantı iletim gücü ρ_u ile gösterilmektedir. Hücrede BS'de k . kullanıcısının algılanan sinyali, bazı çalışmalarda kullanılan MRC sezme yöntemiyle aşağıdaki gibi hesaplanabilmektedir [147],

$$\begin{aligned}
\hat{x}_{ik} &= \hat{\mathbf{h}}_{iik} \mathbf{y}_i = \left(\sum_{j=1}^L \sqrt{\rho_{jk}} \mathbf{h}_{ijk} + \mathbf{N}_i \mathbf{p}_K \right)^H \left(\sqrt{\rho_u} \sum_{j=1}^L \sum_{k=1}^K \mathbf{h}_{ijk} x_{jk} + \mathbf{n}_i \right) \\
&= \sqrt{\rho_u} \left(\sqrt{\rho_{ik}} \mathbf{h}_{iik}^H \mathbf{h}_{iik} x_{ik} + \sum_{j \neq i}^L \sqrt{\rho_{jk}} \mathbf{h}_{ijk}^H \mathbf{h}_{ijk} x_{jk} \right) + \varepsilon_{ik}
\end{aligned} \tag{7.39}$$

burada ilişkisiz girişim ve gürültü kombinasyonu ε_{ik} ile belirtilmektedir.

Bu çalışmada, yukarı bağlantı MIMO sistemlerde SINR ifadesi [268]'de belirtildiği üzere aşağıdaki gibi ifade edilebilmektedir.

$$SINR_{ik}^u = \frac{\rho_{ik} |\mathbf{h}_{iik}^H \mathbf{h}_{iik}|^2}{\sum_{j \neq i} \rho_{jk} |\mathbf{h}_{ijk}^H \mathbf{h}_{ijk}|^2 + \frac{|\varepsilon_{ik}^u|^2}{\rho_u}} \tag{7.40}$$

Yukarı bağlantı veri iletim gücünün ρ_u ile gösterilmektedir ve ilişkisiz girişim ve gürültü ε_{ik} ile belirtilmektedir [268]. Bu denklem, β_{ijk} büyük ölçekli sönümleme katsayılarına bağlı olarak, baz istasyonundaki M anten sayısının sonsuza gittiği varsayılarak [147]'deki gibi şu şekilde yazılabilmektedir.

$$SINR_{ik}^u \rightarrow \frac{\rho_{ik} \beta_{iik}^2}{\sum_{j \neq i} \rho_{jk} \beta_{ijk}^2} \tag{7.41}$$

Yukarı bağlantı SINR denklemleri dikkate alındığında, kapasite ifadesi şu şekilde yazılabilir:

$$R_{ik}^u = \mathbb{E}\{\log_2(1 + SINR_{ik}^u)\} \tag{7.42}$$

Tüm sistem düşünüldüğünde, tüm hücreler için yukarı bağlantı ulaşılabilir toplam kapasite ifadesi şu şekildedir:

$$R_{net}^u = \sum_{i=1}^L \sum_{k=1}^K R_{ik}^u \tag{7.43}$$

7.4.2. Enerji Verimliliği

Enerji verimliliği, kablosuz iletişim teknolojilerinde spektrum verimliliği gibi önemli bir ölçüdür. Çalışma [142]'de, EE (bit/s/Joule cinsinden), sistemin toplam kapasitesinin toplam güç tüketimine oranı olarak ifade edilmektedir. Bu nedenle, EE aşağıdaki gibi gösterilmektedir

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^L \sum_{k=1}^K B\{\log_2(1 + SINR_{ik})\}}{P_{toplam}} \quad (7.44)$$

Burada P_{toplam} , sistemdeki toplam enerji tüketimini temsil etmektedir ve [269]'da belirtildiği gibi iki temel bileşenden oluşmaktadır. Bu bileşenlerden birincisi p_c olarak gösterilen devre gücünü, ikincisi ise $\frac{1}{\vartheta} \sum_{i=1}^L \sum_{k=1}^K \rho_{ik}$ olarak ifade edilen toplam iletim gücünü göstermektedir. Bu ifadelerin daha kapsamlı bir temsili [225]'te aşağıdaki gibi gösterilmiştir.

$$P_{toplam} = \sum_{i=1}^L \sum_{m=1}^M p_{c,m} + \sum_{i=1}^L \sum_{k=1}^K p_{c,k} + \frac{1}{\vartheta} \sum_{i=1}^L \sum_{k=1}^K \rho_{ik} \quad (7.45)$$

burada $p_{c,m}$ m . antende tüketilen güçtür, $p_{c,k}$ k kullanıcısından BS'ye dağıtılan devre gücüdür, ϑ güç yükselteci verimliliğini temsil eden bir sabittir. Başka bir deyişle, iletim verimliliğidir. Bu nedenle, Denklem (7.44) aşağıdaki gibi yeniden yazılmaktadır;

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^L \sum_{k=1}^K B\{\log_2(1 + SINR_{ik})\}}{\sum_{i=1}^L \sum_{m=1}^M p_{c,m} + \sum_{i=1}^L \sum_{k=1}^K p_{c,k} + \frac{1}{\vartheta} \sum_{i=1}^L \sum_{k=1}^K \rho_{ik}} \quad (7.46)$$

7.4.3. Problem Tanımı

Bu kısımda amaç, masif MIMO sistemlerinde enerji verimliliği sağlamaktır. Bunu sağlamanın yollarından biri de en uygun güç katsayılarını bularak sistemin enerji verimliliğini artırmaktır. Temel amaç, geleneksel yöntemlerde kullanılan eşit güç dağılımının aksine, belirli kısıtlamalar altında sistemdeki en verimli güç katsayılarını belirleyerek enerji verimliliğini maksimize etmektir. Bu nedenle, Denklem (7.46)'da verilen enerji verimliliğini maksimize eden güç tahsisi problemi matematiksel olarak şu şekilde ifade edilebilir:

$$i \in [1, 2, \dots, L], k \in [1, 2, \dots, K]$$

$$\begin{aligned} \max_{\rho_{ik}} \eta &= \max_{\rho_{ik}} \frac{\sum_{i=1}^L \sum_{k=1}^K B\{\log_2(1 + \text{SINR}_{ik})\}}{\sum_{i=1}^L \sum_{m=1}^M p_{c,m} + \sum_{i=1}^L \sum_{k=1}^K p_{c,k} + \frac{1}{g} \sum_{i=1}^L \sum_{k=1}^K \rho_{ik}} \\ C_1: \sum_{i=1}^L \sum_{k=1}^K B\{\log_2(1 + \text{SINR}_{ik})\} &\geq \xi_{ik} \forall_{i,k} \\ C_2: \sum_{k=1}^K \rho_{ik} &\leq P_t \forall_i \\ C_2: \rho_{min} &\leq \rho_{ik} \leq \rho_{max} \forall_{i,k} \end{aligned} \quad (7.47)$$

Denklem (7.47) çözüldüğünde, kullanıcının pilot gücünün atandığı anlamına gelmektedir. Dolayısıyla, bu problemi çözmek için verilen kısıtlamalar altında optimize edilecek parametre ρ_{ik} 'dir. $\mathbf{P}$ probleminin çözümü ile sistem kapasitesi artacaktır. Denklem (7.42)'de görüldüğü gibi, kapasitenin ifadesi SINR ile doğru orantılıdır. Bu nedenle amaç aynı zamanda SINR'yi açıkça arttırmaktır. SINR'nin basitleştirilmiş bir ifadesi aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\text{SINR}_{ik}^u = \rho_{ik} \zeta_{ik} \quad (7.48)$$

burada $\zeta_{ik} = \frac{\beta_{iik}^2}{\sum_{j \neq i} \rho_{jk} \beta_{ijk}^2}$ ifadesi Denklem (7.41)'den gelmektedir.

Denklem (7.47)'de, her kullanıcı için bir minimum QoS ξ_{ik} ile ifade edilmektedir. C_1 kısıtı, kullanıcıların minimum QoS sağlaması için minimum veri hızını belirtmektedir. C_2 kısıtlaması, yeni pilot güçlerin toplamının, her hücre için verilen toplam bütçe P_t 'den büyük olamayacağını belirtir. Son kısıtlama C_3 ise, pilot gücünün tanımlanan minimum ve maksimum güç değerleri aralığına dâhil edilmesi gerektiğini belirtmektedir. Minimum ve maksimum güç değerleri [147]'de gibi hesaplanmaktadır.

7.4.4. Masif MIMO için Enerji Verimli Güç Tahsis Algoritması

Bu bölümde, dinamik yaklaşıma dayalı olarak planlanan pilot güç tahsis algoritmasından bahsedilmektedir. Bu algoritmanın mantığı her kullanıcının SINR'sinin hücre başına ortalama SINR'den farkına dayalı olmasıdır. Bu yaklaşımın arkasındaki ana fikir, SINR'eri kutuplaştırmaktır. Başka bir deyişle, iyi kanalların koşullarını daha iyi, kötü

kanal şartlarına sahip olanları daha kötü hale getirmektedir. Fakat kötü kanal şartlarına sahip kullanıcılara, tıpkı WF-PPA algoritmasında yapıldığı gibi onları tamamen göz ardı ederek değil, belirli bir QoS durumunu göz önüne alarak $[\rho_{min}, \rho_{max}]$ aralığında bir atama gerçekleştirilmektedir.

Bir önceki kısımda açıklanan enerji verimliliği ifadeleri incelendiğinde Denklem (7.44) enerji verimliliği ifadesinin SINR'ye bağlı olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla sistemin toplam SINR'si iyileştirildiğinde kapasite de artacaktır. Ancak enerji verimliliğinin sağlanabilmesi için artan bu kapasitenin tüketilen toplam güce oranına dikkat edilmelidir. Denklem (7.40), güç katsayılarına bağlı SINR ifadesini göstermektedir. Bu nedenle, güç katsayıları verimli bir şekilde tahsis edilirken SINR'nin artırılması önemlidir, ancak enerji verimliliği açısından toplam kapasitenin tüketilen toplam güce oranını artırmak gerekmektedir.

Önerilen algoritma, tüm hücrelerdeki tüm kullanıcılara eşit güç tahsisi ile başlatılmaktadır.

$$\rho_{ik}^{epa} = \frac{P_t}{K} \quad (7.49)$$

Böylece, tüm hücrelerdeki tüm kullanıcılar için eşit güç tahsisli SINR'ler, Denklem (7.49)'a göre aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$R_{ik}^{epa} = SINR_{ik}^{epa} = \frac{|\mathbf{h}_{iik}^H \mathbf{h}_{iik}|^2}{\sum_{j \neq i} |\mathbf{h}_{ijk}^H \mathbf{h}_{ijk}|^2} \quad i \in [1, 2, \dots, L], \quad k \in [1, 2, \dots, K] \quad (7.50)$$

Daha sonra her kullanıcı için eşit güç tahsisi ile elde edilen SINR değerlerinin toplamının ortalaması hesaplanmaktadır. Böylece global ortalama SINR değeri aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$s = \sum_{i=1}^L \sum_{k=1}^K R_{ik}^{epa} \quad (7.51)$$

$$SINR_{ik}^{globalAvg} = \bar{s}, \quad k \in [1, 2, \dots, K] \quad (7.52)$$

Eşit güç dağılımına göre kullanıcıların SINR değerlerinin toplamı Denklem (7.51) ile elde edilmiştir. Tüm sistemin ortalama global SINR değeri, Denklem (7.52)'de gösterildiği

gibi kullanıcı sayısının ortalaması alınarak belirlenmiştir.

Önerilen algoritmadaki temel yaklaşım, SINR değerlerinin polarizasyonudur. Bu, iyi kanallara sahip kullanıcılara daha fazla güç katsayısı ve en kötü kanallara daha az güç katsayısı tahsis edilmesi anlamına gelmektedir. Su-doldurma güç tahsisi algoritmasındaki yaklaşımın aksine, önerilen yöntemimizde en kötü kanallar kesinlikle göz ardı edilmemektedir. En kötü kanala sahip kullanıcının güç katsayısı bile önceden belirlenmiş bir $\rho_{\min}$ değerine atanmaktadır. Böylece sistemin QoS standartları her zaman belirli bir seviyededir. Algoritma, en dıştaki hücreden en içteki hücreye kadar tüm hücrelerdeki kullanıcılara güç tahsis edecektir. Bu nedenle eşit güç tahsisi ile yapılan SINR hesaplamalarından hücreye özgü ortalama hücre SINR değeri aşağıdaki gibi belirlenmektedir.

$$s_{cell} = \sum_{l=1}^L R_{ik}^{epa}, \quad i \in [1, 2, \dots, L] \quad (7.53)$$

$$SINR_{ik}^{cellAvg} = \overline{s_{cell}}, \quad k \in [1, 2, \dots, K] \quad (7.54)$$

Daha sonra kullanıcının bireysel SINR'ı ile hücrenin ortalama SINR'ı arasındaki fark aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$d_{ik} = R_{ik}^{epa} - \overline{s_{cell}} \quad (7.55)$$

Bu hesaplamalar, kullanıcının SINR'sinin hücre ortalama SINR'sinin üstünde veya altında olduğunu belirlemektedir. Bu nedenle, ortalamanın üzerinde bir SINR'ye sahip kullanıcıya daha fazla güç katsayısı tahsis edilecektir ve ortalamanın altında bir SINR'ye sahip olan kullanıcıya daha düşük bir güç katsayısı tahsis edilecektir. Böylece toplam SINR'nin artırılması hedeflenmektedir.

Sistemin toplam SINR'sini artırmak için bir ağırlıklandırma işlemi sonucunda kullanıcılara güç katsayıları tahsisi gerçekleştirilmektedir. Bu ağırlıklandırma işlemi, kutuplaştırma yaklaşımını sağlamak için üstel bir fonksiyon olarak ele alınmıştır. Ağırlık hesaplaması şu şekilde belirlenmektedir:

$$w_{ik} = 2^{d_{ik}} \quad (7.56)$$

Böyle bir üstel fonksiyon, SINR fark değerindeki değişikliklere hızlı tepki verebilir. Daha sonra bu güncellenen ağırlıklara göre kullanıcıların güç katsayıları aşağıdaki gibi paylaşılır.

$$\rho_{ik}^* = w_{ik} \cdot \rho_{ik} \quad (7.57)$$

Yeni üstün pilot güçleri ρ_{ik}^* aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır,

$$\rho_{ik}^* = \begin{cases} \rho_{min}, & \rho_{ik}^* < \rho_{min} \\ \rho_{max}, & \rho_{ik}^* > \rho_{min} \\ \rho_{ik}^{yeni}, & \text{diğer} \end{cases} \quad (7.58)$$

Ayrıca bu tez çalışması kapsamında enerji verimliliğinin sağlanması için önerilen güç tahsis algoritmasında sistem için verilen P_t gücünün aşılmaması düşünülmektedir. Bunu başarmak için, elde edilen yeni pilot güçleri verilen P_t gücüne aşağıdaki gibi normalleştirilir.

$$\rho_{ik}^{yeni} = \frac{\rho_{ik}^{yeni}}{\sum_{i=1}^L \sum_{k=1}^K \rho_{ik}^{yeni}} P_t \quad (7.59)$$

Böylece sistemin toplam SINR'sini artıracak yeni pilot güçlerinin tahsisi gerçekleştirilir. Ancak algoritma tüm hücreler için yinelenmektedir. Bu nedenle bir sonraki hücre için yapılan işlemlerde bir önceki hücrenin mevcut durumu dikkate alınmaktadır. Algoritmanın temel yaklaşımı sistemin toplam SINR'sini artırmak olduğundan, belirlenen yeni üstün güç katsayılarına göre hesaplanan yeni SINR değerleri toplamının ortalaması, algoritma başlamadan önce hesaplanan global ortalama SINR ile karşılaştırılmalıdır. ρ_{ik}^{yeni} pilot güçleri ile birlikte SINR değerinin hesaplanması aşağıdaki gibi gerçekleştirilmektedir.

$$R_{ik}^{yeni} = \text{SINR}_{ik}^{u,yeni} = \frac{\rho_{ik}^{yeni} |\mathbf{h}_{iik}^H \mathbf{h}_{iik}|^2}{\sum_{j \neq i} \rho_{jk} |\mathbf{h}_{ijk}^H \mathbf{h}_{ijk}|^2 + \frac{|\varepsilon_{ik}^u|^2}{\rho_u}} \quad (7.60)$$

Tüm kullanıcılar için toplam ve ortalama SINR aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$s^{yeni} = \sum_{i=1}^L \sum_{k=1}^K R_{ik}^{yeni}, \quad \forall_{i,k} \quad (7.61)$$

$$SINR_{ik}^{yeniAvg} = \overline{s^{yeni}}, \quad k \in [1, 2, \dots, K] \quad (7.62)$$

Mevcut SINR değeri, bu yeni ortalama SINR değeri ($\overline{s^{yeni}}$) ile algoritma başlamadan önce hesaplanan global ortalama SINR değeri ($\bar{s}$) arasında aşağıdaki gibi karşılaştırılarak belirlenmektedir.

$$SINR_{ik}^{mevcut} = \{R_{ik}^{yeni}, \quad \overline{s^{yeni}} > \bar{s} \quad (7.63)$$

Böylece bu koşulu sağlayan güç değeri yeni pilot güç değeri olarak belirlenmektedir ve sistemin toplam SINR değerinin de artması garanti edilmiş olmaktadır.

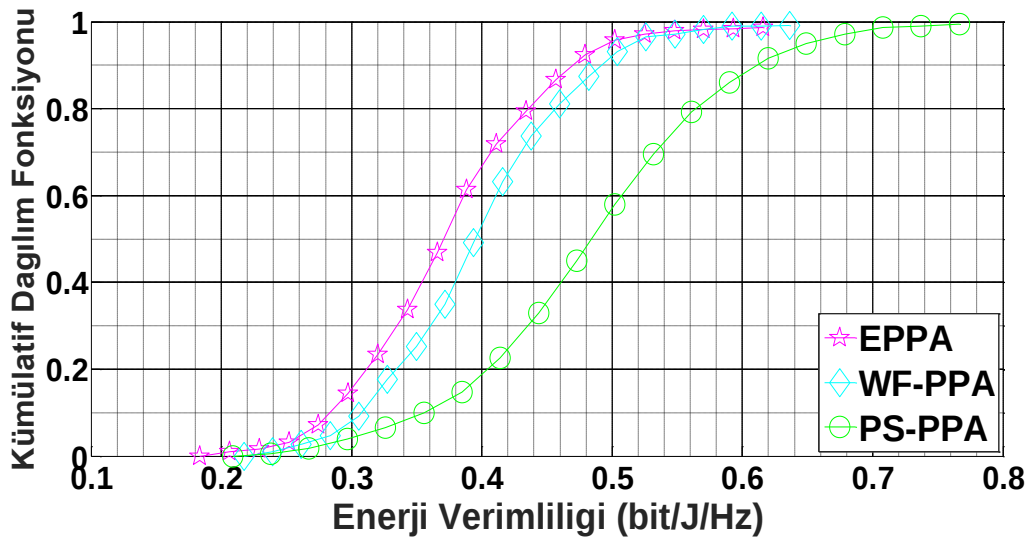
7.4.5. Benzetim Sonuçları

Bu bölümde, önerilen PS-PPA yönteminin performansı, EPPA ve WF-PPA algoritmalarıyla karşılaştırılması yoluyla gösterilmektedir. MATLAB üzerinde 10K benzetimler gerçekleştirilmiştir. Kullanıcıların konumlarının ve bunlara karşılık gelen kanal durumlarının hesaplanması sırasında, istatistiksel olarak anlamlı sonuçlar elde ederek algoritmaları objektif olarak karşılaştırmak için Monte Carlo Metodolojisi kullanılmaktadır. Benzetim sonuçlarında kullanılan bazı parametreler Çizelge 7.9'daki gibidir.

Çizelge 7.9. PS-PPA Algoritması için temel benzetim parametreleri.

Parametre	Değer
Her hücre için kullanıcı sayısı	10
Her hücre için pilot sayısı	15
Hücre sayısı	19
BS'deki anten sayısı	512
Hücre yarıçapı	1000 m
Baz istasyonlarına minimum mesafe	100 m
Sigma gölgeleme sönümlemesi	8 dBm
Yukarı bağlantı iletim gücü	15 dBm için $10^{15/10}$
Yukarı bağlantı pilot gücü	15 dBm için $10^{15/10}$

Şekil 7.5, önerilen sistemimizin enerji verimliliğinin kümülatif dağılım fonksiyonunu iki alternatif yöntemle birlikte göstermektedir: EPPA ve WF-PPA. Şekil 7.5 önemli bir toplam kapasite artışının ve dolayısıyla enerji verimliliğinin elde edilebileceğini açıkça göstermektedir. Şekil 7.5'te görüldüğü gibi önerilen yaklaşım diğer algoritmalarından üstündür. Aynı CDF değeri için SINR'lara göre algoritmaların sıralaması $EPPA < WF-PPA < PS-PPA$ şeklindedir. Başka bir deyişle, PS-PPA, karşılık gelen bir CDF değeri için çok daha fazla enerji verimliliği sağlamaktadır.



Şekil 7.5. Algoritmaların CDF'sinin enerji verimliliği ile karşılaştırması.

Bu algoritma yaklaşımı ile gerçekleştirilen iyileştirme, aynı zamanda, değişen baz istasyonundaki anten sayısında her bir hücre için ortalama yukarı bağlantı ulaşılabilir kapasitesi olarak da geçerlidir. Şekil 7.6, önerilen yaklaşımın, aynı sayıda anten için diğer şemalardan daha yüksek bir ulaşılabilir kapasite sağlayarak daha iyi performans gösterdiğini açıkça kanıtlamaktadır. Anten sayısı arttıkça önerilen algoritmanın performansının diğer algoritmaların performansı ile arasındaki fark da artmaktadır.



Şekil 7.6. Algoritmaların her bir hücredeki BS anten sayısı M ile enerji verimliliğinin karşılaştırması.

Sayısal olarak, tüm benzetimlerin enerji verimliliği de PS-PPA'nın üstün performansa sahip olduğunu doğrulamaktadır. PS-PPA, EPPA ile karşılaştırıldığında hücre başına ortalama %32 enerji verimliliği artışı sağlarken, WF-PPA %7 enerji verimliliği artışı sağlamaktadır.

7.4.6. Değerlendirme ve Sonuç

Bu kısımda, sistemin enerji verimliliğini artırmak için pilot güç tahsisi için yeni, oldukça etkili bir algoritma yaklaşımı tartışılmıştır. Önerilen yaklaşım, SINR farkının üstel fonksiyonunu kullanarak güç tahsislerinde optimal ağırlıkları bulmaktadır. Ağırlıkların güncellenmesi sırasında, her bir hücre, güncellenen kullanıcıların önceki hücrelerin pilot güçlerine göre optimize edilmektedir. Benzetim sonuçları literatürde en popüler iki yaklaşım olan EPPA ve WF-PPA yönteminden daha iyi performans gösterdiğini kanıtlamaktadır.

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Gelecek nesil kablosuz iletişim teknolojilerinin odaklanması gereken konular arasında spektrum verimliliği ve güç tahsisi yer almaktadır. Nesnelerin interneti sistemlerin de gün geçtikçe hızlı bir şekilde gelişmesiyle birlikte birbirleriyle haberleşen, veri alış verişinde bulunan cihazların sayısının artması, otonom sistemlerin kullanımının yaygınlaşması gibi durumlar ile birlikte spektrumun etkili kullanılması büyük önem arz etmektedir. Özellikle 5G ve ötesi kablosuz haberleşme teknolojilerinde artan çeşitli taleplere karşılık verilmesi kaçınılmaz bir durumdur. Bunun yanı sıra, günümüzde enerji ile ilgili adımların sürekli olarak iyileştirilmesi, daha etkin ve verimli kullanılması konusunda çeşitli çalışmalar gerçekleştirilmektedir. Çünkü dünyadaki kaynakların ömrü gün geçtikçe azalmaktadır. Bu durum dikkate alınarak kablosuz iletişim teknolojileri artan talepleri karşılarken çevreye daha duyarlı, enerjiyi en etkin bir şekilde kullanan sistemler haline almak zorundadır. Dolayısıyla spektrum verimliliğinden sonraki en temel nokta kullanılmakta olan gücün tahsisinin en uygun bir şekilde gerçekleştirilmesidir. Bu tez çalışması, yüksek spektrum verimliliğine odaklanarak ideal kullanıcı sayısının belirlenmesi ve gelecek nesil kablosuz iletişim teknolojileri için güç tahsisinin etkisinin incelenmesi başlıkları altında gerçekleştirilmiştir.

Kablosuz iletişim teknolojilerinin sunduğu performansların iyileştirilmesi ve geliştirilmesinde masif MIMO sistemlerin etkisi büyüktür. Masif MIMO ile birlikte gelecek nesil kablosuz iletişimdeki spektrum verimliliği, enerji verimliliği, düşük gecikmenin sağlanması, veri hızının artırılması, kanal tahmin hatalarının iyileştirilmesi gibi birçok konunun çözümüne çeşitli yaklaşımlar getirilmiştir. Bu amaçla bu tez çalışmasının bir bölümünde, WSN tabanlı IoT sistemler için masif MIMO sisteminin TDD veya FDD modunun hangisinde spektrum verimliliği bazında daha etkin çalışabildiğine dair analizlere yer verilmiştir. Ayrıca ZF ve MRC kullanılarak sonuçların hangi işleme şemasına göre nasıl bir performans sergilediği gözlemlenmiştir. Genel olarak ZF'nin, spektrum verimliliği açısından TDD ve FDD mod seçiminden bağımsız olarak MRC'ye kıyasla daha iyi performansa sahip olduğu açıkça görülmektedir. TDD modunda pilot dizisinin uzunluğu kullanıcı sayısı kadar, FDD modunda ise pilot dizisinin uzunluğu BS'deki anten sayısına eşit olduğu durumda her iki mod için spektrum verimliliği performansları birbirine yakın olabilmektedir.

Yüksek spektrum verimliliğinin sağlanması için kablosuz iletişim teknolojilerinde masif MIMO sisteminde ideal kullanıcı sayısının belirlenmesi kaynak tahsisinin etkili bir şekilde gerçekleştirilecek olmasından dolayı önemli bir noktadır. Çünkü sistemde kullanılması için verilen sınırlı sayıdaki ortogonal pilot dizilerinin kullanıcılar arasında akıllıca tahsis edilmesi gereklidir. Bunun için bu tez çalışmasının ilgili bölümünde yüksek spektrum verimliliği de sağlayacak ideal kullanıcı sayısının belirlenmesinin analizi gerçekleştirilmiştir. Analitik olarak elde edilen sonuçlar MRC ve ZF işlemleri altında gerçekleştirilmiştir. Analizler doğrusal sezme şemalarından bağımsız olarak ideal kullanıcı sayısı U 'yu $\frac{S}{2f}$ 'e yaklaştırmaktadır. Genel olarak ifade edilirse, hücre başına yüksek SE'ler, birçok kullanıcının eşzamanlı iletim için programlanmasıyla elde edilmektedir. MRC, kullanıcı başına en düşük SE'yi vermesine rağmen en fazla sayıda kullanıcıyı programlayabilmektedir. ZF işleme, hücre başına SE açısından genellikle en iyi seçimdir. Kapsamlı benzetimler, masif MIMO için $f = 3$ pilot yeniden kullanımının genellikle iyi bir seçim olduğunu göstermektedir. Benzetimler dikkate alınarak, $M = 100$ olan masif MIMO sisteminin SE bakımından IMT-Advanced ile belirtilen 3 bit/s/Hz/hücre gereksinimi üzerinde kolayca 10x kazanç elde edilebildiği fark edilmektedir. $M = 500$ antenli büyük diziler için masif MIMO, IMT-Advanced üzerinden 30x kazanç bile sağlayabilmektedir. Ek olarak baz istasyonundaki anten sayısı M 'nin sonsuza gittiği ve tutarlılık blok uzunluğunun $S = 400$ olduğu durum dikkate alınarak spektrum verimliliğinin maksimum şekilde elde edildiği grafikler neticesinde ve analitik olarak gerçekleştirilen çözüm sonucunda kırsal bölge olarak modellenen birinci ortamda pilot yeniden kullanım faktörü seçiminin $f = 1$ ve kullanıcı sayısının $U = 200$ olduğu gözlemlenmiştir. Aynı şartlar altında kasaba bölgesi olarak modellenen ikinci ortam için $f = 3$ ve kullanıcı sayısının $U = 67$ olduğu belirlenmiştir. Son olarak, şehir bölgesi olarak modellenen üçüncü ortam için ise $f = 4$ ve kullanıcı sayısının $U = 50$ olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca bu çalışma herhangi bir donanım bozukluğunun veya diğer başka parametrelerin etkisi dışında incelenmiştir. Donanım bozukluğu ve diğer başka sistem parametrelerinin eklenmesi ve bunların etkilerinin incelenmesi ileriki çalışma konuları olarak düşünülmektedir.

Tez çalışmasının sonuncu önemli parçası olan güç tahsisi etkisinin incelenmesi bölümü kendi içerisinde üç ayrı kısım olarak değerlendirilebilmektedir. Birinci kısım, güç tahsisi konusunda masif MIMO sistemler için gerçekleştirilen çalışmaların, önerilen algoritmaların spektrum ve enerji verimliliği açısından değerlendirilmesidir. Burada

amaç güç tahsisi çalışmalarının üzerinde yoğunlaştıkları teknik detayların belirlenerek ileriki çalışma konularını saptamak olmuştur. İkinci kısım, güç tahsisi algoritmalarının genel bir bakışı yapıldıktan sonra eşit güç tahsisi, maks-min fayda güç tahsisi ve SINR çarpımların maksimumu güç tahsisi algoritmalarının kendi aralarında karşılaştırılması gerçekleştirilmiştir. Ayrıca sinyal sezme şemalarına göre de sonuçların gözlenmesi için MRC, ZF ve MMSE şemaları dikkate alınmıştır. Üçüncü kısım ise güç tahsisi algoritmalarının incelenerek elde edilen bulgular neticesinde yeni, farklı bir güç tahsisi algoritması yaklaşımı sunmaktadır. Bu yeni güç tahsisi algoritması ile birlikte literatürdeki çok hücreli yapı olarak adlandırılan ama belirli bir hücre sayısı kadarki sistemler için önerilen güç tahsisi algoritmalarının aksine gerçek ortama daha yakın, 19 hücreli bir masif MIMO sistemi için sonuçlar sunulmaktadır. Ayrıca güç tahsisi için çoğu çalışmada da kullanılabilen bir yaklaşım olan WF algoritmasının temel mantığındaki Lagrangian yöntemindeki bazı süreksizlik noktalarında sonuç alınamama durumu önerilen PS-PPA algoritması ile birlikte giderilebilmektedir. Nitekim elde edilen sonuçlar önerilen PS-PPA yaklaşımının EPPA ve WF-PPA'ya kıyasla daha üstün olduğunu göstermektedir. Bu sonuçları doğrulayan sayısal bilgiler ise şu şekildedir; PS-PPA, EPPA ile karşılaştırıldığında hücre başına ortalama %32 kapasite artışı sağlarken, WF-PPA algoritması EPPA'ya kıyasla %7 kapasite artışı sağlamaktadır. Ayrıca sayısal olarak, tüm benzetimler göz önüne alındığında, PS-PPA'nın ortalama kapasitesi 0.51, WF-PPA'nın 0.41 ve EPPA'nın 0.37 olarak hesaplanmaktadır. Bu sayısal veriler ışığında da önerilen PS-PPA algoritmasının başarımı açık bir şekilde görülmektedir. Gelecekteki çalışma konuları arasında, pilot kirliliği probleminin pilot ataması ve güç tahsisi ile çözülebilmesi yer almaktadır. Bu iki yaklaşımın bir ortak modeli üzerinde durulması düşünülebilmektedir. Ayrıca, pekiştirmeli öğrenme (Reinforcement Learning, RL), makine öğrenimi tekniği olarak dinamik olarak değişen böyle bir optimizasyon problemi için gayet uygun bir çözümdür. Dolayısıyla, daha iyi sonuçlar almak için RL kullanarak bu sorunun çözülmesi hedeflenmektedir.

9. KAYNAKLAR

- [1] J. Li, D. Wang, P. Zhu, ve X. You, “Benefits of Beamforming Training Scheme in Distributed Large-Scale MIMO Systems”, *IEEE Access*, c. 6, ss. 7432–7444, 2018.
- [2] T. L. Marzetta, “Noncooperative Cellular Wireless with Unlimited Numbers of Base Station Antennas”, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, c. 9, sayı 11, ss. 3590–3600, 2010.
- [3] J. Jose, A. Ashikhmin, T. L. Marzetta, ve S. Vishwanath, “Pilot contamination and precoding in multi-cell TDD systems”, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, c. 10, sayı 8, ss. 2640–2651, 2011.
- [4] S. ten B. J. Hoydis ve Merouane Debbah, “Massive MIMO in the UL/DL of Cellular Networks: How Many Antennas Do We Need?”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, c. 31, sayı 2, ss. 160–171, 2013.
- [5] H. Q. Ngo, E. G. Larsson, ve T. L. Marzetta, “Energy and spectral efficiency of very large multiuser MIMO systems”, *IEEE Transactions on Communications*, c. 61, sayı 4, ss. 1436–1449, 2013.
- [6] Daehan Ha, Keonkook Lee, ve Joonhyuk Kang, “Energy efficiency analysis with circuit power consumption in massive MIMO systems”, *24. IEEE Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, London, UK, 2013, ss. 938–942.
- [7] H. Yang ve T. L. Marzetta, “Total energy efficiency of cellular large scale antenna system multiple access mobile networks”, *IEEE Online Conference on Green Communications (OnlineGreenComm)*, Piscataway, NJ, USA, 2013, ss. 27–32.
- [8] E. Bjornson, J. Hoydis, M. Kountouris, ve M. Debbah, “Massive MIMO systems with non-ideal hardware: Energy efficiency, estimation, and capacity limits”, *IEEE Transactions on Information Theory*, c. 60, sayı 11, ss. 7112–7139, 2014.
- [9] E. Bjornson, M. Matthaiou, ve M. Debbah, “Massive MIMO with Non-Ideal Arbitrary Arrays: Hardware Scaling Laws and Circuit-Aware Design”, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, c. 14, sayı 8, ss. 4353–4368, 2015.
- [10] A. Pitarokoilis, S. K. Mohammed, ve E. G. Larsson, “Uplink Performance of Time-Reversal MRC in Massive MIMO Systems Subject to Phase Noise”, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, c. 14, sayı 2, ss. 711–723, 2015.
- [11] H. Huh, G. Caire, H. C. Papadopoulos, ve S. A. Ramprasad, “Achieving ‘massive MIMO’ spectral efficiency with a not-so-large number of antennas”, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, c. 11, sayı 9, ss. 3226–3239, 2012.
- [12] Y. Li, Y. H. Nam, B. L. Ng, ve J. Zhang, “A non-asymptotic throughput for massive MIMO cellular uplink with pilot reuse”, *IEEE Global Telecommunications Conference*, Anaheim, CA, USA, 2012, ss. 4500–4504.
- [13] Mingmei Li, Shi Jin, ve Xiqi Gao, “Spatial orthogonality-based pilot reuse for multi-cell massive MIMO transmission”, *International Conference on Wireless*

Communications and Signal Processing, Hangzhou, China, 2013, ss. 1–6.

- [14] G. Lee ve Y. Sung, “A New Approach to User Scheduling in Massive Multi-User MIMO Broadcast Channels”, *IEEE Transactions on Communications*, c. 66, sayı 4, ss. 1481–1495, 2018.
- [15] M. Kuerbis, N. M. Balasubramanya, L. Lampe, ve A. Lampe, “User scheduling in massive MIMO systems with a large number of devices”, 28. *IEEE Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, Montreal, QC, Canada, 2017, ss. 1–6.
- [16] X. Chen, F.-K. Gong, H. Zhang, ve G. Li, “Cooperative User Scheduling in Massive MIMO Systems”, *IEEE Access*, c. 6, ss. 21910–21923, 2018.
- [17] I. Boukhedimi, A. Kammoun, ve M.-S. Alouini, “LMMSE Receivers in Uplink Massive MIMO Systems With Correlated Rician Fading”, *IEEE Transactions on Communications*, c. 67, sayı 1, ss. 230–243, 2019.
- [18] O. Saatlou, M. O. Ahmad, ve M. N. S. Swamy, “Joint Data and Pilot Power Allocation for Massive MU-MIMO Downlink TDD Systems”, *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, c. 66, sayı 3, ss. 512–516, 2019.
- [19] S. Park, A. Q. Truong, ve T. H. Nguyen, “Power Control for Sum Spectral Efficiency Optimization in MIMO-NOMA Systems With Linear Beamforming”, *IEEE Access*, c. 7, ss. 10593–10605, 2019.
- [20] J. Zhang, X. Xue, E. Bjornson, B. Ai, ve S. Jin, “Spectral Efficiency of Multipair Massive MIMO Two-Way Relaying With Hardware Impairments”, *IEEE Wireless Communications Letters*, c. 7, sayı 1, ss. 14–17, 2018.
- [21] O. Saatlou, M. O. Ahmad, ve M. N. S. Swamy, “Spectral Efficiency Maximization of Multiuser Massive MIMO Systems With Finite-Dimensional Channel via Control of Users’ Power”, *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, c. 65, sayı 7, ss. 883–887, 2018.
- [22] Y. Sun, J. Wang, ve L. He, “Spectral Efficiency Enhancement With Power Allocation for Massive SC-SM MIMO Uplink”, *IEEE Communications Letters*, c. 22, sayı 1, ss. 101–104, 2018.
- [23] W. Boukley Hasan, P. Harris, A. Doufexi, ve M. Beach, “Real-Time Maximum Spectral Efficiency for Massive MIMO and its Limits”, *IEEE Access*, c. 6, ss. 46122–46133, 2018.
- [24] J. Li, D. Wang, P. Zhu, J. Wang, ve X. You, “Downlink Spectral Efficiency of Distributed Massive MIMO Systems With Linear Beamforming Under Pilot Contamination”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, c. 67, sayı 2, ss. 1130–1145, 2018.
- [25] W. Tan, D. Xie, J. Xia, W. Tan, L. Fan, ve S. Jin, “Spectral and Energy Efficiency of Massive MIMO for Hybrid Architectures Based on Phase Shifters”, *IEEE Access*, c. 6, ss. 11751–11759, 2018.
- [26] B. Wang, L. Dai, Z. Wang, N. Ge, ve S. Zhou, “Spectrum and Energy-Efficient Beam-space MIMO-NOMA for Millimeter-Wave Communications Using Lens Antenna Array”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, c. 35, sayı 10, ss. 2370–2382, 2017.
- [27] J. Choi, J. Park, ve B. L. Evans, “Spectral Efficiency Bounds for Interference-

- Limited SVD-MIMO Cellular Communication Systems”, *IEEE Wireless Communications Letters*, ss. 1–1, 2016.
- [28] Y. Li, P. Fan, A. Leukhin, ve L. Liu, “On the Spectral and Energy Efficiency of Full-Duplex Small-Cell Wireless Systems With Massive MIMO”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, c. 66, sayı 3, ss. 2339–2353, 2017.
 - [29] C. D. Ho, H. Q. Ngo, M. Matthaiou, ve T. Q. Duong, “On the Performance of Zero-Forcing Processing in Multi-Way Massive MIMO Relay Networks”, *IEEE Communications Letters*, c. 21, sayı 4, ss. 849–852, 2017.
 - [30] X. Wang, D. Zhang, K. Xu, ve W. Ma, “On the energy/spectral efficiency of multi-user full-duplex massive MIMO systems with power control”, *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, c. 2017, sayı 1, s. 82, 2017.
 - [31] Z. Zhang, Z. Chen, M. Shen, ve B. Xia, “Spectral and Energy Efficiency of Multipair Two-Way Full-Duplex Relay Systems With Massive MIMO”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, c. 34, sayı 4, ss. 848–863, 2016.
 - [32] Y. Lin, X. Li, W. Fu, ve Y. Hei, “Spectral efficiency analysis for downlink massive MIMO systems with MRT precoding”, *China Communications*, c. 12, sayı Supplement, ss. 67–73, 2015.
 - [33] C. D. Ho, H. Q. Ngo, M. Matthaiou, ve L. D. Nguyen, “Power Allocation for Multi-Way Massive MIMO Relaying”, *IEEE Transactions on Communications*, ss. 1–1, 2018.
 - [34] W. Cheng, H. Zhang, L. Liang, H. Jing, ve Z. Li, “Orbital-Angular-Momentum Embedded Massive MIMO: Achieving Multiplicative Spectrum-Efficiency for mmWave Communications”, *IEEE Access*, c. 6, ss. 2732–2745, 2018.
 - [35] O. Saatlou, M. O. Ahmad, ve M. N. S. Swamy, “Spectral Efficiency Maximization for Massive Multiuser MIMO Downlink TDD Systems via Data Power Allocation with MRT Precoding”, 86. *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)*, Toronto, ON, Canada, 2017, ss. 1–5.
 - [36] M. Agiwal, A. Roy, ve N. Saxena, “Next Generation 5G Wireless Networks: A Comprehensive Survey”, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, c. 18, sayı 3, ss. 1617–1655, 2016.
 - [37] Y. Xiao, G. Shi, ve M. Krunz, “Towards Ubiquitous AI in 6G with Federated Learning”, 2020.
 - [38] J. G. J. G. Andrews vd., “What will 5G be?”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, c. 32, sayı 6, ss. 1065–1082, 2014.
 - [39] S. Parkvall, E. Dahlman, A. Furuskar, ve M. Frenne, “NR: The New 5G Radio Access Technology”, *IEEE Communications Standards Magazine*, c. 1, sayı 4, ss. 24–30, 2017.
 - [40] S. Dang, O. Amin, B. Shihada, ve M.-S. Alouini, “What should 6G be?”, *Nature Electronics*, c. 3, sayı 1, ss. 20–29, 2020.
 - [41] I. F. Akyildiz, A. Kak, ve S. Nie, “6G and Beyond: The Future of Wireless Communications Systems”, *IEEE Access*, c. 8, ss. 133995–134030, 2020.
 - [42] J. R. Bhat ve S. A. Alqahtani, “6G Ecosystem: Current Status and Future Perspective”, *IEEE Access*, c. 9, ss. 43134–43167, 2021.

- [43] C.-X. Wang, J. Huang, H. Wang, X. Gao, X. You, ve Y. Hao, “6G Wireless Channel Measurements and Models: Trends and Challenges”, *IEEE Vehicular Technology Magazine*, c. 15, sayı 4, ss. 22–32, 2020.
- [44] H. Viswanathan ve P. E. Mogensen, “Communications in the 6G Era”, *IEEE Access*, c. 8, ss. 57063–57074, 2020.
- [45] A. Al Amin ve S. Y. Shin, “Capacity Analysis of Cooperative NOMA-OAM-MIMO Based Full-Duplex Relaying for 6G”, *IEEE Wireless Communications Letters*, 2021.
- [46] E. Basar, “Reconfigurable Intelligent Surface-Based Index Modulation: A New beyond MIMO Paradigm for 6G”, *IEEE Transactions on Communications*, 2020.
- [47] Cisco, “Cisco visual networking index (VNI) global mobile data traffic forecast update, 2017-2022 white paper”, *Computer Fraud & Security*, 2019.
- [48] M. A. Albreem, M. Juntti, ve S. Shahabuddin, “Massive MIMO Detection Techniques: A Survey”, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, c. 21, sayı 4, ss. 3109–3132, 2019.
- [49] N. Hassan ve X. Fernando, “Massive MIMO wireless networks: An overview”, *Electronics (Switzerland)*. 2017.
- [50] N. Fatema, G. Hua, Y. Xiang, D. Peng, ve I. Natgunanathan, “Massive MIMO Linear Precoding: A Survey”, *IEEE Systems Journal*, c. 12, sayı 4, ss. 3920–3931, 2018.
- [51] L. Sanguinetti, E. Bjornson, ve J. Hoydis, “Toward Massive MIMO 2.0: Understanding Spatial Correlation, Interference Suppression, and Pilot Contamination”, *IEEE Transactions on Communications*, c. 68, sayı 1, ss. 232–257, 2020.
- [52] H. Papadopoulos, C. Wang, O. Bursalioglu, X. Hou, ve Y. Kishiyama, “Massive MIMO technologies and challenges towards 5G”, *IEICE Transactions on Communications*, 2016.
- [53] E. Larsson, O. Edfors, F. Tufvesson, ve T. Marzetta, “Massive MIMO for next generation wireless systems”, *IEEE Communications Magazine*, c. 52, sayı 2, ss. 186–195, 2014.
- [54] E. Bjornson, E. G. Larsson, ve M. Debbah, “Massive MIMO for Maximal Spectral Efficiency: How Many Users and Pilots Should Be Allocated?”, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, c. 15, sayı 2, ss. 1293–1308, 2016.
- [55] F. Rusek, D. Persson, Buon Kiong Lau, E. G. Larsson, T. L. Marzetta, ve F. Tufvesson, “Scaling Up MIMO: Opportunities and Challenges with Very Large Arrays”, *IEEE Signal Processing Magazine*, c. 30, sayı 1, ss. 40–60, 2013.
- [56] J. Chen, H. Chen, H. Zhang, ve F. Zhao, “Spectral-Energy Efficiency Tradeoff in Relay-Aided Massive MIMO Cellular Networks With Pilot Contamination”, *IEEE Access*, c. 4, ss. 5234–5242, 2016.
- [57] Q. He, L. Xiao, X. Zhong, ve S. Zhou, “Increasing the sum-throughput of cells with a sectorization method for massive MIMO”, *IEEE Communications Letters*, 2014.
- [58] T. T. Do, E. Bjornson, E. G. Larsson, ve S. Mohammad Razavizadeh, “Jamming-Resistant Receivers for the Massive MIMO Uplink”, *IEEE Transactions on*

- [59] D. Kapetanovic, G. Zheng, ve F. Rusek, “Physical layer security for massive MIMO: An overview on passive eavesdropping and active attacks”, *IEEE Communications Magazine*, c. 53, sayı 6, ss. 21–27, 2015.
- [60] D. A. Basnayaka ve H. Haas, “Spatial modulation for massive MIMO”, *IEEE International Conference on Communications*, London, UK, 2015.
- [61] E. Bjornson, J. Hoydis, ve L. Sanguinetti, “Massive MIMO Has Unlimited Capacity”, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, c. 17, sayı 1, ss. 574–590, 2018.
- [62] J. Cai, B. Rong, ve S. Sun, “A low complexity hybrid precoding scheme for massive MIMO system”, *16. International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT)*, Qingdao, China, 2016, ss. 638–641.
- [63] H. T. Dao ve S. Kim, “Power Allocation for Multiple User-Type Massive MIMO Systems”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, c. 69, sayı 10, ss. 10965–10974, 2020.
- [64] L. Lu, G. Y. Li, A. L. Swindlehurst, A. Ashikhmin, ve R. Zhang, “An overview of massive MIMO: Benefits and challenges”, *IEEE Journal on Selected Topics in Signal Processing*, c. 8, sayı 5, ss. 742–758, 2014.
- [65] A. Gupta ve R. K. Jha, “A Survey of 5G Network: Architecture and Emerging Technologies”, *IEEE Access*, c. 3, ss. 1206–1232, 2015.
- [66] J. R. Hampton, *Introduction to MIMO Communications*. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [67] W. Xiang, K. Zheng, ve X. S. Shen, *5G Mobile Communications*. Cham: Springer International Publishing, 2017.
- [68] R. Chataut ve R. Akl, “Massive MIMO Systems for 5G and beyond Networks—Overview, Recent Trends, Challenges, and Future Research Direction”, *Sensors*, c. 20, sayı 10, s. 2753, 2020.
- [69] Y.-S. Jeon, N. Lee, S.-N. Hong, ve R. W. Heath, “One-Bit Sphere Decoding for Uplink Massive MIMO Systems With One-Bit ADCs”, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, c. 17, sayı 7, ss. 4509–4521, 2018.
- [70] A. Elghariani ve M. Zoltowski, “Successive interference cancellation for large-scale MIMO OFDM”, *IEEE International Conference on Electro/Information Technology (EIT)*, Dekalb, IL, USA, 2015, ss. 657–661.
- [71] A.-A. Lu, X. Gao, Y. R. Zheng, ve C. Xiao, “Low Complexity Polynomial Expansion Detector With Deterministic Equivalents of the Moments of Channel Gram Matrix for Massive MIMO Uplink”, *IEEE Transactions on Communications*, c. 64, sayı 2, ss. 586–600, 2016.
- [72] Y.-C. Liang, G. Pan, ve Z. D. Bai, “Asymptotic Performance of MMSE Receivers for Large Systems Using Random Matrix Theory”, *IEEE Transactions on Information Theory*, c. 53, sayı 11, ss. 4173–4190, 2007.
- [73] S. Ghacham, M. Benjillali, ve Z. Guennoun, “Low-complexity detection for massive MIMO systems over correlated Rician fading”, *13. International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*, Valencia, Spain, 2017, ss. 1677–1682.

- [74] P. Torres, L. Charrua, ve A. Gusmao, “On the uplink detection performance in MU-MIMO broadband systems with a large number of BS antennas”, 18. *International OFDM Workshop 2014, InOWo 2014*, Essen, Germany, 2019.
- [75] X. Gao, L. Dai, Y. Ma, ve Z. Wang, “Low-complexity near-optimal signal detection for uplink large-scale MIMO systems”, *Electronics Letters*, c. 50, sayı 18, ss. 1326–1328, 2014.
- [76] Y. Kim, Jae Hyun Seo, Heung Mook Kim, ve S. Kim, “Soft linear MMSE detection for coded MIMO systems”, 19. *Asia-Pacific Conference on Communications (APCC)*, Denpasar, Indonesia, 2013, ss. 657–660.
- [77] R. Bohnke, D. Wubben, V. Kuhn, ve K.-D. Kammeyer, “Reduced complexity MMSE detection for BLAST architectures”, 3. *IEEE Global Telecommunications Conference (IEEE Cat. No.03CH37489)*, San Francisco, CA, USA, 2003, ss. 2258–2262.
- [78] B. Yin, M. Wu, J. R. Cavallaro, ve C. Studer, “Conjugate gradient-based soft-output detection and precoding in massive MIMO systems”, *IEEE Global Communications Conference*, Austin, TX, USA, 2014, ss. 3696–3701.
- [79] B. Yin, M. Wu, J. R. Cavallaro, ve C. Studer, “VLSI design of large-scale soft-output MIMO detection using conjugate gradients”, *IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, Lisbon, Portugal, 2015, ss. 1498–1501.
- [80] O. Gustafsson, E. Bertilsson, J. Klasson, ve C. Ingemarsson, “Approximate Neumann Series or Exact Matrix Inversion for Massive MIMO?”, 24. *IEEE Symposium on Computer Arithmetic (ARITH)*, London, UK, 2017, ss. 62–63.
- [81] B. Kang, J.-H. Yoon, ve J. Park, “Low-Complexity Massive MIMO Detectors Based on Richardson Method”, *ETRI Journal*, c. 39, sayı 3, ss. 326–335, 2017.
- [82] J. Zhou, Y. Ye, ve J. Hu, “Biased MMSE soft-output detection based on Jacobi method in massive MIMO”, *IEEE International Conference on Communication Problem-solving*, Beijing, China, 2014, ss. 442–445.
- [83] Z. Wu, C. Zhang, Y. Xue, S. Xu, ve X. You, “Efficient architecture for soft-output massive MIMO detection with Gauss-Seidel method”, *IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, Montreal, QC, Canada, 2016, ss. 1886–1889.
- [84] R. Chataut, R. Akl, ve U. K. Dey, “Least Square Regressor Selection Based Detection for Uplink 5G Massive MIMO Systems”, 20. *IEEE Wireless and Microwave Technology Conference (WAMICON)*, Cocoa Beach, FL, USA, 2019, ss. 1–6.
- [85] R. Chataut ve R. Akl, “Huber Fitting based ADMM Detection for Uplink 5G Massive MIMO Systems”, 9. *IEEE Annual Ubiquitous Computing, Electronics & Mobile Communication Conference (UEMCON)*, New York, NY, USA, 2018, ss. 33–37.
- [86] S. Yang ve L. Hanzo, “Fifty Years of MIMO Detection: The Road to Large-Scale MIMOs”, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, c. 17, sayı 4, ss. 1941–1988, 2015.
- [87] F. A. P. de Figueiredo, F. A. C. M. Cardoso, J. P. Miranda, I. Moerman, C. F. Dias, ve G. Fraidenraich, “Large-Scale Antenna Systems and Massive Machine Type

- Communications”, *International Journal of Wireless Information Networks*, 2020.
- [88] D. Tse ve P. Viswanath, *Fundamentals of Wireless Communication*. Cambridge University Press, 2005.
 - [89] J. Minango, C. de Almeida, ve C. Daniel Altamirano, “Low-complexity MMSE detector for massive MIMO systems based on Damped Jacobi method”, 28. *IEEE Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, Montreal, QC, Canada, 2017, ss. 1–5.
 - [90] Q. Hu, M. Zhang, ve R. Gao, “Key Technologies in Massive MIMO”, *ITM Web of Conferences*, Wuhan, China, 2018.
 - [91] E. Bjornson, M. Bengtsson, ve B. Ottersten, “Optimal Multiuser Transmit Beamforming: A Difficult Problem with a Simple Solution Structure [Lecture Notes]”, *IEEE Signal Processing Magazine*, c. 31, sayı 4, ss. 142–148, 2014.
 - [92] A. Kammoun, A. Muller, E. Bjornson, ve M. Debbah, “Linear Precoding Based on Polynomial Expansion: Large-Scale Multi-Cell MIMO Systems”, *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, c. 8, sayı 5, ss. 861–875, 2014.
 - [93] M. A. Albreem, A. H. A. Habbash, A. M. Abu-Hudrouss, ve S. S. Ikki, “Overview of Precoding Techniques for Massive MIMO”, *IEEE Access*. 2021.
 - [94] T. L. Marzetta, “Massive MIMO: An Introduction”, *Bell Labs Technical Journal*, c. 20, ss. 11–22, 2015.
 - [95] B. M. Lee ve H. Yang, “Massive MIMO for Industrial Internet of Things in Cyber-Physical Systems”, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, c. 14, sayı 6, ss. 2641–2652, 2018.
 - [96] B. M. Lee, “Cell-Free Massive MIMO for Massive Low Power Internet of Things Networks”, *IEEE Internet of Things Journal*, ss. 1–1, 2021.
 - [97] D. Ciuonzo, P. S. Rossi, ve S. Dey, “Massive MIMO channel-aware decision fusion”, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2015.
 - [98] D. Ciuonzo, P. S. Rossi, ve S. Dey, “Massive MIMO meets decision fusion: Decode-and-fuse vs. decode-then-fuse”, *IEEE Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop*, 2014.
 - [99] H. Yan ve H. Yang, “Pilot Length and Channel Estimation for Massive MIMO IoT Systems”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020.
 - [100] L. Liu ve W. Yu, “Massive Connectivity With Massive MIMO—Part I: Device Activity Detection and Channel Estimation”, *IEEE Transactions on Signal Processing*, c. 66, sayı 11, ss. 2933–2946, 2018.
 - [101] S. Rao, A. Ashikhmin, ve H. Yang, “Internet of Things Based on Cell-Free Massive MIMO”, *Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, Pacific Grove, CA, USA, 2019.
 - [102] H. Yan, A. Ashikhmin, ve H. Yang, “Optimally Supporting IoT with Cell-Free Massive MIMO”, *IEEE Global Communications Conference, GLOBECOM 2020 - Proceedings*, Taipei, Taiwan, 2020.
 - [103] H. Luo, Z. Huang, ve T. Zhu, “A survey on spectrum utilization in wireless sensor networks”, *Journal of Sensors*, 2015.
 - [104] Y. W. Kuo, C. L. Li, J. H. Jhang, ve S. Lin, “Design of a Wireless Sensor Network-

Based IoT Platform for Wide Area and Heterogeneous Applications”, *IEEE Sensors Journal*, 2018.

- [105] H. Wu ve Y. Chen, “Optimal time assignment policy for maximizing throughput in cognitive sensor network with energy harvesting”, *Sensors (Switzerland)*, 2018.
- [106] A. Bousia, E. Kartsakli, A. Antonopoulos, L. Alonso, ve C. Verikoukis, “Multiobjective Auction-Based Switching-Off Scheme in Heterogeneous Networks: To Bid or Not to Bid?”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016.
- [107] S. Mumtaz, A. Al-Dulaimi, K. M. S. Huq, F. B. Saghezchi, ve J. Rodriguez, “WiFi in Licensed Band”, *IEEE Communications Letters*, 2016.
- [108] T. D. Nguyen, J. Y. Khan, ve D. T. Ngo, “A Distributed Energy-Harvesting-Aware Routing Algorithm for Heterogeneous IoT Networks”, *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 2018.
- [109] M. Payaró i Llisterri, “Impact of channel state information on the analysis and design of multi-antenna communication systems”, December 2006.
- [110] F. Fernandes, A. Ashikhmin, ve T. L. Marzetta, “Inter-Cell Interference in Noncooperative TDD Large Scale Antenna Systems”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, c. 31, sayı 2, ss. 192–201, 2013.
- [111] B. Hassibi ve B. M. Hochwald, “How much training is needed in multiple-antenna wireless links?”, *IEEE Transactions on Information Theory*, c. 49, sayı 4, ss. 951–963, 2003.
- [112] J. C. Shen, J. Zhang, E. Alsusa, ve K. B. Letaief, “Compressed CSI Acquisition in FDD Massive MIMO: How Much Training is Needed?”, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2016, c. 15, sayı 6, ss. 4145–4156.
- [113] T. Van Chien, E. Bjornson, ve E. G. Larsson, “Downlink power control for massive MIMO cellular systems with optimal user association”, *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Kuala Lumpur, Malaysia, 2016, ss. 1–6.
- [114] S. K. Mohammed ve E. G. Larsson, “Single-user beamforming in large-scale MISO systems with per-antenna constant-envelope constraints: The doughnut channel”, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, c. 11, sayı 11, ss. 3992–4005, 2012.
- [115] A. Salh, L. Audah, N. S. M. Shah, ve S. A. Hamzah, “A study on the achievable data rate in massive MIMO system”, *AIP Conference Proceedings*, c. 1883, sayı 1, ss. 020014, 2017.
- [116] T. Van Chien, E. Björnson, E. G. Larsson, ve T. A. Le, “Distributed Power Control in Downlink Cellular Massive MIMO Systems”, 22. *International ITG Workshop on Smart Antennas*, Bochum, Germany, 2018, ss 1-7.
- [117] S. Buzzi, C.-L. I, T. E. Klein, H. V. Poor, C. Yang, ve A. Zappone, “A Survey of Energy-Efficient Techniques for 5G Networks and Challenges Ahead”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, c. 34, sayı 4, ss. 697–709, 2016.
- [118] A. Zappone, L. Sanguinetti, G. Bacci, E. Jorswieck, ve M. Debbah, “Energy-Efficient Power Control: A Look at 5G Wireless Technologies”, *IEEE Transactions on Signal Processing*, c. 64, sayı 7, ss. 1668–1683, 2016.
- [119] D. Bhang ve C. Dethe, “Performance Optimization of LS/LMMSE Using Swarm

- Intelligence in 3D MIMO-OFDM Systems”, *Traitement du Signal*, c. 37, sayı 1, ss. 107–112, 2020.
- [120] T. L. Marzetta, “How much training is required for multiuser MIMO?”, *Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, Pacific Grove, CA, USA, 2006, ss. 359–363.
 - [121] T. L. Marzetta, “BLAST training: Estimating channel characteristics for high capacity space-time wireless”, *Proceedings of the Annual Allerton Conference on Communication Control and Computing*, Monticello, IL, USA, 1999, ss. 958–966.
 - [122] V. Raghavan, G. Hariharan, ve A. M. Sayeed, “Capacity of Sparse Multipath Channels in the Ultra-Wideband Regime”, *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, c. 1, sayı 3, ss. 357–371, 2007.
 - [123] A. S. Alwakeel ve A. M. H. Mehana, “Achievable Rates in Uplink Massive MIMO Systems with Pilot Hopping”, *IEEE Transactions on Communications*, c. 65, sayı 10, ss. 4232–4246, 2017.
 - [124] M. Karlsson ve E. G. Larsson, “On the operation of massive MIMO with and without transmitter CSI”, *15. IEEE International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC)*, Toronto, ON, Canada, 2014, ss. 1–5.
 - [125] M. B. Khalilsarai, S. Haghighatshoar, X. Yi, ve G. Caire, “FDD Massive MIMO: Efficient Downlink Probing and Uplink Feedback via Active Channel Sparsification”, *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Kansas City, MO, USA, 2018, ss. 1–6.
 - [126] T. L. Marzetta, “How Much Training is Required for Multiuser MIMO?”, *Fortieth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, Pacific Grove, CA, USA, 2006, ss. 359–363.
 - [127] Y. Wu, T. Liu, M. Cao, L. Li, ve W. Xu, “Pilot contamination reduction in massive MIMO systems based on pilot scheduling”, *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, c. 2018, sayı 1, s. 21, 2018.
 - [128] K. Upadhyay, S. A. Vorobyov, ve M. Vehkaperä, “Downlink Performance of Superimposed Pilots in Massive MIMO Systems”, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, c. 17, sayı 10, ss. 6630–6644, 2018.
 - [129] A. S. Alwakeel ve A. H. Mehana, “Multi-cell MMSE data detection for massive MIMO: new simplified bounds”, *IET Communications*, c. 13, sayı 15, ss. 2386–2394, 2019.
 - [130] S. K. Sengupta ve S. M. Kay, “Fundamentals of Statistical Signal Processing: Estimation Theory”, *Technometrics*, c. 37, sayı 4, s. 465, 1995.
 - [131] J. W. Silverstein ve Z. D. Bai, “On the Empirical Distribution of Eigenvalues of a Class of Large Dimensional Random Matrices”, *Journal of Multivariate Analysis*, c. 54, sayı 2, ss. 175–192, 1995.
 - [132] A. S. Alwakeel, A. H. Mehana, ve A. Ghoneim, “Pilot hopping in multi-cell massive MIMO systems: Pilot assignment and new results”, *International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC)*, Silicon Valley, CA, USA, 2017, ss. 460–464.
 - [133] X. Li, E. Bjornson, E. G. Larsson, S. Zhou, ve J. Wang, “A Multi-Cell MMSE

- Detector for Massive MIMO Systems and New Large System Analysis”, *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, San Diego, CA, USA, 2014, ss. 1–6.
- [134] M. Bashar, K. Cumanan, A. G. Burr, M. Debbah, ve H. Q. Ngo, “Enhanced Max-Min SINR for Uplink Cell-Free Massive MIMO Systems”, *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Kansas City, MO, USA, 2018, ss. 1–6.
 - [135] E. Björnson, J. Hoydis, ve L. Sanguinetti, “Massive MIMO Networks: Spectral, Energy, and Hardware Efficiency”, *Foundations and Trends® in Signal Processing*, c. 11, sayı 3–4, ss. 154–655, 2017.
 - [136] A. Adhikary, A. Ashikhmin, ve T. L. Marzetta, “Uplink Interference Reduction in Large-Scale Antenna Systems”, *IEEE Transactions on Communications*, c. 65, sayı 5, ss. 2194–2206, 2017.
 - [137] H. Yin, D. Gesbert, M. Filippou, ve Y. Liu, “A coordinated approach to channel estimation in large-scale multiple-antenna systems”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2013.
 - [138] D. Lee, G. Y. Li, ve S. Tang, “Inter-cell interference coordination for LTE systems”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2013.
 - [139] I. Atzeni, J. Arnau, ve M. Debbah, “Fractional pilot reuse in massive MIMO systems”, *IEEE International Conference on Communication Workshop (ICCW)*, London, UK, 2015, ss. 1030–1035.
 - [140] V. H. Mac Donald, “Advanced Mobile Phone Service: The Cellular Concept”, *Bell System Technical Journal*, c. 58, sayı 1, ss. 15–41, 1979.
 - [141] M. H. A. Khan, J.-G. Chung, ve M. H. Lee, “Downlink performance of cell edge using cooperative BS for multicell cellular network”, *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, c. 2016, sayı 1, s. 56, 2016.
 - [142] E. Björnson, L. Sanguinetti, J. Hoydis, ve M. Debbah, “Optimal Design of Energy-Efficient Multi-User MIMO Systems: Is Massive MIMO the Answer?”, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, c. 14, sayı 6, ss. 3059–3075, 2015.
 - [143] F. Boccardi, R. W. Heath, A. Lozano, T. L. Marzetta, ve P. Popovski, “Five disruptive technology directions for 5G”, *IEEE Communications Magazine*, c. 52, sayı 2, ss. 74–80, 2014.
 - [144] C.-X. Wang vd., “Cellular architecture and key technologies for 5G wireless communication networks”, *IEEE Communications Magazine*, c. 52, sayı 2, ss. 122–130, 2014.
 - [145] H. Yang ve T. L. Marzetta, “Performance of Conjugate and Zero-Forcing Beamforming in Large-Scale Antenna Systems”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, c. 31, sayı 2, ss. 172–179, 2013.
 - [146] M. Matthaiou, C. Zhong, M. R. McKay, ve T. Ratnarajah, “Sum Rate Analysis of ZF Receivers in Distributed MIMO Systems”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, c. 31, sayı 2, ss. 180–191, 2013.
 - [147] P. Liu, S. Jin, T. Jiang, Q. Zhang, ve M. Matthaiou, “Pilot Power Allocation Through User Grouping in Multi-Cell Massive MIMO Systems”, *IEEE Transactions on Communications*, c. 65, sayı 4, ss. 1561–1574, 2017.
 - [148] L. Zhao, H. Zhao, F. Hu, K. Zheng, ve J. Zhang, “Energy Efficient Power

- Allocation Algorithm for Downlink Massive MIMO with MRT Precoding”, 78. *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall)*, Las Vegas, NV, USA, 2013, ss. 1–5.
- [149] H. Q. Ngo, A. Ashikhmin, H. Yang, E. G. Larsson, ve T. L. Marzetta, “Cell-Free Massive MIMO Versus Small Cells”, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, c. 16, sayı 3, ss. 1834–1850, 2017.
 - [150] E. Nayebi, A. Ashikhmin, T. L. Marzetta, H. Yang, ve B. D. Rao, “Precoding and Power Optimization in Cell-Free Massive MIMO Systems”, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, c. 16, sayı 7, ss. 4445–4459, 2017.
 - [151] H. Q. Ngo, A. Ashikhmin, H. Yang, E. G. Larsson, ve T. L. Marzetta, “Cell-Free Massive MIMO: Uniformly great service for everyone”, 16. *IEEE International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC)*, Stockholm, Sweden, 2015, ss. 201–205.
 - [152] E. Nayebi, A. Ashikhmin, T. L. Marzetta, ve B. D. Rao, “Performance of cell-free massive MIMO systems with MMSE and LSFD receivers”, 50. *Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, Pacific Grove, CA, USA, 2016, ss. 203–207.
 - [153] M. Bashar, K. Cumanan, A. G. Burr, M. Debbah, ve H. Q. Ngo, “On the Uplink Max–Min SINR of Cell-Free Massive MIMO Systems”, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, c. 18, sayı 4, ss. 2021–2036, 2019.
 - [154] S. Buzzi ve A. Zappone, “Downlink power control in user-centric and cell-free massive MIMO wireless networks”, 28. *IEEE Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, Montreal, QC, Canada, 2017, ss. 1–6.
 - [155] T. H. Nguyen, T. K. Nguyen, H. D. Han, ve V. D. Nguyen, “Optimal Power Control and Load Balancing for Uplink Cell-Free Multi-User Massive MIMO”, *IEEE Access*, c. 6, ss. 14462–14473, 2018.
 - [156] G. Interdonato, E. Björnson, H. Quoc Ngo, P. Frenger, ve E. G. Larsson, “Ubiquitous cell-free Massive MIMO communications”, *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, c. 2019, sayı 1, s. 197, 2019.
 - [157] H. Q. Ngo, L.-N. Tran, T. Q. Duong, M. Matthaiou, ve E. G. Larsson, “Energy efficiency optimization for cell-free massive MIMO”, 18. *IEEE International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC)*, Sapporo, Japan, 2017, ss. 1–5.
 - [158] L. D. Nguyen, T. Q. Duong, H. Q. Ngo, ve K. Tourki, “Energy Efficiency in Cell-Free Massive MIMO with Zero-Forcing Precoding Design”, *IEEE Communications Letters*, c. 21, sayı 8, ss. 1871–1874, 2017.
 - [159] H. Q. Ngo, L.-N. Tran, T. Q. Duong, M. Matthaiou, ve E. G. Larsson, “On the Total Energy Efficiency of Cell-Free Massive MIMO”, *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, c. 2, sayı 1, ss. 25–39, 2018.
 - [160] C. W. Tan, “Wireless network optimization by perron-frobenius theory”, *Foundations and Trends in Networking*, c. 9, sayı 2–3, ss. 107–218, 2014.
 - [161] T. Van Chien, E. Bjornson, ve E. G. Larsson, “Joint Power Allocation and User Association Optimization for Massive MIMO Systems”, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, c. 15, sayı 9, ss. 6384–6399, 2016.

- [162] H. Yang ve T. L. Marzetta, “Massive MIMO With Max-Min Power Control in Line-of-Sight Propagation Environment”, *IEEE Transactions on Communications*, c. 65, sayı 11, ss. 4685–4693, 2017.
- [163] T. Van Chien, E. Bjornson, ve E. G. Larsson, “Joint Pilot Design and Uplink Power Allocation in Multi-Cell Massive MIMO Systems”, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, c. 17, sayı 3, ss. 2000–2015, 2018.
- [164] R. S. Kshetrimayum, *Fundamentals of MIMO Wireless Communications*. Cambridge University Press, 2017.
- [165] O. Dikmen ve S. Kulac, “A New Method in Pilot Reuse Factor Selection in Spectrum Efficient Massive MIMO Systems”, *Elektronika ir Elektrotechnika*, c. 25, sayı 6, ss. 70–77, 2019.
- [166] G. Caire, G. Taricco, ve E. Biglieri, “Optimum power control over fading channels”, *IEEE Transactions on Information Theory*, c. 45, sayı 5, ss. 1468–1489, 1999.
- [167] R. S. Cheng ve S. Verdu, “Gaussian multiaccess channels with ISI: capacity region and multiuser water-filling”, *IEEE Transactions on Information Theory*, c. 39, sayı 3, ss. 773–785, 1993.
- [168] Wei Yu ve J. M. Cioffi, “On constant power water-filling”, *IEEE International Conference on Communications. Conference Record (Cat. No.01CH37240)*, Helsinki, Finland, 2001, c. 6, ss. 1665–1669.
- [169] Xi Zhang ve B. Ottersten, “Power allocation and bit loading for spatial multiplexing in MIMO systems”, *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP '03)*, Hong Kong, China, 2003, c. 5, ss. V-53–6.
- [170] S. A. Nezamalhosseni ve L. R. Chen, “Optimal Power Allocation for MIMO Underwater Wireless Optical Communication Systems Using Channel State Information at the Transmitter”, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, c. 46, sayı 1, ss. 319–325, 2021.
- [171] F. Tan, H. Chen, F. Zhao, ve X. Li, “Energy-efficient power allocation for massive MIMO-enabled multi-way AF relay networks with channel aging”, *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, c. 2018, sayı 1, s. 206, 2018.
- [172] P. Gandotra ve R. K. Jha, “A survey on green communication and security challenges in 5G wireless communication networks”, *Journal of Network and Computer Applications*, c. 96, ss. 39–61, 2017.
- [173] C. E. Shannon, “A Mathematical Theory of Communication”, *Bell System Technical Journal*, c. 27, sayı 3, ss. 379–423, 1948.
- [174] T. M. Duman ve A. Ghayeb, *Coding for MIMO Communication Systems*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2007.
- [175] H. Khaleghi Bizaki, Ed., *MIMO Systems, Theory and Applications*. InTech, 2011.
- [176] B. Vucetic ve J. Yuan, *Space-Time Coding*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2003.
- [177] P. Ivanis ve D. Drajić, “Combined optimal power allocation and adaptive modulation for MIMO systems with imperfect CSI”, *6. International Conference*

on Telecommunications in Modern Satellite, Cable and Broadcasting Service (TELSIKS 2003), Nis, Yugoslavia, 2003, c. 1, ss. 167–170.

- [178] A. Yoshimoto ve T. Hattori, “Area Coverage of a Multi-Link MIMO System with Water Filling Power Allocation Strategy”, 66. *IEEE Vehicular Technology Conference*, Baltimore, MD, USA, 2007, ss. 1137–1141.
- [179] N. Prayongpun ve K. Raoof, “MIMO Channel Capacity with Polarization Diversity and Power Allocation Technique”, *IEEE International Conference on Signal Processing and Communications*, Dubai, United Arab Emirates, 2007, ss. 185–188.
- [180] M. A. Khalighi, J.-M. Brossier, G. V. Jourdain, ve K. Raoof, “Water filling capacity of Rayleigh MIMO channels”, 12. *IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. PIMRC 2001 (Cat. No.01TH8598)*, San Diego, CA, USA, 2001, c. 1, s. A-155-A-158.
- [181] Chang Soon Park ve Kwang Bok Lee, “Transmit power allocation for BER performance improvement in multicarrier systems”, 13. *IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, Lisbon, Portugal, 2002, c. 5, ss. 2049–2053.
- [182] B. Hu, Q. Sun, J. Wang, ve C. Xu, “Joint power allocation and antenna selection for energy-efficient OFDM D-MIMO systems”, 6. *International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)*, Hefei, China, 2014, ss. 1–5.
- [183] D. Wubben ve Y. Lang, “Near-Optimum Power Allocation for Outage Restricted Distributed MIMO Multi-Hop Networks”, *IEEE Global Telecommunications Conference*, New Orleans, LA, USA, 2008, ss. 1–5.
- [184] B. Clerckx ve Claude Oestges, *Mimo Wireless Networks*. Elsevier, 2013.
- [185] T. Li, H. Yu, ve S. Liu, “Adaptive Power Allocation for Decode-and-Forward MIMO-OFDM Relay System”, 5. *International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*, Beijing, China, 2009, ss. 1–4.
- [186] X. Yu, Y. Du, X. Dang, S.-H. Leung, ve H. Wang, “Power Allocation Schemes for Uplink Massive MIMO System in the Presence of Imperfect CSI”, *IEEE Transactions on Signal Processing*, c. 68, ss. 5968–5982, 2020.
- [187] Yidong Lang, D. Wubben, C. Bockelmann, ve K.-D. Kammeyer, “A closed power allocation solution for outage restricted distributed MIMO multi-hop networks”, 6. *International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks and Workshops*, Berlin, Germany, 2008, ss. 65–70.
- [188] D. Wubben, “Evaluation of Outage Restricted Distributed MIMO Multi-Hop Networks by the Improved Approximative Power Allocation”, 68. *IEEE Vehicular Technology Conference*, Calgary, AB, Canada, 2008, ss. 1–5.
- [189] K. A. Bonsu, W. Zhou, S. Pan, ve Y. Yan, “Optimal power allocation with limited feedback of channel state information in multi-user MIMO systems”, *China Communications*, c. 17, sayı 2, ss. 163–175, 2020.
- [190] S. Pan, K. Chen, Y. Chen, ve W. Zhou, “QoS-guaranteed energy and throughput joint optimisation in multi-user multiple-input multiple-output systems”, *IET Communications*, c. 11, sayı 14, ss. 2164–2172, 2017.

- [191] L. Chen, S. Han, W. Meng, C. Li, ve M. Berhane, “Power Allocation for Single-Stream Dual-Hop Full-Duplex Decode-and-Forward MIMO Relay”, *IEEE Communications Letters*, c. 20, sayı 4, ss. 740–743, 2016.
- [192] F. H. Panahi, T. Ohtsuki, W. Jiang, Y. Takatori, ve T. Nakagawa, “Joint Interference Alignment and Power Allocation for Multi-User MIMO Interference Channels Under Perfect and Imperfect CSI”, *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, c. 1, sayı 2, ss. 131–144, 2017.
- [193] R. T. Krishnamachari, M. K. Varanasi, ve K. Mohanty, “MIMO Systems With Quantized Covariance Feedback”, *IEEE Transactions on Signal Processing*, c. 62, sayı 2, ss. 485–495, 2014.
- [194] T. E. Bogale ve Long Bao Le, “Pilot optimization and channel estimation for multiuser massive MIMO systems”, *48. Annual Conference on Information Sciences and Systems (CISS)*, Princeton, NJ, USA, 2014, ss. 1–6.
- [195] Y. Zhao, I. G. Niemegeers, ve S. H. De Groot, “Power Allocation in Cell-Free Massive MIMO: A Deep Learning Method”, *IEEE Access*, c. 8, ss. 87185–87200, 2020.
- [196] R. Hamdi, E. Driouch, ve W. Ajib, “Resource Allocation in Downlink Large-Scale MIMO Systems”, *IEEE Access*, c. 4, ss. 8303–8316, 2016.
- [197] P. Yang, Y. Xiao, B. Zhang, S. Li, M. El-Hajjar, ve L. Hanzo, “Power Allocation-Aided Spatial Modulation for Limited-Feedback MIMO Systems”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, c. 64, sayı 5, ss. 2198–2204, 2015.
- [198] Y. Du, X. Yu, X. Wang, Q. Zhu, ve T. Liu, “Spectrum Efficiency Optimization for Uplink Massive MIMO System with Imperfect Channel State Information”, *11. International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)*, 2019, ss. 1–5.
- [199] S. S. Hosseini, B. Champagne, ve X.-W. Chang, “A Green Downlink Power Allocation Scheme for Cell-Free Massive MIMO Systems”, *IEEE Access*, c. 9, ss. 6498–6512, 2021.
- [200] A. Khansefid ve H. Minn, “Asymptotically optimal power allocation for massive MIMO uplink”, *IEEE Global Conference on Signal and Information Processing (GlobalSIP)*, Atlanta, GA, USA, 2014, ss. 627–631.
- [201] C. W. Tan, M. Chiang, ve R. Srikant, “Fast Algorithms and Performance Bounds for Sum Rate Maximization in Wireless Networks”, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, c. 21, sayı 3, ss. 706–719, 2013.
- [202] P. C. Weeraddana, *Weighted Sum-Rate Maximization in Wireless Networks: A Review*. now Publishers Inc, 2011.
- [203] A. Gjendemsjo, D. Gesbert, G. E. Oien, ve S. G. Kiani, “Binary Power Control for Sum Rate Maximization over Multiple Interfering Links”, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, c. 7, sayı 8, ss. 3164–3173, 2008.
- [204] X. Wu, W. Xu, X. Dong, H. Zhang, ve X. You, “Asymptotically Optimal Power Allocation for Massive MIMO Wireless Powered Communications”, *IEEE Wireless Communications Letters*, c. 5, sayı 1, ss. 100–103, 2016.
- [205] C. Sun, X. Gao, ve Z. Ding, “BDMA in Multicell Massive MIMO Communications: Power Allocation Algorithms”, *IEEE Transactions on Signal*

Processing, c. 65, sayı 11, ss. 2962–2974, 2017.

- [206] Y. Cheng ve M. Pesavento, “Joint Optimization of Source Power Allocation and Distributed Relay Beamforming in Multiuser Peer-to-Peer Relay Networks”, *IEEE Transactions on Signal Processing*, c. 60, sayı 6, ss. 2962–2973, 2012.
- [207] A. L. Yuille ve A. Rangarajan, “The concave-convex procedure (CCCP)”, *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2002.
- [208] B. K. Sriperumbudur ve G. R. G. Lanckriet, “On the convergence of the concave-convex procedure”, *Advances in Neural Information Processing Systems* 22, 2009.
- [209] T. Weise, “Global Optimization Algorithms–Theory and Application”, URL: [http://www. it-weise. de](http://www.it-weise.de), *Abrufdatum*, Vancouver, British Columbia, Canada, 2009.
- [210] S. Chakraborty, O. T. Demir, E. Bjornson, ve P. Giselsson, “Efficient Downlink Power Allocation Algorithms for Cell-Free Massive MIMO Systems”, *IEEE Open Journal of the Communications Society*, c. 2, sayı December 2020, ss. 168–186, 2020.
- [211] G. Interdonato, P. Frenger, ve E. G. Larsson, “Scalability Aspects of Cell-Free Massive MIMO”, *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Shanghai, China, 2019, ss. 1–6.
- [212] O. Saatlou, M. O. Ahmad, ve M. N. S. Swamy, “Optimal power allocation for massive MU-MIMO downlink TDD systems”, *IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE)*, Vancouver, BC, Canada, 2016, ss. 1–4.
- [213] H. V. Cheng, E. Bjornson, ve E. G. Larsson, “Optimal Pilot and Payload Power Control in Single-Cell Massive MIMO Systems”, *IEEE Transactions on Signal Processing*, c. 65, sayı 9, ss. 2363–2378, 2017.
- [214] J. Joung ve E.-R. Jeong, “Multiuser Space–Time Line Code With Optimal and Suboptimal Power Allocation Methods”, *IEEE Access*, c. 6, ss. 51766–51775, 2018.
- [215] M. S. Ali, E. Hossain, ve D. I. Kim, “Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) for Downlink Multiuser MIMO Systems: User Clustering, Beamforming, and Power Allocation”, *IEEE Access*, c. 5, ss. 565–577, 2017.
- [216] X. Li, C. Tepedelenlioglu, ve H. Senol, “Optimal Power Allocation between Training and Data for MIMO Two-Way Relay Channels”, *IEEE Communications Letters*, c. 19, sayı 11, ss. 1941–1944, 2015.
- [217] W. Hao, O. Muta, H. Gacanin, ve H. Furukawa, “Power Allocation for Massive MIMO Cognitive Radio Networks With Pilot Sharing Under SINR Requirements of Primary Users”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, c. 67, sayı 2, ss. 1174–1186, 2018.
- [218] Y. Dai ve X. Dong, “Power Allocation for Multi-Pair Massive MIMO Two-Way AF Relaying With Linear Processing”, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, c. 15, sayı 9, ss. 5932–5946, 2016.
- [219] H. T. Dao ve S. Kim, “Disjoint Pilot Power and Data Power Allocation in Multi-Cell Multi-User Massive MIMO Systems”, *IEEE Access*, c. 6, ss. 66513–66521, 2018.

- [220] T. Van Chien, E. Bjornson, ve E. G. Larsson, “Joint Power Allocation and Load Balancing Optimization for Energy-Efficient Cell-Free Massive MIMO Networks”, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, c. 19, sayı 10, ss. 6798–6812, 2020.
- [221] L. Sanguinetti, A. Zappone, ve M. Debbah, “Deep Learning Power Allocation in Massive MIMO”, *52. Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers*, Pacific Grove, CA, USA, 2018, ss. 1257–1261.
- [222] M. A. Wijaya, K. Fukawa, ve H. Suzuki, “Intercell-Interference Cancellation and Neural Network Transmit Power Optimization for MIMO Channels”, *82. IEEE Vehicular Technology Conference (VTC2015-Fall)*, Boston, MA, USA, 2015, ss. 1–5.
- [223] T. Van Chien, T. Nguyen Canh, E. Bjornson, ve E. G. Larsson, “Power Control in Cellular Massive MIMO With Varying User Activity: A Deep Learning Solution”, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, c. 19, sayı 9, ss. 5732–5748, 2020.
- [224] Q. Zhang, S. Jin, M. McKay, D. Morales-Jimenez, ve H. Zhu, “Power Allocation Schemes for Multicell Massive MIMO Systems”, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, c. 14, sayı 11, ss. 5941–5955, 2015.
- [225] H. Gao, Y. Su, S. Zhang, ve M. Diao, “Antenna selection and power allocation design for 5G massive MIMO uplink networks”, *China Communications*, 2019.
- [226] X. Wu, Z. Ma, X. Chen, F. Labeau, ve S. Han, “Energy Efficiency-Aware Joint Resource Allocation and Power Allocation in Multi-User Beamforming”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, c. 68, sayı 5, ss. 4824–4833, 2019.
- [227] M. Patra, R. Thakur, ve C. S. R. Murthy, “Improving Delay and Energy Efficiency of Vehicular Networks Using Mobile Femto Access Points”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, c. 66, sayı 2, ss. 1496–1505, 2017.
- [228] R. S. Prabhu ve B. Daneshrad, “An Energy-Efficient Water-Filling Algorithm for OFDM Systems”, *IEEE International Conference on Communications*, 2010, ss. 1–5.
- [229] C. Sun, J. Ge, J. Li, ve B. Zhu, “Low complexity user scheduling algorithm for energy-efficient multiuser multiple-input multiple-output systems”, *IET Communications*, c. 8, sayı 3, ss. 343–350, 2014.
- [230] T. V. K. Chaitanya ve T. Le-Ngoc, “Energy-Efficient Adaptive Power Allocation for Incremental MIMO Systems”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, c. 65, sayı 4, ss. 2820–2827, 2016.
- [231] A. Salh, N. S. M. Shah, L. Audah, Q. Abdullah, W. A. Jabbar, ve M. Mohamad, “Energy-Efficient Power Allocation and Joint User Association in Multiuser-Downlink Massive MIMO System”, *IEEE Access*, c. 8, ss. 1314–1326, 2020.
- [232] L. Sboui, Z. Rezki, ve M.-S. Alouini, “Energy-Efficient Power Allocation for MIMO-SVD Systems”, *IEEE Access*, c. 5, ss. 9774–9784, 2017.
- [233] S. S. Vilni, “Cooperative Energy Efficient Power Allocation Algorithm for Downlink Massive MIMO”, *arXiv*. 2018.
- [234] P. Liu, Y. Li, W. Cheng, W. Zhang, ve X. Gao, “Energy-Efficient Power Allocation for Millimeter Wave BeamSpace MIMO-NOMA Systems”, *IEEE*

- Access, c. 7, ss. 114582–114592, 2019.
- [235] H. Li, J. Cheng, Z. Wang, ve H. Wang, “Joint Antenna Selection and Power Allocation for an Energy-efficient Massive MIMO System”, *IEEE Wireless Communications Letters*, c. 8, sayı 1, ss. 257–260, 2019.
 - [236] A. Salh, L. Audah, N. S. M. Shah, ve S. A. Hamzah, “Energy-efficient and joint optimal power allocation for distributed antennas in massive MIMO systems”, *IEEE Asia Pacific Microwave Conference (APMC)*, Kuala Lumpur, Malaysia, 2017, ss. 881–884.
 - [237] H. Li, Z. Wang, ve H. Wang, “Power Allocation for an Energy-Efficient Massive MIMO System With Imperfect CSI”, *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, c. 4, sayı 1, ss. 46–56, 2020.
 - [238] Y. Lin, Y. Wang, C. Li, Y. Huang, ve L. Yang, “Joint Design of User Association and Power Allocation With Proportional Fairness in Massive MIMO HetNets”, *IEEE Access*, c. 5, ss. 6560–6569, 2017.
 - [239] M. Cui, B.-J. Hu, J. Tang, ve Y. Wang, “Energy-Efficient Joint Power Allocation in Uplink Massive MIMO Cognitive Radio Networks With Imperfect CSI”, *IEEE Access*, c. 5, ss. 27611–27621, 2017.
 - [240] X. Yu, W. Xu, S.-H. Leung, Q. Shi, ve J. Chu, “Power Allocation for Energy Efficient Optimization of Distributed MIMO System With Beamforming”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, c. 68, sayı 9, ss. 8966–8981, 2019.
 - [241] F. Tan, T. Lv, ve S. Yang, “Power Allocation Optimization for Energy-Efficient Massive MIMO Aided Multi-Pair Decode-and-Forward Relay Systems”, *IEEE Transactions on Communications*, c. 65, sayı 6, ss. 2368–2381, 2017.
 - [242] J.-H. Kwon vd., “Spectral and energy efficient power allocation for MIMO broadcast channels with individual delay and QoS constraints”, *Journal of Communications and Networks*, c. 22, sayı 5, ss. 390–398, 2020.
 - [243] R. S. Chaves, E. Cetin, M. V. S. Lima, ve W. A. Martins, “On the Convergence of Max-Min Fairness Power Allocation in Massive MIMO Systems”, *IEEE Communications Letters*, c. 24, sayı 12, ss. 2873–2877, 2020.
 - [244] T. L. Marzetta, E. G. Larsson, H. Yang, ve H. Q. Ngo, *Fundamentals of Massive MIMO*. Cambridge University Press, 2016.
 - [245] K. Phan, L. Le, S. Vorobyov, ve T. Le-Ngoc, “Power Allocation and Admission Control in Multiuser Relay Networks via Convex Programming: Centralized and Distributed Schemes”, *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, c. 2009, sayı 1, s. 901965, 2009.
 - [246] D. Verenzuela, E. Bjornson, ve M. Matthaiou, “Optimal Per-Antenna ADC Bit Allocation in Correlated and Cell-Free Massive MIMO”, *IEEE Transactions on Communications*, c. 69, sayı 7, ss. 4767–4780, 2021.
 - [247] A.-S. Bana, L. Sanguinetti, E. De Carvalho, ve P. Popovski, “Outage Analysis of Downlink URLLC in Massive MIMO systems with Power Allocation”, 53. *Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers*, Pacific Grove, CA, USA, 2019, ss. 1394–1398.
 - [248] A. Ghazanfari, E. Bjornson, ve E. G. Larsson, “Optimized Power Control for Massive MIMO With Underlaid D2D Communications”, *IEEE Transactions on*

Communications, c. 67, sayı 4, ss. 2763–2778, 2019.

- [249] S. Zarei, W. Gerstacker, ve R. Schober, “Uplink/downlink duality in massive MIMO systems with hardware impairments”, *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Kuala Lumpur, Malaysia, 2016, ss. 1–7.
- [250] A. Adhikary ve A. Ashikhmin, “Uplink Massive MIMO for Channels with Spatial Correlation”, *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, Abu Dhabi, United Arab Emirates, 2018, ss. 1–6.
- [251] M. Hawej ve Y. R. Shayan, “Evaluation of Massive MU-MIMO Channel Estimation Based on Uplink Achievable-Sum Rate Criteria”, *IEEE Canadian Conference of Electrical and Computer Engineering (CCECE)*, Edmonton, AB, Canada, 2019, ss. 1–5.
- [252] J. Isabona ve V. M. Srivastava, “Downlink Massive MIMO Systems: Achievable Sum Rates and Energy Efficiency Perspective for Future 5G Systems”, *Wireless Personal Communications*, c. 96, sayı 2, ss. 2779–2796, 2017.
- [253] N. Akbar, E. Bjoernson, E. G. Larsson, ve N. Yang, “Downlink Power Control in Massive MIMO Networks with Distributed Antenna Arrays”, *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2018, ss. 1–6.
- [254] G. Interdonato, M. Karlsson, E. Bjornson, ve E. G. Larsson, “Downlink Spectral Efficiency of Cell-Free Massive MIMO with Full-Pilot Zero-Forcing”, *IEEE Global Conference on Signal and Information Processing (GlobalSIP)*, Anaheim, CA, USA, 2018, ss. 1003–1007.
- [255] E. Björnson, “Optimal Resource Allocation in Coordinated Multi-Cell Systems”, *Foundations and Trends® in Communications and Information Theory*, c. 9, sayı 2–3, ss. 113–381, 2013.
- [256] F. A. P. De Figueiredo, F. A. C. M. Cardoso, I. Moerman, ve G. Fraidenraich, “On the Application of Massive MIMO Systems to Machine Type Communications”, *IEEE Access*, 2019.
- [257] A. H. Mehana ve A. Nosratinia, “Diversity of MMSE MIMO Receivers”, *IEEE Transactions on Information Theory*, c. 58, sayı 11, ss. 6788–6805, 2012.
- [258] M. Grant ve S. Boyd, (2021,14,04), “CVX: Matlab software for disciplined convex programming, version 2.0.”, [Online]. Erişim: <http://cvxr.com/cvx>.
- [259] S. S. Boyd ve L. Vandenberghe, *Convex optimization* Boyd, S. S., & Vandenberghe, L. (2004). *Convex optimization. Optimization Methods and Software (Vol. 25)*. Cambridge University Press. 2004.
- [260] J. Zhang, E. Bjornson, M. Matthaiou, D. W. K. Ng, H. Yang, ve D. J. Love, “Prospective Multiple Antenna Technologies for beyond 5G”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2020.
- [261] S. Zhang, Q. Wu, S. Xu, ve G. Y. Li, “Fundamental Green Tradeoffs: Progresses, Challenges, and Impacts on 5G Networks”, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, c. 19, sayı 1, ss. 33–56, 2017.
- [262] S. Asaad, A. M. Rabiei, ve R. R. Muller, “Massive MIMO With Antenna Selection: Fundamental Limits and Applications”, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, c. 17, sayı 12, ss. 8502–8516, 2018.
- [263] B. M. Lee ve H. Yang, “Energy Efficient Massive MIMO in Massive Industrial

- Internet of Things Networks”, *IEEE Internet of Things Journal*, ss. 1–1, 2021.
- [264] S. Zhang vd., “Energy-Efficient Massive MIMO With Decentralized Precoder Design”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, c. 69, sayı 12, ss. 15370–15384, 2020.
- [265] H. Li, Z. Wang, ve H. Wang, “An energy-efficient power allocation scheme for Massive MIMO systems with imperfect CSI”, *Digital Signal Processing*, c. 112, s. 102964, 2021.
- [266] L. You, Y. Huang, D. Zhang, Z. Chang, W. Wang, ve X. Gao, “Energy Efficiency Optimization for Multi-Cell Massive MIMO: Centralized and Distributed Power Allocation Algorithms”, *IEEE Transactions on Communications*, c. 69, sayı 8, ss. 5228–5242, 2021.
- [267] H. T. Dao ve S. Kim, “Power Allocation for Energy Efficiency Maximization in Massive MIMO Systems”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, c. 70, sayı 10, ss. 10570–10579, 2021.
- [268] H. T. Dao ve S. Kim, “Pilot power allocation for maximising the sum rate in massive MIMO systems”, *IET Communications*, c. 12, sayı 11, ss. 1367–1372, 2018.
- [269] Shuguang Cui, A. J. Goldsmith, ve A. Bahai, “Energy-constrained modulation optimization”, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, c. 4, sayı 5, ss. 2349–2360, 2005.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı :Osman DİKMEN

Yabancı Dili :İngilizce

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Doktora	Elektrik Elektronik Müh.	Düzce Üniversitesi	2022
Y. Lisans	Elektrik Elektronik Müh.	Düzce Üniversitesi	2017
Lisans	Elektronik Müh.	Gebze Teknik Üniversitesi	2013
Lise		Yozgat Anadolu Lisesi	2007

YAYINLAR

Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makaleler (SCI, SSCI, Arts and Humanities)

Dikmen O., Kulaç S., 2021. Investigation of Ideal Number User Terminals with Spectrum Efficiency in Next Generation Wireless Communication Systems. Traitement du Signal, 38(1), 115-126., Doi: 10.18280/ts.380112

Dikmen O., Kulaç S., 2019. A New Method in Pilot Reuse Factor Selection in Spectrum Efficient Massive MIMO Systems. Elektronika Ir Elektrotehnika, 25(6), 70-77., Doi: 10.5755/j01.eie.25.6.24829

Dikmen O., Kulaç S., 2019. Determination of Effective Mode Selection for Ensuring Spectrum Efficiency with Massive MIMO in IoT Systems. SENSORS, 19(3), 706, Doi: 10.3390/s19030706

Ulusal hakemli dergilerde yayımlanan makaleler

Dikmen O., Kulaç S., 2021. Power Allocation Algorithms for Massive MIMO System. European Journal of Science and Technology(28), 444-452. Doi: 10.31590/ejosat.1005325

Dikmen O., Kulaç S., 2018. Efficiency of massive MIMO for future wireless communication systems. *Journal of Engineering Research and Applied Science*, 7(2), 944-952

Dikmen O., Kulaç S., 2018. Determining the difficulties of Massive MIMO technology for next generation wireless systems. *Journal of Engineering Research and Applied Science*, 7(2), 896-901

Dikmen O., Kulaç S., 2018. 5. Nesil ve Ötesi Teknolojiler için Çok Girişli Çok Çıkışlı Sistemler ile Spektral Verimliliğin Gerçekleştirilmesi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 6(2), 349-356.

Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitabında basılan bildiriler

Dikmen O., Kulaç S., 2021. Power Allocation Algorithms for Massive MIMO System. *1 st International Conference on Applied Engineering and Natural Sciences* (Özet Bildiri/Sözlü Sunum)

Dikmen O., Kulaç S., 2019. A New Method in Pilot Reuse Factor Selection in Spectrum Efficient Massive MIMO Systems. *ELECTRONICS 2019* (Özet Bildiri/Sözlü Sunum)

Dikmen O., Kulaç S., 2016. 5G Teknolojisine Genel Bir Bakış. *International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science*, 774-782. (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)

Dikmen O., Kulaç S., 2016. İşitme Engelliler İçin ZigBee Tabanlı Ev Otomasyon Sistemi Uygulaması. *1st International Conference on Engeneering Technology and Applied Sciences*, 1049-1052. (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)

Ulusal bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitabında basılan bildiriler

Dikmen O., Kulaç S., 2017. 5G ve Ötesi Teknolojilerde Kullanılacak Olan Büyük Ölçek MIMOSistemi için TDD-FDD Yaklaşımları. *5th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science*, 506-515. (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)

Boyuneğmez F, **Dikmen O.**, Kulaç S., 2017. OFDM Sistemlerde BER Performanslarını Etkileyen Faktörlerin İncelenmesi. *IV. International Multidisciplinary Congress Eurasian*, 268-276. (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)

Dikmen O., Kulaç S., 2017. Gelecek Nesil Kablosuz İletişim Teknolojilerinde Massive MIMO ile Spektrum Verimliliği. *IV. International Multidisciplinary Congress Eurasian*, 551-551. (Özet Bildiri/Sözlü Sunum)

Projelerde Yaptığı Görevler

Gelecek nesil kablosuz iletişim teknolojilerinde çok girişli çok çıkışlı (ÇGÇÇ) tekniklerle performans iyileştirilmesi, Yükseköğretim Kurumları tarafından destekli bilimsel araştırma projesi, Araştırmacı, 20/02/2017 - 20/02/2018 (ULUSAL)

Ödüller

Düzce Üniversitesi Bilimsel Yayınları ve Proje Geliştirmeyi Teşvik Ödülü (2019)