

İKİ KATMANLI AĞLARDA ENİYİ ÇIKIŞ YOLU GÜÇ KONTROLÜ

OPTIMUM UPLINK POWER CONTROL IN TWO-TIER NETWORKS

UYGAR DEMİR

Doç. Dr. Cenk Toker
Tez Danışmanı

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

2014

UYGAR DEMİR'in hazırladığı "**İki Katmanlı Ağlarda Eniyi Çıkış Yolu Güç Kontrolü**" adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **ELEKTRİK VE ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Emre Aktaş

Başkan

.....

Doç. Dr. Cenk Toker

Danışman

.....

Yrd. Doç. Dr. Umut Sezen

Üye

.....

Yrd. Doç. Dr. Berkan Dülek

Üye

.....

Doç. Dr. Sinan Gezici

Üye

.....

Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Fatma SEVİN DÜZ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

... / ... / 20...

Uygar DEMİR

ÖZET

İKİ KATMANLI AĞLARDA ENİYİ ÇIKIŞ YOLU GÜÇ KONTROLÜ

UYGAR DEMİR

Yüksek Lisans, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Cenk Toker

Temmuz 2014, 97 sayfa

Bu yüksek lisans tezi, iki katmanlı ağlarda herhangi bir girişim giderimi tekniği olmaksızın elde edilen veri hızlarını enbüyükten eniyi çıkış yolu güç kontrolü politikasını bulmayı amaçlamaktadır. Önerilen sistem modeli, gelecek nesil iletişim sistemlerinde anahtar rolü oynayacak olan heterojen ağları ve bilişsel radyo ağlarını kapsayacak niteliktedir. Dolayısıyla, sistem modeli, farklı katmanlarda bulunan iki tip kullanıcıdan oluşmaktadır. Katman 2 kullanıcıları, Katman 1 kullanıcıları ile aynı anda spektrumu kullanmaya çalıştıklarından dolayı, Katman 1 kullanıcıları girişimden zarar görürler. Bu tezde, Katman 2'de çıkış yolu senaryosu için iki Katman 2 kullanıcısı varken bireysel güç ve toplam girişim kısıtları altında eniyi güç kontrolü politikası analitik olarak bulunmuştur ve N kullanıcıli durum için kanal duyarlı Zaman Bölümlü Çoklu Erişim (Time Division Multiple Access, TDMA) ve düşük-Sinyal-Gürültü-Oranı (Signal-to-Noise-Ratio, SNR) çözümleri tek giriş tek çıkış (single input single output, SISO) modeli için verilmiştir. Sonrasında, tek giriş çok çıkış (single input multiple output, SIMO) modeli incelenmiş ve aynı kısıtlar altında eniyi doğrusal alıcı ve eniyi güç kontrolü politikası bulunmuştur. Hızlı ve eniyiye yakın bir algoritma önerilmiş ve literatürde iyi bilinen Dışbükeylerin Farkı programlama (Difference of Convex functions (DC) programming) ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca, önerilen algoritma ile hem SISO hem de SIMO modelleri için bazı uygulamalar resmedilmiştir. Tezin sonunda, LTE ve DC programlama ile ilgili iki ek yer almıştır.

Anahtar Kelimeler: Heterojen Ağlar, Bilişsel Radyo, Güç Kontrolü, Dışbükey-olmayan eniyileme, Girişim Kısıtı, DC Programlama, Zaman Bölümlü Çoklu Erişim

ABSTRACT

OPTIMUM UPLINK POWER CONTROL IN TWO-TIER NETWORKS

UYGAR DEMİR

Master of Science, Department of
Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Doç. Dr. Cenk Toker

July 2014, 97 pages

The goal of this thesis is to find optimum uplink power control policy that maximizes sum-rate capacity in the absence of any interference cancellation techniques for two-tier networks. Proposed system model is able to cover both HetNets and cognitive radio networks which will play key roles for next generation communication systems. Therefore, system model consists of two types of users which occupy different tiers. Tier 1 user suffers from interference due to Tier 2 users trying utilize available spectrum at the same time. In this thesis, optimum power control policy under individual peak power and total interference constraints for uplink scenario at Tier 2 with two Tier 2 users is found analytically and in the case of multiple users, channel-aware TDMA and low-SNR solutions are given for SISO model. Furthermore, SIMO model is investigated and optimum linear receiver and optimum power control policy under the same constraints are found. A fast and sub-optimum algorithm is proposed and it is compared with DC programming which is well-known method in literature. Also, some applications are discussed using this algorithm under both SISO and SIMO models. At the end of thesis, a summary of LTE and DC programming are presented.

Keywords: Heterogenous Networks, Cognitive Radio, Power Control, Non-convex Optimization, Interference Constraint, DC Programming, Time Division Multiple Access

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması boyunca bilgi ve deneyimleri ile bana daima yol gösteren ve motivasyonumu bir an bile kaybetmememi sağlayan tez danıőmanım Sayın Doç. Dr. Cenk Toker'e teşekkür ederim.

Deęerli görüş ve önerileriyle bu yolda hep önümü aydınlatan Sayın Doç. Dr. Hazer İnaltekin'e teşekkür ederim.

Bana kazandırdıkları değişik bakış açıları için araştırma görevlisi arkadaşlarım Cansu Sunu'ya ve İbrahim Özkan'a teşekkür ederim.

Sağladıkları güler yüzlü ortam, destek ve yardımları için tüm araştırma görevlisi arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Okul ve akademik hayatım boyunca sevgi ve destekleriyle bana güç veren anneme, babama ve ağabeyime teşekkür ederim.

Bu tez kapsamındaki alıőmalar TUBİTAK 112E024 projesi tarafından desteklenmiştir.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİLLER	vii
ÇİZELGELER	x
SİMGELER VE KISALTMALAR	xi
SÖZLÜK DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
2. ÇOK KATMANLI AĞLAR VE SİSTEM MODELİ	6
2.1. Heterojen Ağlar	6
2.2. Bilişsel Radyo Ağları	7
2.2.1. Bilişsel Radyo Ağ Yapısı ve İşlevleri	9
2.2.2. Spektrum Algılama ve Analizi	11
2.2.3. Dinamik Spektrum Tahsisi ve Paylaşımı	14
2.3. Bilişsel Radyo Ağlarında Güç Kontrolü	16
2.4. Sistem Modeli	17
3. SISO MODELİ	21
3.1. İki tane Katman 2 kullanıcılı senaryo için analitik çözüm	21
3.1.1. Tek Katman 1 kullanıcılı senaryo	21
3.1.2. Birden fazla Katman 1 kullanıcılı senaryo	24
3.2. Çok Sayıda Katman 2 Kullanıcılı Senaryo	26
3.2.1. Kanal duyarlı TDMA çözümü	27
3.2.2. Düşük-SNR durumu	31
4. SIMO MODELİ	35
4.1. SIMO Modelinde Girişim Kısıtı Olmadığında Eniyi Güç Kontrolü	35
4.2. SIMO Modelinde Girişim Kısıtı Altında Eniyi Güç Kontrolü	37

5. BENZETİMDE KULLANILAN ALGORİTMALAR	40
5.1. DC Algoritması (DCA)	40
5.2. Önerilen algoritma	42
5.2.1. Değiştirilmiş Doğrusal-olmayan Programlama (DDP)	43
6. BENZETİM BULGULARI	44
6.1. Kapsamlı Arama ile DCA'nın Karşılaştırılması	44
6.2. TDMA Güç Kontrol Politikasının Olasılığı	46
6.3. Kapsamlı Arama ile Önerilen Algoritmanın Karşılaştırılması	46
6.4. Önerilen Algoritma ile DCA'nın Karşılaştırılması	49
6.5. Değiştirilmiş Doğrusal-olmayan Programlama ve Algoritmaların Karşılaştırılması	51
6.6. Önerilen algoritmanın SISO modele uygulanması	53
6.6.1. Kullanıcı sayısının ve girişim kanallarının etkisi	53
6.6.2. Katman 1 kullanıcısının karşılayabileceği girişim değerinin etkisi	58
6.7. Önerilen algoritma ile SIMO uygulamaları	60
7. SONUÇLAR	63
7.1. Katkılar	63
7.2. Gelecek Çalışmalar	65
KAYNAKLAR	66
EKLER	71
A. LTE VE LTE-A	71
A.1. LTE'de çıkış yolu	76
A.2. LTE'den LTE-A'ya geçiş	78
A.2.1. Taşıyıcı Birleştirme	80
A.2.2. Koordineli Çok-Noktalı İletim ve Alım (CoMP)	83
A.3. Heterojen Ağlar (HetNets)	84
A.4. Hücreler-arası Girişim Düzenlemesi (ICIC) Yöntemleri	86
A.4.1. ICIC'in X2 sinyalleşmesiyle desteklenmesi	87
A.4.2. LTE-A'da ICIC yöntemleri	88

B. DIŞBÜKEYLERİN FARKI (DC) PROGRAMLAMA	92
B.1. Giriş	92
B.2. DC'liğin Korunduğu Durumlar	93
B.3. Eniyilik Durumları	94
B.3.1. İkilik	94
ÖZGEÇMİŞ	96

ŞEKİLLER

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1. Hem yüksek güçlü (makro-hücre baz istasyonu) hem de düşük güçlü (piko-hücre baz istasyonu vb.) düğümlerin bulunduğu heterojen ağ topolojisi	7
Şekil 2.2. Spektrum kullanımı [33]	8
Şekil 2.3. Geçici bilişsel radyo ağlarının yapısı	10
Şekil 2.4. Spektrum paylaşımcılı bilişsel ağ mimarisi [29]	10
Şekil 2.5. Spektrum boşluklarının resmedilmesi [29]	12
Şekil 2.6. Sistem modeli	18
Şekil 2.7. Katman 1 kullanıcılarında ve Katman 2 baz istasyonunda çoklu anten olduğunda sistem modeli	19
Şekil 3.1. 4 farklı durum için olurlu kümenin geometrik gösterimi. Sol üstteki şekil 1. durum, sağ üstteki şekil 2. durum, sol alttaki şekil 3. durum, sağ alttaki şekil 4. durumu gösterir.	22
Şekil 3.2. Birden fazla Katman 1 kullanıcısı için sistem modeli	25
Şekil 3.3. İki tane Katman 1 kullanıcısı varken, iki tane Katman 2 kullanıcı senaryoda olası bir olurlu kümenin geometrik gösterimi.	26
Şekil 6.1. DC programlamanın, iki tane Katman 2 kullanıcısı için kapsamlı arama ile karşılaştırılması	45
Şekil 6.2. DC programlamanın, üç tane Katman 2 kullanıcısı için kapsamlı arama ile karşılaştırılması	45
Şekil 6.3. Girişim kısıtının, 100 tane Katman 2 kullanıcı senaryoda ve farklı SNR değerlerinde, TDMA olasılığına etkisi	47
Şekil 6.4. Kullanıcı sayısının, girişim kısıtı, Q , 0.1 iken ve farklı SNR değerlerinde, TDMA olasılığına etkisi	47
Şekil 6.5. Kapsamlı arama ve önerilen algoritmanın iki tane Katman 2 kullanıcısı için karşılaştırılması	48
Şekil 6.6. Kapsamlı arama ve önerilen algoritmanın üç tane Katman 2 kullanıcısı için karşılaştırılması	49
Şekil 6.7. 20 kullanıcı sistemde DC programlama ve önerilen algoritmanın karşılaştırılması, $Q = 1$	50

Şekil 6.8. 20 tane Katman 2 kullanıcıli sistemde DC programlama ve önerilen algoritmanın karşılaştırılması, $Q = 0.1$	51
Şekil 6.9. DDP algoritmasının diğer iki algoritmayla karşılaştırılması - $Q = 1$..	52
Şekil 6.10. DDP algoritmasının diğer iki algoritmayla karşılaştırılması - $Q = 0.1$	52
Şekil 6.11. Girişim kısıtı $Q = 0.1$ iken kullanıcı sayısının sistem kapasitesine etkisi	54
Şekil 6.12. Girişim kısıtı $Q = 1$ iken kullanıcı sayısının sistem kapasitesine etkisi	55
Şekil 6.13. Toplam girişim kısıtı $Q = 0.1$ iken -10 dB SNR değeri için kapasitenin kullanıcı sayısı ve girişim kanalı ortalama değerine göre değişimi	56
Şekil 6.14. Toplam girişim kısıtı $Q = 0.1$ iken 0 dB SNR değeri için kapasitenin kullanıcı sayısı ve girişim kanalı ortalama değerine göre değişimi ..	57
Şekil 6.15. Toplam girişim kısıtı $Q = 0.1$ iken 10 dB SNR değeri için kapasitenin kullanıcı sayısı ve girişim kanalı ortalama değerine göre değişimi	58
Şekil 6.16. İki SNR değeri için toplam girişim kısıtının sistem kapasitesine etkisi.	59
Şekil 6.17. Girişim kısıtının 100 kullanıcıli sistem kapasitesi üzerine etkisi.	60
Şekil 6.18. Herhangi bir alıcı ve TDMA alıcısının 20 tane Katman 2 kullanıcılarının olduğu sistemde karşılaştırılması	61
Şekil 6.19. Girişim kısıtının 0.01 ve 1 olduğu durumda, 4 ve 8 antenli TDMA alıcısı varken, 20 tane Katman 2 kullanıcıli sistemin davranışı	62
Şekil A.1. Telsiz ağların tarihsel gelişimini gösteren çizge	72
Şekil A.2. Tarihsel süreçte 3G ve 4G ayrımı	72
Şekil A.3. QPSK kiplemesi için OFDMA ve SC-FDMA karşılaştırımı [57]	73
Şekil A.4. FDD çerçeve yapısı	74
Şekil A.5. TDD çerçeve yapısı	75
Şekil A.6. LTE'de kaynak bloğu	75
Şekil A.7. LTE'de çıkış yolu kaynak bloğu yapısı	77
Şekil A.8. CQI indeksleri çizelgesi [60]	78
Şekil A.9. 4×4 MIMO'da kertesı 2 olan kanal için CSI mekanizması	79
Şekil A.10. Taşıyıcı birleştirme şeması	81

Şekil A.11. Taşıyıcı birleştirme yöntemleri	82
Şekil A.12. Taşıyıcı birleştirme sayesinde hücrenin farklı bölgelerine yapılan yayının resmedilmesi	82
Şekil A.13. Solda senaryo 1, sağda senaryo 2 için hücrelerin geometrik gösterimi. (İçi koyu renkte olan hücreler koordinasyonun olduğu hücre anlamına geliyor. Kırmızı istasyonlar yüksek-güçlü uzak radyo başlıklarıdır.)	83
Şekil A.14. Solda senaryo 3, sağda senaryo 4 için hücrelerin geometrik gösterimi. (İçi koyu renkte olan hücreler koordinasyonun olduğu hücre anlamına geliyor. Sarı istasyonlar düşük-güçlü uzak radyo başlıklarıdır.)	84
Şekil A.15. Tip 1 röleme şekli	85
Şekil A.16. Tip 2 röleme şekli	85
Şekil A.17. Üç hücreli senaryo için ICIC yöntemleri	87
Şekil A.18. LTE-A'da olası girişim senaryoları	89
Şekil A.19. Taşıyıcı birleştirme yöntemiyle ICIC'in makro-hücre ve piko-hücre arasında sağlanması	89
Şekil A.20. ABSF ile femto-hücre ve makro-hücre arasında ve piko-hücre ve makro-hücre arasındaki ICIC'in sağlanması	90
Şekil B.1. Soldaki $f_1(x) = 1/x$, ortadaki $f_2(x) = x^2$ ve $f(x) = x^{-1} - x^2$	93
Şekil B.2. Soldaki $f_1(x) = \text{abs}(x)$, ortadaki $f_2(x) = -\log(x)$ ve $f(x) = \text{abs}(x) + \log(x)$	93

ÇİZELGELER

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 5.1. Algoritma 1 - DC algoritması?	42
Çizelge 5.2. Algoritma 2 - Önerilen algoritma	43
Çizelge 5.3. Algoritma 3 - DDP algoritması	43
Çizelge A.1. LTE gereksinimleri çizelgesi	74
Çizelge A.2. LTE-A'nin getirdiği yenilikler	80
Çizelge A.3. HetNet'lerde bulunan elemanların özellikleri	86

SİMGELER VE KISALTMALAR

3GPP	3rd Generation Partnership Project
ABSF	Almost Blank Subframe (Neredeyse Boş Alt-çerçeve)
BTK	Bilgi Teknolojileri ve İletişim Kurumu
CDMA	Code Division Multiple Access (Kod Bölümlü Çoklu Erişim)
CoMP	Coordinated Multi-Point transmission and reception (Koordineli Çok noktalı İletim ve Alım)
CQI	Channel Quality Indicator (Kanal Kalite Göstermeci)
CSI	Channel State Information (Kanal Durum Bilgisi)
DC	Difference of Convex functions (Dışbükeylerin Farkı işlevi)
DCA	Dışbükeylerin Farkı Algoritması
DDP	Değiştirilmiş Doğrusal-olmayan Programlama
DMRS	Demodulation Reference Signal (Kipçözücü Referans Sinyali)
DSA	Dynamic Spectrum Access (Dinamik Spektrum Erişimi)
EDGE	Enhanced Data Rates for GSM Evolution
FCC	Federal Communications Commission
FDD	Frequency Division Duplexing (Frekans Bölümlü İkileme)
FDMA	Frequency Division Multiple Access (Frekans Bölümlü Çoklu Erişim)
FFR	Fractional Frequency Reuse (Ondalık Frekansın Tekrar Kullanımı)
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile Communications
HetNets	Heterogenous Networks (Heterojen Ağlar)
HFR	Hard Frequency Reuse (Belli Frekansın Tekrar Kullanımı)
HII	High Interference Indicator (Yüksek Girişim Göstermeci)
HSDPA	High Speed Downlink Packet Access (Yüksek Hızlı İniş Yolu Paket Erişimi)
HSUPA	High Speed Uplink Packet Access (Yüksek Hızlı Çıkış Yolu Paket Erişimi)
ICIC	Intercell Interference Coordination (Hücrelerarası Girişim Düzenlemesi)
IOI	Interference Overload Indicator (Yüksek-doz Girişim Göstermeci)

LTE	Long Term Evolution
MIMO	Multiple Input Multiple Output (Çok Giriş Çok Çıkış)
MMSE	Minimum Mean Square Error (Ortalama Karesel Hatanın Enküçüğü)
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access (Dikgen Frekans Bölümlü Çoklu Erişim)
OSA	Opportunistic Spectrum Access (Fırsatçı Spektrum Erişimi)
PMI	Precoding Matrix Indicator (Önkodlama Matris Göstermeci)
PRACH	Physical Random Access Channel (Fiziksel Rastgele Erişim Kanalı)
PUCCH	Physical Uplink Control Channel (Fiziksel Çıkış yolu Kontrol Kanalı)
PUSCH	Physical Uplink Shared Channel (Fiziksel Çıkış yolu Paylaşım Kanalı)
QoS	Quality-of-Service (Servis Kalitesi)
RI	Rank Indicator (Kerte Göstergesi)
RNTP	Relative Narrowband Transmit Power Indicator (İzafi Darbant İletim Gücü Göstergesi)
SC-FDMA	Single Carrier-Frequency Division Multiple Access (Tek Taşıyıcılı-Frekans Bölümlü Çoklu Erişim)
SFR	Soft Frequency Reuse (Belirsiz Frekansın Tekrar Kullanımı)
SIC	Successive Interference Cancellation (Sıralı Girişim Giderimi)
SIMO	Single Input Multiple Output (Tek Giriş Çok Çıkış)
SIR	Signal-to-Interference-Ratio (Sinyal Girişim Oranı)
SISO	Single Input Single Output (Tek Giriş Tek Çıkış)
SNR	Signal-to-Noise-Ratio (Sinyal Gürültü Oranı)
SRS	Sounding Reference Signal (Sonda Referans Sinyali)
TDD	Time Division Duplexing (Zaman Bölümlü İkileme)
TDMA	Time Division Multiple Access (Zaman Bölümlü Çoklu Erişim)
TTI	Transmission Time Interval (İletim Zaman Aralığı)

SÖZLÜK DİZİNİ

Algılama	: Sensing
Alt-çerçeve	: Sub-frame
Alt-kanal	: Sub-channel
Alt-taşıyıcı	: Sub-carrier
Bileşken taşıyıcı	: Component carrier
Bilişsel radyo	: Cognitive radio
Çıkış yolu	: Uplink
Çok kullanıcı çeşitliliği	: Multi-user diversity
Çokyol	: Multipath
Dağıtılmış anten	: Distributed antenna
Dışbükey	: Convex
Dışbükey-imsi	: Quasi-convex
Dışbükey-olmayan	: Non-convex
Dikgen	: Orthogonal
Döngülü Önek	: Cyclic prefix
Enbüyük	: Maximum
Enbüyük oran birleştirme	: Maximum ratio combining
Enbüyültme	: Maximize
Eniyi	: Optimum
Eniyiye yakın	: Sub-optimum
Enküçük	: Minimum
Enküçültme	: Minimize
Evreuyumlu	: Coherent
Frekans atlamalı	: Frequency hop
Gölgeleme	: Shadowing
Hücre-kenar kullanıcısı	: Cell-edge user
Hüzmeleme	: Beamforming
İkil	: Dual
İkili	: Binary
İniş yolu	: Downlink
İşlev	: Function

Kaynak bloğu	: Resource block
Kerte	: Rank
Kesikli	: Discrete
Kestirim	: Estimation
Kısıt	: Constraint
Kipçözücü	: Demodulator
Kipleme	: Modulation
Maliyet	: Cost
Nicemlenmiş	: Quantized
Olurlu	: Feasible
Ödünleşim	: Tradeoff
Özdeđer	: Eigenvalue
Özvektör	: Eigenvector
Sezim	: Detection
Tekdüze	: Uniform
Tekil	: Single
Tutarlılık bant genişliği	: Coherence bandwidth
Uyarlamalı	: Adaptive
Uyumlu filtreleme	: Matched filtering
Uzamsal çeşitlilik	: Spatial diversity
Yayılı spektrum	: Spread spectrum
Yinelemeli	: Iterative
Yıldızkümesi	: Constellation

1. GİRİŞ

Günümüzde kablosuz gezgin iletişim, düzgün geometriye sahip hücresel bir topolojiden daha karmaşık ve homojen olmayan bir ağ mimarisine geçmektedir. Bu topoloji genellikle heterojen ağlar olarak tanımlanmaktadır. Gelecek nesil iletişim sistemlerinin de bundan böyle heterojen bir mimariye sahip olması, farklı hücre boyutlarında ve altıgen olmayan bir şekilde hücrelerin dağıtılması beklenmektedir. Heterojen ağlara bu denli ihtiyaç duyulmasının nedeni ise, giderek artan veri hızı talebidir. Günümüzdeki kablosuz uygulamaların çoğu yüksek veri hızı gereksinimi olan uygulamalardır ve aynı zamanda da yüksek bantgenişiği kullanmaktadır. Her ne kadar uygulama kullanımı artsa da, frekans spektrumu incelendiğinde büyük boşluklar görülmektedir. Spektrum verimliliğini arttırmak için ise spektrumun lisanslı ve lisanssız kullanıcılar arasında hiyerarşik veya paylaşılarak kullanıldığı bilişsel radyo mimarisi fikri ortaya çıkmıştır.

Heterojen ağlar ve bilişsel radyo ağları çok katmanlı ağlara birer örnektir. Heterojen ağlar için makro-hücre içerisinde bulunan piko veya femto-hücreler birer katman oluştururken, makro-hücresinin kendisi de bir katman oluşturmaktadır. Bunun yanında bilişsel radyo ağlarında lisanslı ve lisanssız kullanıcılar da birer katman oluşturmaktadırlar. Çok katmanlı bu ağların ve kablosuz gezgin iletişimin karşılaştığı temel problemlerden birisi girişimdir. Kablosuz iletişimin doğası gereği, bir kullanıcı yayın yaparken diğer kullanıcılara girişim yaparak düşük Sinyal-Girişim-Oranına (Signal-to-Interference-Ratio, SIR) neden olur ve o kullanıcıların servis kalitesini (Quality-of-Service, QoS) düşürür. Gelecek nesil iletişim sistemlerinde değişken ağ topolojisi sebebiyle bu sorunun devam edeceği aşıkardır. Bu yüzden eski nesil iletişim sistemlerinde kullanılan güç kontrolü politikalarının günümüz ve gelecek nesil iletişim sistemlerinde uygulanabilirliği azdır ve yeni güç kontrolü politikaları geliştirilmelidir.

Tarihsel olarak güç kontrolü problemlerinin üzerinde 1970'lerden bu yana çalışıldığını görürüz [1]. 90'lı yıllarda Kod Bölümlü Çoklu Erişim (Code Division Multiple Access, CDMA) sistemlerinin ortaya çıkması ile geniş bantlı haberleşme sistemlerinde güç kontrolü politikaları çalışılmıştır [2], [3]. CDMA tabanlı bir sistemde güç kontrolü yapmak, girişimi azaltmak için en temel mekanizmadır. Bu sistemlerde, bütün kullanıcılar hem zaman uzayında hem de frekans uzayında aynı anda bulduklarından sürekli birbirlerine girişim yapma durumundadırlar. Daha önceki nesil haberleşme

sistemlerinde CDMA tabanlı ya da geniş-bantlı modeller için geliştirilen güç kontrolü mekanizmaları dar-bantlı sistemler için de geçerlidir [4], [5], [6]. Hedef SNR'ın belli olduğu bu çalışmalarda en küçük iletim güçleri ile yayın yapmak amaçlanmıştır. [6] no.'lu kaynakta, SIR eşitleme problemi ele alınmıştır ve tüm kanallar tarafından ulaşılabilen en büyük SIR değeri, normalize edilmiş kanal matrisinin özdeğerinin bir işlevi olarak tanımlanmıştır. Eniyi güç kontrolü politikası ise bu özdeğerin özvektörü olarak belirtilmiştir. Daha sonra yapılan çalışmalarda sistemin yapısı (geniş-bant, dar-bant) ve alıcı çeşitleri için bu problem incelenmeye devam edilmiş ve [5] no.'lu kaynakta bu problemin geliştirilmiş çözümü verilmiştir. Bu güç kontrolü politikaları 2G ağları için literatürde detaylıca araştırılmış ve anlaşılmıştır [7]. Daha sonra bu güç kontrolü stratejisi ilgisini kaybetmiş ve yerini sistemin toplam kapasitesini arttırmaya yönelik yeni nesil güç kontrolü politikalarına bırakmıştır.

Literatürde 90'lı yılların ortalarından itibaren çalışılmaya başlanan bu problem, tek kullanıcı [8] ve çok kullanıcı sistemlere uyarlanmıştır [9], [10]. Çok kullanıcı sistemler için alıcı yapılarının, örneğin Ortalama Karese Hatanın Enküçüğü (Minimum Mean Square Error, MMSE) alıcısının girişimi tümüyle yok ettiği varsayılmıştır. Bu durumdaki eniyileme problemi dışbükey bir problemdir ve ergodik toplam veri hızı düşünüldüğünde

$$\begin{aligned} \text{enbüyült } R(\mathbf{P}) &= E \left[\log \left(1 + \frac{\sum_{i=1}^N h_i P_i}{\sigma^2} \right) \right] \\ \text{kısıtlar } E[\mathbf{P}] &\leq P_{ortalama} \end{aligned} \quad (1.1)$$

şeklinde formüle edilebilir. Girişimin yok edildiği varsayılan sistemlerde, bu problemin çözümü dışbükey programlama teknikleri ile yapılabilir [11]. Kısaca ortaya çıkan çözüm basit bir su doldurma problemidir. Girişimin olmadığı varsayılan bu problemler, dışbükey olmalarından dolayı detaylıca araştırılmış ve anlaşılmıştır. Fakat, girişimin olmadığını varsaymak gerçekçi bir yaklaşım değildir. Bunun yerine girişimin tümüyle olduğu ya da kısmen yok edilebildiği durumlardaki problemler araştırılmaktadır. Bu problemlerdeki maliyet işlevi dışbükey-olmayan bir işlevdir ve bu yüzden bu problemlerin hala birçoğu için eniyi sonuç bulunamamıştır.

2000'li yılların ortalarından itibaren dışbükey-olmayan problemlere ilgi artmıştır. Tek hücreli/katmanlı sistemlerde toplam veri hızını arttıran güç kontrolü problemini geometrik programlama kullanarak çözen çalışmaları literatürde görmek mümkündür

[12], [13], [14]. İki kullanıcılı sistem için analitik çözüm [14] no.'lu kaynakta verilmiştir ve çözümün ikili olduğu belirtilmiştir. Yani kullanıcılar ya tam güçle çalışırlar ya da tamamen kapalıdırlar. Ancak kullanıcı sayısının artması ile problemin karmaşıklığı artmaktadır ve çözüm geometrik ortalama-aritmetik ortalama yaklaşımı yapılarak geometrik programlama ile bulunmuştur. Bu durumdaki çözümün eniyi-altı ancak eniyiye çok yakın bir değerde olduğu gösterilmiştir. Birbirine girişimde bulunan simetrik kanal yapıları [15] no.'lu kaynakta incelenmiştir. Bu çalışmada direkt kanal katsayıları belli bir değer alırken, girişim yapan kanal katsayıları ise bundan farklı ama yine tek bir değer almaktadır. Bu çalışmada ise tüm SNR değerleri için kanal katsayılarından bağımsız olarak eniyi durumun ikili çıkacağı gösterilmiştir.

Bu çalışmalara ek olarak, yine tek hücreli sistemlerde [16] no.'lu kaynak çıkış yolu senaryosu için eniyi güç kontrolü politikasının ne olacağını bulmaya çalışmış ve maliyet işlevinin, $R(\mathbf{P}) = \sum_{i=1}^N \log \left(1 + \frac{h_i P_i}{\sigma^2 + \sum_{j \neq i}^N h_j P_j} \right)$, güç değerlerinin Schur-dışbükey işlevi olduğunu göstererek eniyi güç kontrolü politikasının ikili olduğunu ispatlamıştır. Ayrıca eniyi güç dağılımını veren basit bir algoritma da önerilmiştir. Bunlara ek olarak, olasılıksal baskın haberleşme kiplerinin ya *hepsi-açık* ya da *sadece-biri-açık* kiplerine denk geldiği gösterilmiştir ve bunlar da günümüz haberleşmesinde sıkça kullanılan TDMA ve CDMA durumlarına denk gelmektedir.

Tek hücreli ağlarda, çoklu antenli mimaride de çalışmalar mevcuttur [17], [18], [19], [20]. Kanal durum bilgisinin tam ve eksik olduğu durumlarda ergodik kapasitenin Schur-içbükey olduğu [17] no.'lu kaynakta gösterilmiştir. Yine girişimin yok edilebildiği yaklaşımı yapılarak kurulan başka bir modelde ise eniyi güç tahsisinin yinelemeli bir su doldurma problemi olarak bulunmuştur [18]. Rôle düğümlerinin bulunduğu ve tüm verici-alıcılarda çoklu antenin olduğu başka bir mimari de [20] no.'lu kaynakta verilmiştir. Bunların yanında çıkış yolu yerine iniş yolunda çoklu hücre yapısında ve her hücrede bir kullanıcı olan problemin çözümü [19] no.'lu kaynakta verilmiştir. Bu çalışmada, girişim diğer çalışmalardan farklı olarak yok sayılmamıştır, ancak Lagrange yöntemi kullanılarak çözüm bulunmaya çalışılmıştır. Anten başına güç kısıtıyla yapılan bu çözümde yine *açık-kapalı* durumunun ortaya çıkması hayli ilgi çekicidir. Ancak bu çözüm eniyi çözüm olarak verilmemiştir. Bunun yerine bu çözümden türetilen pratik olarak uygulaması kolay bir algoritmaya yer verilmiştir.

Tek hücreli problem yapıları haricinde, bilişsel radyo ve heterojen ağları kapsaya-

bilecek çok katmanlı ağ modelleri de ortaya atılmıştır [21], [22], [23]. Bilişsel radyo ağları için birincil ve ikincil kullanıcı sayısının bir olduğu sistemde ikincil kullanıcının veri hızını enbüyülden güç kontrolü politikası [22] no.'lu kaynakta çalışılmıştır. Ancak burada kullanıcı başına iletim gücü kısıtı konulmadığı için eniyilik durumu söz konusu değildir. Çoklu anten ve iki katmanlı yapılar için ise [21] no.'lu çalışmaya bakılabilir. Bu çalışmada çok sayıda ikincil kullanıcı vardır. Ancak güç kontrolü yaparken güçler nicemlenmiş olarak verilir. Dolayısıyla eniyi çözümden bahsetmek mümkün değildir. Bu problemin tekli anten ve güçlerin kesikli olmayan versiyonu [23] no.'lu kaynakta çalışılmıştır. Ancak bu problemde sıralı girişim giderimi (Successive Interference Cancellation, SIC) kullanılarak girişimin tümüyle yok edildiği kabul edilmiştir. Sonrasında ise problem doğrusal programlamaya dönerek Lagrange denklemi yazılarak eniyi güç kontrolü politikası girişim kısıtları altında bulunur. Buna göre, direkt kanalı ve girişim kanalı oranı büyük olan kullanıcılar seçilerek tam güçle çalıştırılırlar ancak en fazla bir kullanıcı kesirli güçle ($0 \leq P_k \leq P_{azami}$) çalışır. Bunun dışındaki tüm kullanıcılar kapalıdır.

Dışbükey-olmayan problemler genel olarak çözülmesi zor problemlerdir ve genel eniyi noktasının bulunması için maliyet işlevinde bazı yaklaşımların yapılması gerekmektedir. Bu tarz problemleri çözmek için süper-sınıf dışbükey işlevler olan "dışbükeylerin farkı" işlevlerinin eniyileme kuramı geliştirilmiştir [24]. DC programlama örneği olarak, [25] ve [26] no.'lu kaynaklardaki çalışmalar veri hızını enbüyültme hedefleri açısından dikkat çekmektedir. Bu iki çalışmada da DC programlamanın farklı senaryolar için eniyi güç kontrolü bulmada iyi bir alt sınır olabileceği söylenmiş ve düşük sayıda kullanıcı için hızlı ve verimli bir araç olduğundan bahsedilmiştir. DC algoritması (DCA), özellikle kaynak tahsisi ve güç kontrolü problemlerinde sıkça kullanılmaktadır. Toplam veri hızı enbüyültmesi, enbüyük-enküçük problemlerinde ve benzeri senaryolarda DCA'nın kullanıldığını literatürde görmek mümkündür [25], [26].

Bu tezde, iki katmanlı ağlarda bireysel güç kısıtları ve toplam girişim kısıtı altında, toplam veri hızını enbüyülden eniyi çıkış yolu güç kontrolü üzerine çalışılmıştır. Literatürde bulunan iki katmanlı ağlarla ilgili çalışmalarda alıcıda girişim giderim tekniği kullanıldığı varsayılmış olup çoklu anten modeliyle ilgili çalışmalar neredeyse yoktur. Literatürden farklı olarak, alıcıda (baz istasyonu) herhangi bir girişim giderim tekniği kullanılmamıştır. Ayrıca baz istasyonunda çoklu antenin bulunması durumun-

daki SIMO problemi için de çözümler bulunmuştur.

Tezin ikinci bölümünde, çok katmanlı ağların günümüz uyarlaması olan heterojen ağlar ve bilişsel radyo ağları ile ilgili bilgiler verilmiştir. Bu iki ağ yapısı da tezde çözümlü yapılan problemin fiziksel yapısının anlaşılması adına önemlidir. Daha sonra çözümlenmek istenen iki problem ayrıntılı şekilde anlatılmış ve okuyucuya sunulmuştur.

Tezin üçüncü bölümünde, alıcı ve vericilerde tekil anten olması durumundaki problem için iki tane Katman 2 kullanıcısı olduğunda problemin geometrik yapısından faydalanarak analitik çözüm verilmiştir. Daha sonra çok sayıda Katman 2 kullanıcısı olduğu durum için hangi koşulda TDMA durumunun eniyi olduğu ve bu durumdaki eniyi güç kontrolünün ne olduğu verilmiştir. Bunun yanında yine çok sayıda Katman 2 kullanıcısı varken düşük-SNR yaklaşımı yapılarak eniyi güç kontrolünün nasıl olması gerektiği verilmiştir.

Tezin dördüncü bölümünde, alıcıda çoklu anten ve vericide tekil anten olması durumunda tek katmanlı ağlar için rastgele seçilmiş alıcı için eniyi güç kontrolü mekanizması verilmiş ardından bu durumdaki eniyi alıcı bulunmuştur. Daha sonra problem iki katmanlı ağlara genişletilip bu senaryoda da eniyi alıcı ve eniyi güç kontrolü politikası bulunmuştur.

Tezin beşinci bölümünde, literatürde çalışılmış olan DC algoritması verilmiş ve bu algoritmanın yine literatürde bahsedildiği gibi teorik olarak eniyi altı sonucu verdiği gösterilmiştir. Sonrasında, çalışılan problemler için eniyi sonucu vermeyen ancak eniyeye yakın sonuç veren karmaşıklığı düşük bir algoritma önerilmiştir.

Tezin altıncı bölümünde, DC programlamanın ve önerilen algoritmanın karşılaştırması yapılmıştır. Daha sonra önerilen algoritma ile hem tek giriş tek çıkış (single input single output, SISO) hem de SIMO sistemleri için benzetim çalışmaları yapılmıştır.

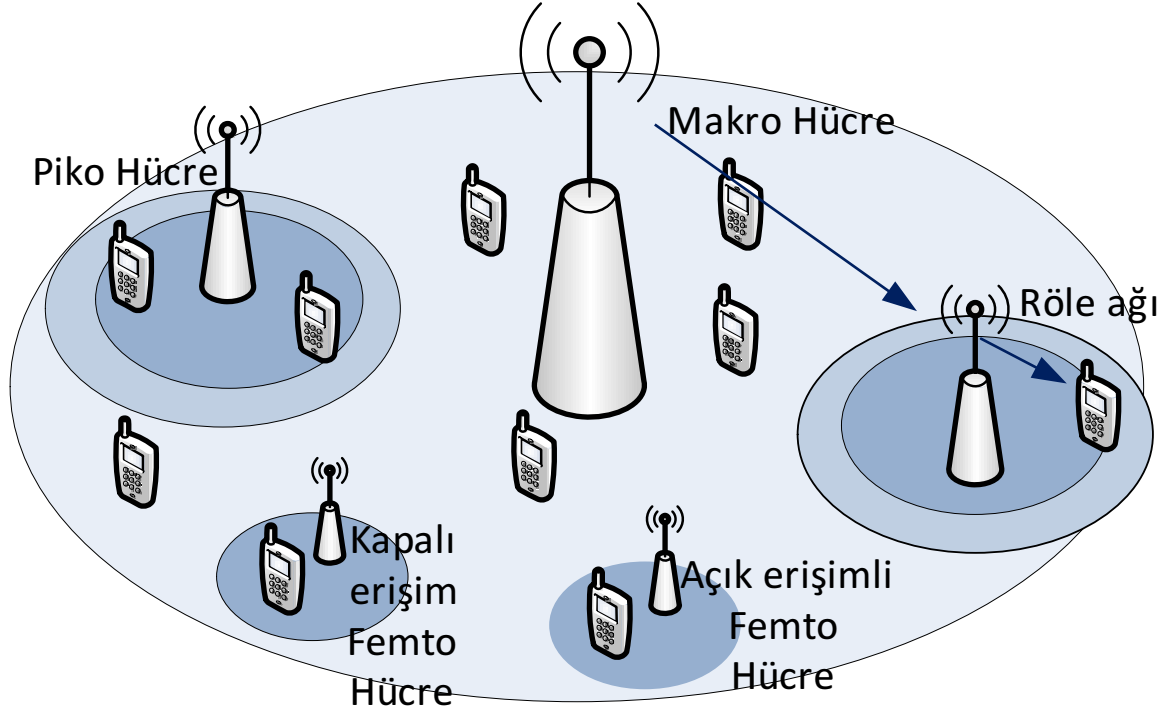
Tezin yedinci bölümünde, tezin genel özeti ve katkıları verilmiştir. Bunu takiben gelecekte yapılabilecek çalışmalar konusunda okuyucu aydınlatılmıştır. Ayrıca tezin sonunda, heterojen ağlarla ve LTE ile ilgili detaylı bir çalışma ve DC programlama ile ilgili teorik bilgiler iki ek halinde verilmiştir.

2. ÇOK KATMANLI AĞLAR VE SİSTEM MODELİ

2.1 Heterojen Ağlar

Veri hızlarının doygunluğa ulaştığı günümüz sistemlerinde düğüm yoğunluğunu arttırmak spektral verimliliği sağlamak adına önemli bir araçtır. Eskiye nazaran daha seyrek makro-hücre konuşlandırılması küçük hücre sayısını arttırmak ve düşük güçlerle yayın yapılması hücre içindeki kapsama alanını arttıracak gibi veri hızını da artırılabilir. Fakat, günümüzdeki düzgün altıgen baz istasyonu konuşlanması göz önüne alındığında, hücreler arası girişimin etkisi, yayılmış hücrelerin kazancını ciddi şekilde azaltmaktadır. Dahası, yoğun şehirleşmiş bölgelerde baz istasyonu konuşlandırma maliyetleri çok yüksek olabilir. Daha küçük güçlerde iletim yapan, kapsama alanı daha az olan hücreleri makro-hücrenin içine yerleştirerek, geleneksel makro-hücre baz istasyonu konuşlandırma maliyetini ortadan kaldırabiliriz. Burada bahsedilen düşük güçlü düğümler piko-hücre, femto-hücre baz istasyonları ve röle ağlarıdır. Düşük güçlü düğümler açık hava haberleşmesi için kullanılacak ise, iletim güçleri 250 mW ile yaklaşık 2 W arasında değişmektedir. Geleneksel baz istasyonları, tipik olarak 5 W ve 40 W arasında güçlerle iletim yaparlar. Bu güçlerden dolayı baz istasyonunun güç yükselteçlerinde soğutma ünitesi vardır. Bu da ek olarak maliyet getirmektedir. Kapalı mekan haberleşmesi için kullanılan femto-hücre baz istasyonlarının yayın gücü 100 mW'dan bile azdır [27]. Bu baz istasyonları, piko-hücre baz istasyonları gibi açık erişimli olabildikleri gibi kapalı erişimli de olabilirler. Belli bir kullanıcı zümresine hizmet veren bu femto baz istasyonlarına *kapalı femto* denir. Röle ağları da makro-hücre ile tamamıyla koordineli çalışabildikleri gibi bağımsız da çalışabilirler. Tüm bu yüksek ve düşük güçlü düğümlerin birbiri ile koordineli veya koordinesiz çalıştığı ağlara heterojen ağlar denir. Şekil 2.1'de bunun bir örneği resmedilmiştir.

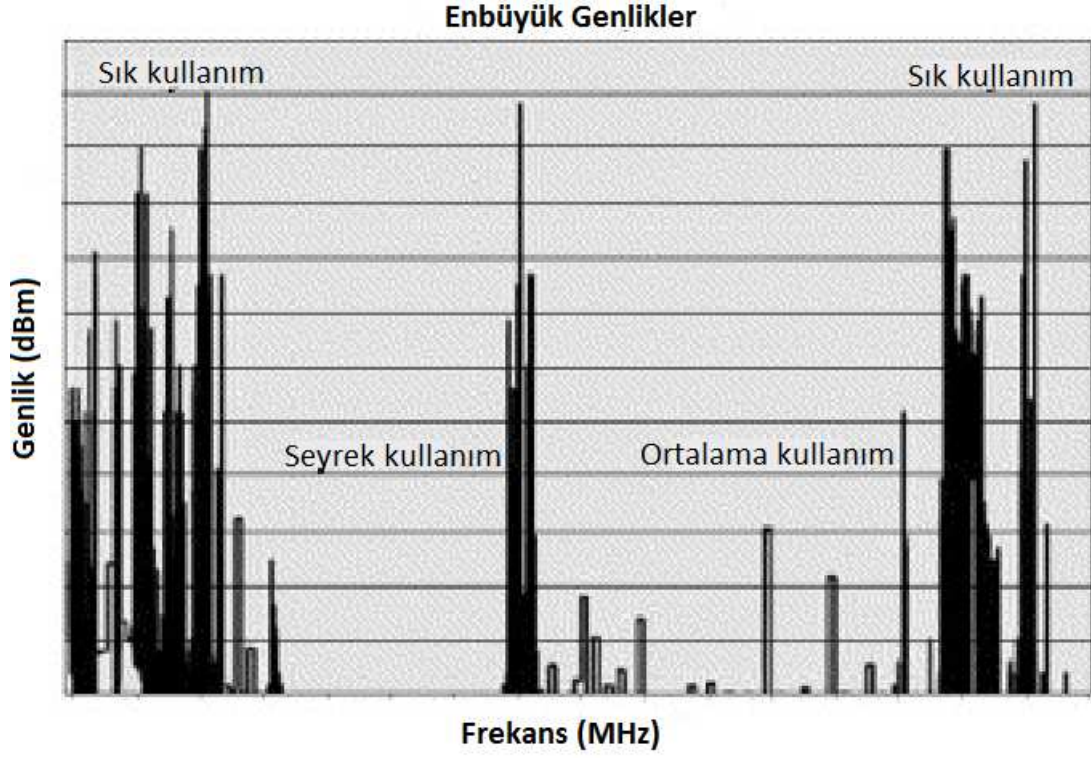
Heterojen konuşlandırma LTE-A'da önemli bir yer almaktadır. Bu şekilde, hücre kapsama alanının ve veri hızlarının artırılması hedeflenmektedir. Özellikle son yıllarda yapılan çalışmalara göre veri trafiğinin büyük çoğunluğu kapalı ortamlarda yapılmaktadır ve bu da evlerde yapılan iletişim kalitesinin artırılması ve daha çok femto-hücre konuşlandırılması anlamına gelmektedir [28]. Dolayısıyla femto-hücrelerin, LTE'de hem maliyet düşürücü hem de kapasite artırıcı bir rol oynaması beklenmektedir. LTE ile ilgili bilgiler ve heterojen ağlar detaylıca Ek A'da verilmiştir. Daha fazla bilgi için lütfen Ek A'ya bakınız.



Şekil 2.1. Hem yüksek güçlü (makro-hücre baz istasyonu) hem de düşük güçlü (piko-hücre baz istasyonu vb.) düğümlerin bulunduğu heterojen ağ topolojisi

2.2 Bilişsel Radyo Ağları

Federal Haberleşme Komisyonu (Federal Communications Commission, FCC), Bilgi Teknolojileri ve İletişim Kurumu (BTK) ve benzeri kurumlar radyo spektrum kaynaklarının kullanılması ve radyo yayılımının düzenlenmesi gibi konuları ülkesel bazda ele alan kurumlardır. Bu kurumlar, spektrumu lisanslı olarak servis sağlayıcılarına verir. Bu kullanıcılara birincil kullanıcı denir ve bu lisans, ülke çapında uzun zamanlı olarak verilir. Ancak, spektrumun büyük kısmı kullanıcılar tarafından kullanılmaz. Örneğin FCC'nin yaptığı bir çalışma Şekil 2.2'de verilmiştir. Buradan açıkça görülmektedir ki dağıtılan spektrum verimli kullanılmamaktadır. Hatta kullanılan spektrumun tüm spektruma oranına bakıldığında %6'lık bir spektrum kullanımı olduğu görülmektedir [29]. Lisans sahibi kullanıcıların verimsiz spektrum kullanımı, yeni spektruma erişim yolları aranmasına yol açmıştır. Bu noktada, dinamik spektrum erişim teknikleri gelişmiş ve spektrum kullanım lisansı olmayan kullanıcıların da gecici olarak spektrumu kullanması fikri ortaya atılmıştır. Lisanssız kullanıcılara da ikincil kullanıcılar denilmiştir. Son yıllarda, henüz Türkiye'de olmasa da, FCC, spektrumun uygun yerlerinin ortak kullanılmasını ve buradan da bilişsel radyo teknolojisi konusunu tartışmaktadır



Şekil 2.2. Spektrum kullanımı [33]

[30], [31].

Bilişsel radyo, gelecek nesil iletişim sistemlerinin anahtar teknolojisidir. Dinamik Spektrum Erişimi (Dynamic Spectrum Access, DSA) sayesinde, birincil kullanıcıya girişim yaratmaksızın spektrumun daha verimli kullanılmasını sağlamaktadır. Bu teknolojiye, verici çalıştığı çevreden gelen bilgileri kullanarak kendi parametrelerini değiştirebilir [32]. Dolayısıyla, bilişsel radyo ağları, alışlagelmiş radyo ağlarından, kullanıcıları sistemin değişkenlerine göre tekrar organize edebilmesi yönünde ayırım göstermektedir [33], [34]. Bilişsel radyo ekipmanlarının kanal kestirimi ve çevreden bilgi toplama yeteneği vardır. Bu bilgi de ikincil kullanıcıların hangi frekans bandında iletim yapacakları, ne kadar güç ile yayın yapacakları, kipleme bilgisi ve bant genişliği bilgisini edinmelerini sağlar. Böylece ikincil kullanıcılar kendilerine en uygun spektrum bandını seçebilirler. Ayrıca, en iyi performansa ulaşmak için kanal koşullarını hızlıca sezerek, kendini o koşullara adapte edebilir. Bilişsel radyo teknolojisi ikincil kullanıcıların spektrumun uygun bölgelerini sezmesi, en iyi kanalı seçmesi, diğer kullanıcıların kanala erişimleri ile koordineli biçimde hareket etmesi ve birincil kullanıcıların spektrumu kullanım hakkını engellemeden yayın yapmasını sağlar.

Spektrum kaynaklarının daha rahat ve ortak kullanılıyor olması düşünülünce, özellikle ikincil kullanıcıların birincil kullanıcılarla aynı spektrumu paylaştığında, geleneksel spektrum tahsis yöntemleri [35] ve protokolleri işlemez hale gelebilir. Dolayısıyla, ortaya çıkan problemlerin üstesinden gelebilmek için yeni spektrum yönetim yaklaşımlarına ihtiyaç vardır. Bu konudaki araştırmalar da genel olarak ikiye ayrılabilir. Bunlardan birincisi spektrum algılama, diğeri ise dinamik spektrum paylaşımıdır.

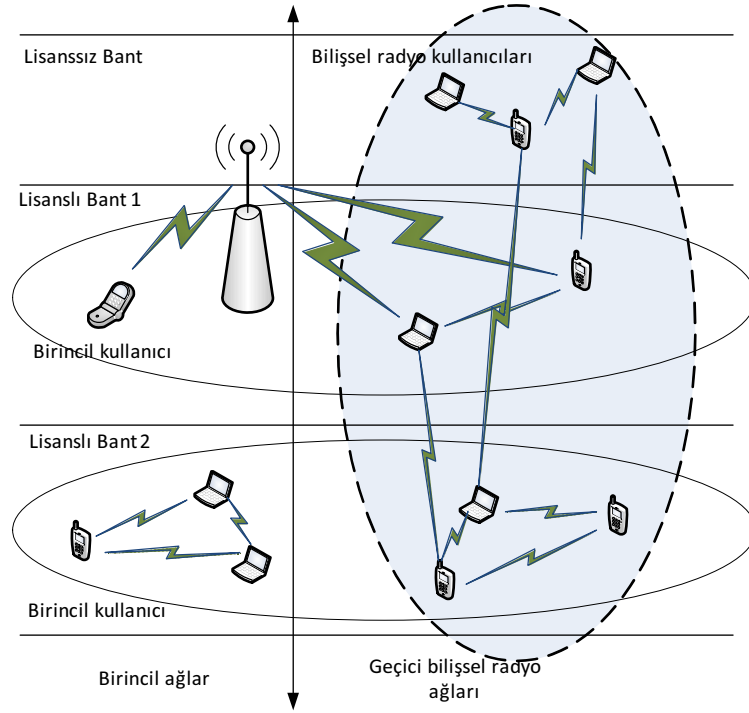
İkincil kullanıcıların birincil kullanıcılarla aynı anda spektrumda olması durumunda, spektrum kullanım önceliği birincil kullanıcılarda olduğundan, ikincil kullanıcılar gerçek zamanlı spektrum görüntüleme yapmak durumundalardır. Bunun yanında birincil ve ikincil kullanıcıların spektrumu paylaşması söz konusu olduğunda, ikincil kullanıcılar girişim limitlerini kesinlikle aşmamalıdır [36]. Eğer, ikincil kullanıcılar sadece birincil kullanıcıların olmadığı bantları kullanabiliyorlarsa, çeşitli tekniklerle birincil kullanıcıların varlığını hissetmelilerdir. Bu teknikler arasında, enerji sezimi, öznitelik sezimi, uyumlu filtreleme ve evreyumlu sezim sayılabilir. Gürültünün belirsizliği, gölgeleme ve çokyol etkisinden dolayı, tek kullanıcının sezim performansı oldukça sınırlıdır. Bunun yerine uzamsal çeşitlilik ve çok-kullanıcı çeşitliliğinin avantajını kullanarak yapılacak kooperatif sezim çok daha etkili olacaktır. Kooperatif sezimde, sezim için seçilecek uygun kullanıcılar, kullanıcılardan gelen bilgilerin nasıl toplanacağı, birleştirileceği veya takas edileceği ve yayılmış spektrum seziminin nasıl yapılacağı konuları hala araştırmaya açık konulardır.

Spektrum kaynaklarını etkin kullanmak için, verimli dinamik spektrum tahsisi ve paylaşma yöntemleri çok önemlidir. Birincil kullanıcı ve ikincil kullanıcının verilerinin çakışmaması için yeni spektrum erişim protokollerine ihtiyaç vardır.

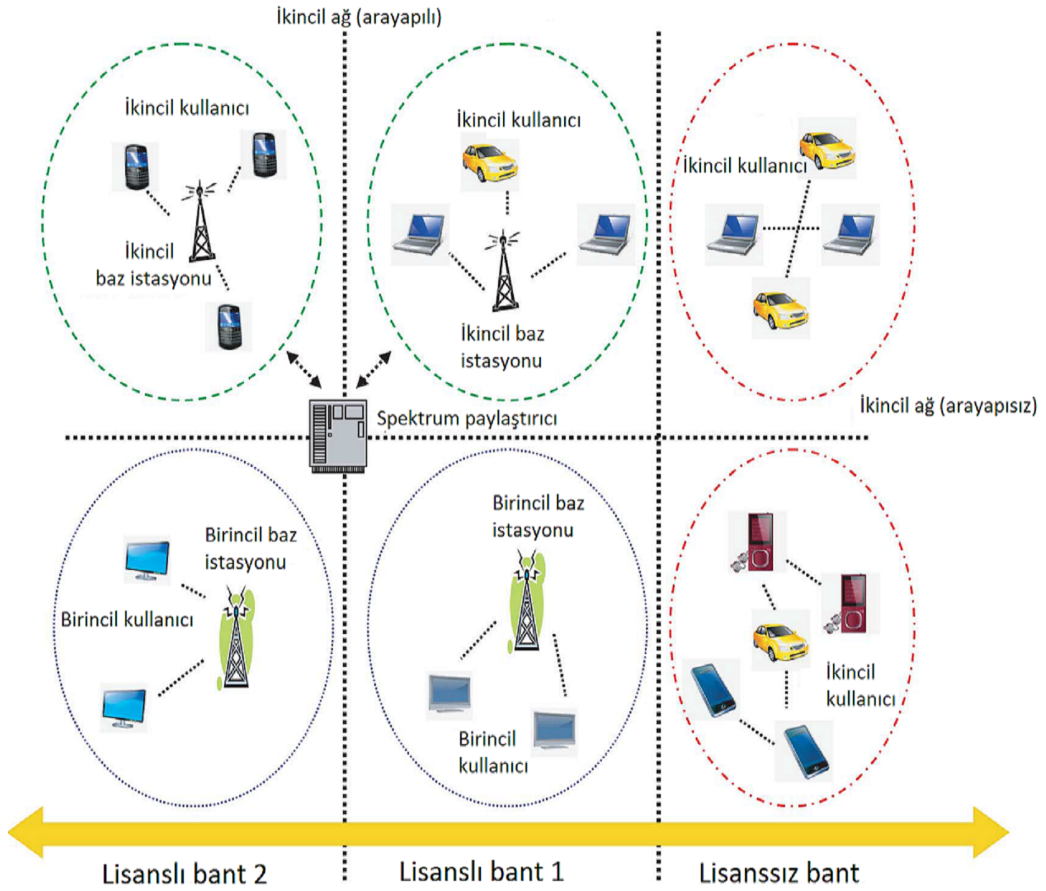
2.2.1 Bilişsel Radyo Ağ Yapısı ve İşlevleri

Bilişsel radyo ağlarında lisanslı ve lisanssız kullanıcılar aynı spektrumu kullanırlar. Şekil 2.3'te geçici (ad hoc) ikincil ağlar gözükmemektedir. Ancak ikincil ağlar sadece geçici ağlardan oluşmaz. Birbiri arasında arayapı bulunan ikincil baz istasyonları ve buna bağlı olan ikincil kullanıcılar yer alabilir. Şekil 2.4'te görülen spektrum paylaşıcı sayesinde ikincil baz istasyonları hangi bantları eniyi şekilde kullanabileceğini bilir ve tüm ağ bu merkezden yönetilir.

Bilişsel radyo ağlarının bir görev döngüsü vardır. Bu döngü, spektrumun boş alan-



Şekil 2.3. Geçici bilişsel radyo ağlarının yapısı



Şekil 2.4. Spektrum paylaştırıcılı bilişsel ağ mimarisi [29]

larını sezme, en iyi frekans bandını seçme, diğer kullanıcıların spektruma erişimini koordine etme ve birincil kullanıcı varsa o frekans bandını boşaltma şeklindedir. Bu görev döngüsü aşağıdaki işlevlerle desteklenir:

- spektrum algılama ve analizi,
- spektrum yönetimi ve bant değiştirme (handoff),
- spektrum tahsisi ve paylaşımı.

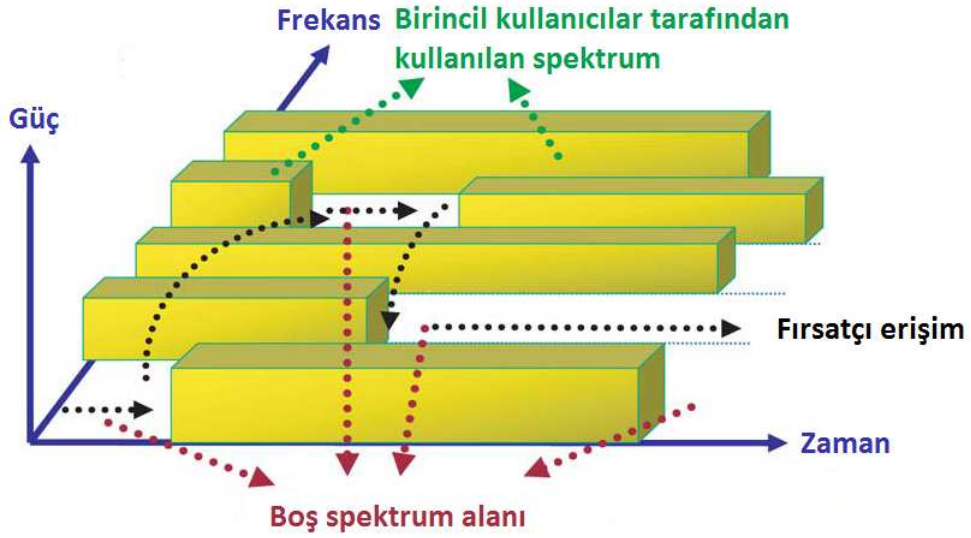
Spektrum algılama ve analizi sırasında, bilişsel radyo spektrumdaki boş alanları sezer. Bu boş alanlar birincil kullanıcılar tarafından kullanılmayan spektrum alanlarıdır. Böylece spektral verimlilik sağlanmış olur. Öte yandan, birincil kullanıcı, ikincil kullanıcının kullandığı bandı tekrar kullanmak isterse, ikincil kullanıcı bunu spektrum algılama sayesinde sezebilir ve birincil kullanıcıya hayati bir girişim yapmadan başka bir banda geçmiş olur. Şekil 2.5'te bunun bir örneği verilmiştir.

Spektrumdaki boş yerleri algılayarak bulduktan sonra spektrum yönetimi ve bant değiştirme işlevi, ikincil kullanıcının en iyi kanalı seçip oraya atlamasını etkin kılar. Bu kanal seçimi, çeşitli QoS gereksinimlerine göre olur [33]. Örneğin, birincil kullanıcı sahip olduğu banda tekrar geçmek isterse, ikincil kullanıcı gürültü ve girişim değeri, yol kaybı, kanal hata oranı vb. kısıtlara göre başka bir banda kendini kaydıracaktır.

Dinamik spektrum erişiminde, ikincil kullanıcı bandı birincil kullanıcılarla, yine ikincil kullanıcılarla ya da her ikisiyle de kullanılabilir durumdadır. Böylece, iyi tahsis edilmiş spektrum yüksek spektral verimliliği sağlamak adına çok önemlidir. İkincil kullanıcılar lisansa sahip birincil kullanıcıların bantlarını kullanırken, ikincil kullanıcıların yarattığı girişim mutlaka belli bir seviyenin altında tutulmalıdır. Birden fazla ikincil kullanıcı spektrumu ortaklaşa kullanmak istiyorsa, bunların erişimi çarpışma ve girişim kısıtlarına göre koordineli bir biçimde olmalıdır.

2.2.2 Spektrum Algılama ve Analizi

Spektrum algılama, bilişsel ağların çevre değişkenlerini anlama ve buna göre kendini adapte edebilme özelliğinin temelidir. Böylece ikincil kullanıcılar, birincil kullanıcıların boş bıraktıkları spektrumu kullanabilirler. Dolayısıyla dinamik spektrum yönetimi için spektrum algılama ve analizi en kritik aşamadır.



Şekil 2.5. Spektrum boşluklarının resmedilmesi [29]

Spektrum algılama ve analizinin üç önemli yönü vardır [29].

1. Girişim sıcaklığı
2. Spektrumu algılama
3. Kooperatif algılama

Girişim sıcaklığı

Birincil kullanıcıdaki girişimin değerini ölçerek bu kullanıcıların girişimden etkilenmesini en aza indirmek için önemlidir. İkincil kullanıcıların birincil kullanıcıların olmadığı spektrum alanlarına geçmesi gerekmektedir. Bu karar verme mekanizması değişik parametrelere göre olmaktadır. Geleneksel olarak, girişim yapan cihazların yayın gücünü kısıtlamak en yaygın yöntemdir. Örneğin, iletim gücü, vericinin belli mesafe uzağında belli bir güç değerinin altında kalmalıdır. Ancak, cihaz hareketliliğinin artması ve radyo frekansı yayıcı cihazların çeşitliliğinden dolayı, yayın gücünü kısıtlamak sorunlu bir durum olmaya başlamaktadır. Çünkü girişim kestirilemez bir hal almıştır. Bu durumun önüne geçilmesi için, FCC girişim belirlemede yeni bir terim ortaya atmıştır ve bu da *girişim sıcaklığıdır* [37]. Girişim sıcaklığı birim bant genişliğindeki alıcı antenin aldığı güce denir [38], [39] ve

$$T_I(f_c, B) = \frac{P_I(f_c, B)}{kB} \quad (2.1)$$

şeklinde yazılır. Burada $P_I(f_c, B)$, f_c orta frekansında ortalama girişim gücünü temsil eder ve birimi Watt'tır. B çalışılan bant genişliği ve k Boltzmann sabitidir. Herhangi bir lisanssız kullanıcının, lisanslı bir alıcıda yaratması gereken girişim gücü ancak bu kadar olmalıdır.

Spektrumu algılama

Bilişsel radyo çalıştığı çevreyi tanıma, öğrenme ve ölçme yeteneklerini spektrum algılama sayesinde elde eder. Bu şekilde spektrumun uygunluğu ve girişim durumunu kestirebilir. Birincil kullanıcının belli bir zamanda belli bir bandı kullanmadığı sezilirse, ikincil kullanıcı buradan faydalanır. Yani, spektrum algılama işlemi, zamanda, frekansta ve uzamda olur. Hüzmeleme teknolojisindeki gelişmeler sayesinde, birden fazla kullanıcı aynı anda aynı coğrafi bölgedeyken aynı frekansı veya kanalı kullanabilmektedir. Böylece, eğer birincil kullanıcı tüm yönlerde yayın yapmıyorsa, ikincil kullanıcılar için fazladan spektrum fırsatı ortaya çıkmış olur. Dolayısıyla, spektrum algılama yaparken aynı zamanda gelen açılar da hesaba katmak zorunludur [40]. Bunun yanında, birincil kullanıcılar kendilerine tahsis edilen bandı yayılı spektrum ya da frekans atlamalı olarak kullanıyor olabilirler. Bu da ikincil kullanıcıların birincil kullanıcılarla aynı bandı kullanmasını kolaylaştıran bir yöntemdir. Çünkü yayılı spektrumda dikgen kodlar kullanılarak kullanıcıların birbirine girişim yaratmaması sağlanmaktadır [41]. Bu da spektrumdan faydalanma fırsatlarının kod uzayında olmasını sağlar. Ancak bu yöntemlerde, çokyol parametrelerinin sezimi gibi kodların da sezimi gerekmektedir.

Spektrum algılaması için bir çok yöntem vardır. Bunların başlıcaları;

1. Enerji algılama
2. Öznitelik algılama
3. Uyumlu filtreleme ve evreyumlu sezim

Bu tekniklerin detayları [29] no.'lu kaynakta işlenmiştir.

Kooperatif algılama

Spektrum algılama performansı gürültü, gölgelenme ve çokyol etkisi nedeniyle oldukça sınırlıdır. Birincil kullanıcının SNR seviyesi düşük olduğunda, çok uzun algı-

lama zamanlarında bile spektrumu algılamak neredeyse imkansız olur. Eğer ikincil kullanıcı birincil kullanıcıyı algılayamazsa, algılanmayan birincil kullanıcı problemlerle karşılaşmaya başlar, çünkü artık sadece gürültüyle değil girişimle de başa çıkmak zorundadır.

Bağımsız sönümlenen kanalların (uzamsal çeşitlilik) ve çok kullanıcı çeşitliliğinin avantajından yararlanarak, spektrum algılamadaki güvenilirliğin kooperatif algılama ile artacağı öngörülmektedir. Bu sayede sezim olasılığı artar ve birincil kullanıcı girişimden korunmuş olur. Merkezileştirilmiş kooperatif algılamada, merkezi denetimci (örneğin, ikincil baz istasyonu) çevresindeki ikincil kullanıcıların bölgesel olan gözlemlerini toplar ve bazı karar verme algoritmalarına göre uygun spektrumu belirler ve ikincil kullanıcıları boş spektrum hakkında bilgilendirir. Dağıtılmış kooperatif algılamada ise, ikincil kullanıcılar edindikleri bilgileri diğer ikincil kullanıcılarla paylaşırlar ve bu paylaşım esnasında herhangi bir omurga arayapıya ihtiyaç duymazlar. Bu durum dağıtılmış kooperatif algılamanın maliyetini de düşük tutar. Ayrıca, röleler de [42] no.'lu kaynakta belirtilen spektrum algılama yöntemindeki gibi kooperatif spektrum algılamada kullanılabilir. Bu yöntemde aynı bandı kullanan bilişsel kullanıcılar yükselt-ve-ilet protokolü ile röleyle haberleşerek birbirine yardımcı olurlar. Bu da ağın doğal yapısından gelen asimetrisinin kendi çevikliğini arttırabileceğinin göstergesidir.

2.2.3 Dinamik Spektrum Tahsisi ve Paylaşımı

Spektrum seziminin sonuçları doğrultusunda, ikincil kullanıcı hangi bandı kullanabileceğini algılayabilir. Ancak, spektrumun uygunluğu ve kalitesi, birincil kullanıcıların aktiviteleri ve ikincil kullanıcılarla olan spektrum yarıışı yüzünden kanalların durumu hızla değişebilir. Spektrum kaynaklarının verimliliğini sağlamak için ikincil kullanıcıların spektrum bandını ne zaman ve nasıl kullanacaklarını bilmeleri gerekmektedir. Birincil kullanıcılarla ve ikincil kullanıcılarla hangi bantlarda bir arada bulunabileceğini, hangi spektrum bandını algılayıp kullanacağını da ayrıca bilmelidir. Bu sorunları aşmak için spektrum tahsisi ve paylaşımı çok önemli konudur. Bu zamana kadar kullanılan spektrum tahsisi ve paylaşımı yöntemleri çeşitli sınıflandırılmalarla özetlenebilir.

Birinci sınıflandırma, spektrum bantlarını ikincil kullanıcıların kullanmasına yöneliktir. *Açık spektrum erişimi* olarak adlandırılan, lisanssız bantlara erişen ikincil kullanıcıla-

rın spektrumu paylaşarak kullanmasıdır. Buradaki açık spektrumlar, lisanssız olarak tüm kullanıcıların endüstri, bilim ve sağlık sektöründe kullandığı bantlar olarak düşünülebilir. İkincil kullanıcıların birincil kullanıcılarla lisanslı bantları kullanması diğer bir yöntemdir ve *hiyerarşik erişim modeli veya lisanslı spektrum paylaşımı* olarak bilinir [43]. Birincil kullanıcılar genellikle bilişsel ekipmanlar kullanmazlar. Dolayısıyla birincil kullanıcı dinamik/fırsatçı erişim yöntemi kullanmaz. Ancak birincil kullanıcı ne zaman hakkı olan bandı isterse ikincil kullanıcılar kendi güçlerini, bant genişliklerini ve spektrumlarını buna göre ayarlamak zorundadır. Aksi takdirde, birincil kullanıcıların iletişimlerine girişim yaparak zarar verirler.

İkincil kullanıcıların kanal erişim teknolojileri de iki kısma ayrılabilir [43].

1. İkincil kullanıcılar, birincil kullanıcıların iletişim yaptıkları bantlarda iletişim yapabilirler. Ancak bu durumda birincil kullanıcının alıcısına gelen girişimin belli bir girişim sıcaklığı modeli ile kısıtlanması zorunludur.
2. İkincil kullanıcılar, birincil kullanıcıların iletişim yaptıkları bantları kullanamaz. Dolayısıyla girişim yapmadıkları için girişim kısıtına gerek yoktur. Ancak bu durumda spektrum algılama teknikleri zorunlu hal alır.

İkinci sınıflandırma ağ mimarisi ile ilgilidir [33]. Spektrum tahsisi ve ikincil kullanıcıların erişimlerini organize eden merkezi bir eleman olduğunda spektrum tahsisi *merkezleştirilmiş* olur. Ancak, bu altyapıyı oluşturmak yüksek maliyeti sebebiyle mümkün olmayabilir. Bunun yanında geçici ağların askeriyede ya da acil durumlarda kullanılabilmesinden dolayı merkezi bir denetimci olmayabilir. Bu elemanın olmaması durumdaki spektrum paylaşım yöntemine *dağıtılmış spektrum paylaşımı* denir. Bu yöntemde her kullanıcı kendi erişim stratejisine göre kendi kararını kendi verir.

Üçüncü sınıflandırma ikincil kullanıcıların kanala erişim davranışıyla ilgilidir [33]. Örneğin, tüm kullanıcılar aynı operatöre bağlıysa ya da genel olarak ağda ortak bir amaç için çalışıyorlarsa, bu kullanıcılar erişim ve tahsis işlemlerini tüm çevrenin iyiliğini enbüyütmek için yaparlar. Buna *kooperatif spektrum paylaşımı* denir. Dolayısıyla genellikle merkezleştirilmiş ağlar kooperatif paylaşım yaparlar. Diğer yandan, tüm kullanıcıların aynı operatöre bağlı olmadığı bir çok durum olabilir. Farklı kullanıcıların farklı amaçları vardır ve onlar kendi kaynakları çerçevesinde kendi çıkarları

doğrultusunda hareket ederler. Bu yöntemde de *kooperatif olmayan spektrum paylaşımı* denir.

2.3 Bilişsel Radyo Ağlarında Güç Kontrolü

İkincil kullanıcılar üzerindeki girişimi yönetmek için ya da birincil kullanıcılara ikincil kullanıcılar tarafından yaratılan girişimi engellemek için çeşitli güç kontrolü yöntemleri bilişsel radyo ağlarında mevcuttur. Bu yöntemler spektrum paylaşımını organize etmek için kullanılır.

OSA'da güç kontrolü, [44] no.'lu kaynakta çalışılmıştır. Bu modelde, ikincil kullanıcı hedef düğüme yüksek iletim gücü kullanarak iletişim yapmak isterse, birincil kullanıcı çalışmasını durdurana kadar beklemek zorundadır, diğer yandan düşük güç kullanarak ve diğer kullanıcılarla hedef düğüme bir yol çizerek, bu yolu kullanabilir. Bu spektrum fırsatlarının ortaya çıkmasında iletim gücünün etkisi de yine [44] no.'lu kaynakta incelenmiştir ve birincil ağın trafik yüküyle doğru orantılı olarak ikincil kullanıcıların eniyi iletim gücünün düştüğü gösterilmiştir. İkincil kullanıcıların uzun dönem ortalama hızını enbüyütlen eniyi güç kontrolü stratejisi tasarımında dinamik programlama kullanılmıştır [45]. Fırsatçı güç kontrol stratejisi, [46] no.'lu kaynakta önerilmiştir. Bu yöntemle, birincil kullanıcıların hizmet dışı kalma olasılığını belli bir seviyede tutarak ikincil kullanıcıların hızlarını enbüyültülmesi sağlanmıştır. Birincil ve ikincil kullanıcıların birden fazla aynı kanalı kullandığı durumlarda sinyal gücünü, yerleşimi ve işbirliği hesaba katan işbirlikli spektrum algılama yöntemi [47] no.'lu kaynakta verilmiştir. Bu yöntemde de, ikincil kullanıcıların bir kanalda yayın yapabileceği enbüyük güç sınırlıdır ve bu kullanıcılar birbiriyle işbirliği içinde yerleşim, hata kestirimi, güç vb. bilgileri dağıtılmış veritabanından çekerler.

Bu konudaki önceki çalışmalarda, problemler, çakışma-grafiği kullanılarak oluşturulan girişim modeliyle basitleştirilmiştir. Aynı zamanda, bu modele protokol tabanlı model denir [48]. Çakışma-grafiği, kullanıcılar üzerindeki girişim kısıtını tanımlar. Grafiğin üzerindeki her düğüm bir kullanıcıyı ve düğümler arasındaki her kenar girişimin varlığını belirtir. Fiziksel girişim modeli tabanlı oluşturulan çakışma-grafiklerinin üretimi ile ilgili geniş bir çalışma [49] no.'lu kaynakta sunulmuştur. Bu çalışmada, fiziksel girişim kısıtları altında spektrum tahsis problemlerinin çözümü için grafik kuramını kullanılırken toplam girişimin etkisi araştırılmıştır.

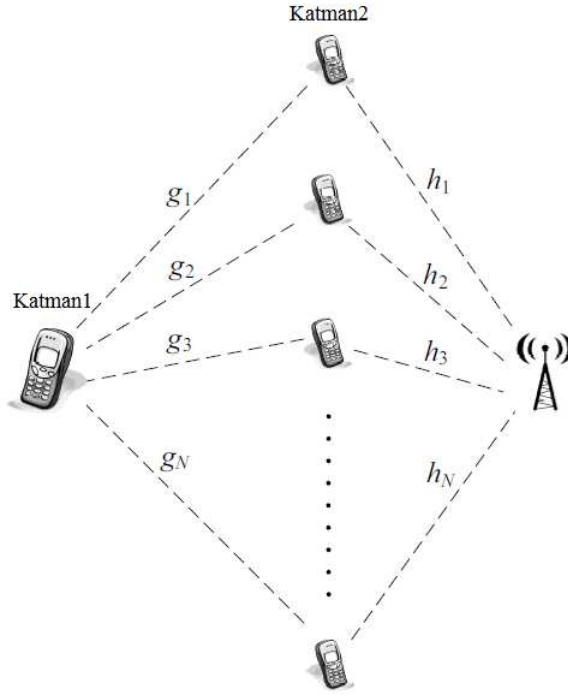
2.4 Sistem Modeli

Ağ modeli iki farklı katmandan oluşmaktadır. Bu model bize hem bilişsel radyo ağları ile hem de heterojen ağlar ile benzerlik kurmamızı sağlamaktadır. Bu noktadan sonra birinci katmanda bulunan kullanıcı Katman 1 kullanıcısı olarak diğer katmandaki kullanıcılar Katman 2 kullanıcıları olarak adlandırılmıştır. Senaryomuzda, Katman 1 kullanıcısı sistemi lisanslı kullanır ve Katman 2 kullanıcıları aynı spektrumu paylaşmaktadır. Burada Katman 1 kullanıcısını makro-hücre kullanıcısına, Katman 2 kullanıcılarını ise piko-hücre/femto-hücre kullanıcılarına benzetmek mümkündür. Diğer bir deyişle, bilişsel radyo ağları için N tane ikincil kullanıcı bir sistemde, bir tane birincil kullanıcı vardır. Katman 2 kullanıcıları için çıkış yolu senaryosu düşünüldüğünde, baz istasyonunda alınan sinyalin kesikli-zaman temelbant modeli

$$y[n] = \sum_{i=1}^N h_i[n]x_i[n] + w[n] \quad (2.2)$$

şeklinde yazılır. Burada $h_i[n]$, i 'inci kullanıcının baz istasyonu ile arasındaki kanalın n anındaki katsayısıdır ve $h_i[n] \in \mathbb{C}$ olarak tanımlanır. $x_i[n]$, n anında kullanıcının baz istasyonuna ilettiği herhangi bir yıldız kümesinden seçilmiş ortalama değeri sıfır ve varyansı σ_x^2 olan sembolü tanımlar. Sistem modelinde, kullanıcıların hepsinin aynı P_{azami} tepe gücüyle iletim yaptıkları varsayılmıştır. Yani bütün n anları için $P_i[n] \leq P_{azami}$. $w[n]$ ortalama değeri sıfır, varyansı σ_n^2 olan beyaz Gauss gürültüsüdür.

Katman 2 kullanıcıları baz istasyonu ile iletişim yaparken Katman 1 kullanıcısına girişim yaparak, onun servis kalitesini belli oranda düşürürler. Ancak senaryomuzun bilişsel radyo ve heterojen ağlara uygunluğu açısından bu girişim istenilmeyen bir durumdur ve daha önce bahsedilen girişim sıcaklığı ile eş değer düşünülebilir. Buna göre Katman 1 kullanıcısının alıcı antenindeki toplam girişim gücü $|g_i[n]|^2 P_i[n]$ şeklinde yazılabilir. Burada $g_i[n]$, i 'inci Katman 2 kullanıcısıyla, Katman 1 kullanıcısının alıcısı arasındaki kanal katsayısıdır ve $P_i[n]$, Katman 2 kullanıcılarının iletişim yapmak için yayın yaptıkları güç miktarıdır. Toplam girişim değerinin Katman 1 kullanıcısının karşılayabileceği bir değerden küçük olması gerekir ve bu tüm n anları için $\sum_{i=1}^N |g_i[n]|^2 P_i[n] \leq Q$ ile gösterilebilir. Burada, Q , Katman 1 kullanıcısının karşılayabileceği girişim değeridir ve sistem gereksinimlerinde bu değer verildiği farzedilmiştir. Başka bir bakış açısı da bu değer Katman 1 kullanıcısının kanal durumuna göre



Şekil 2.6. Sistem modeli

uyarlamalı seçilebileceği olabilir.

Problemin kolaylaştırılması için zaman indisi atılabilir. Katman 2 kullanıcılarının güç tahsisi vektörü $P(\mathbf{h}, \mathbf{g}) = [P_1(\mathbf{h}, \mathbf{g}), \dots, P_N(\mathbf{h}, \mathbf{g})]^T$ yazıldığında ve yine notasyonu basitleştirmek için h ve g indisleri atıldığında, hiçbir girişim giderme tekniği kullanılmıyorken ve alıcı-vericide tek anten varken sistemin toplam veri hızı

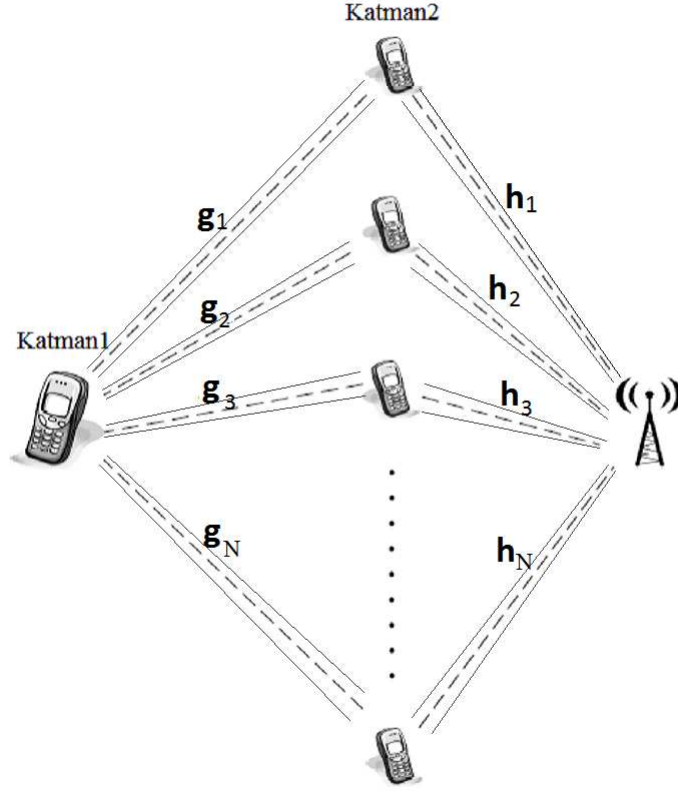
$$R(\mathbf{P}) = \sum_{i=1}^N \log \left(1 + \frac{|h_i|^2 P_i}{\sigma^2 + \sum_{j=1, \{j \neq i\}}^N |h_j|^2 P_j} \right) \text{ [bit/s/Hz]} \quad (2.3)$$

şeklinde yazılır. Bu durumda, çalışılan eniyileme problemi

$$\begin{aligned} \text{enbüyült} \quad & R(\mathbf{P}) \\ \text{kısıtlar} \quad & \sum_{i=1}^N |g_i|^2 P_i \leq Q \\ & 0 \leq P_i \leq P_{azami} \end{aligned} \quad (2.4)$$

şeklinde formüle edilir.

Baz istasyonunda ve/veya Katman 1 kullanıcılarında birden çok anten olabilir. Şekil 2.7'de hem Katman 1 kullanıcılarındaki hem de baz istasyonunda çoklu antenin



Şekil 2.7. Katman 1 kullanıcılarında ve Katman 2 baz istasyonunda çoklu anten olduğunda sistem modeli

olduğu durum resmedilmiştir. Sadece baz istasyonunda birden fazla anten olması durumunda Problem 2.4

$$\begin{aligned}
 \text{enbüyült} \quad R(\mathbf{P}, \mathbf{r}) &= \sum_{i=1}^N \log \left(1 + \frac{|\mathbf{r}^T \mathbf{h}_i|^2 P_i}{\sigma^2 + \sum_{j=1, \{j \neq i\}}^N |\mathbf{r}^T \mathbf{h}_j|^2 P_j} \right) \\
 \text{kısıtlar} \quad \mathbf{0} &\leq \mathbf{P} \leq P_{\text{azami}} \mathbf{1} \\
 \sum_{i=1}^N |g_i|^2 P_i &\leq Q \\
 \sum_{i=1}^L |r_i|^2 &= 1
 \end{aligned} \tag{2.5}$$

şeklinde düzenlenebilir. Maliyet işlevindeki, \mathbf{r} , L tane alıcı anteni bulunan baz istasyonundaki birimsel doğrusal alıcıyı gösterirken, $\mathbf{r} \in \mathbb{C}^L$ olarak tanımlanır. \mathbf{h}_i , i 'inci kullanıcının baz istasyonu ile arasındaki kanal katsayılarını bulunduran vektördür ve $\mathbf{h}_i \in \mathbb{C}^L$ olarak tanımlanır. $\mathbf{P} = [P_1 \ P_2 \ \dots \ P_N]^T$ tüm kullanıcıların yayın gücünü içeren güç vektörü olarak belirlenmiştir.

Problem 2.5'i Katman 1 kullanıcısında çoklu anten olduğu duruma genişletirsek

$$\begin{aligned}
 \text{enbüyült} \quad R(\mathbf{P}, \mathbf{r}) &= \sum_{i=1}^N \log \left(1 + \frac{|\mathbf{r}^\top \mathbf{h}_i|^2 P_i}{\sigma^2 + \sum_{j=1, \{j \neq i\}}^N |\mathbf{r}^\top \mathbf{h}_j|^2 P_j} \right) \\
 \text{kısıtlar} \quad \mathbf{0} &\preceq \mathbf{P} \preceq P_{\text{azami}} \mathbf{1} \\
 &\sum_{i=1}^N \left(\sum_{j=1}^K |g_{i,j}|^2 \right) P_i \leq Q \\
 &\sum_{i=1}^K |r_i|^2 = 1
 \end{aligned} \tag{2.6}$$

elde edilir. Burada $g_{i,j}$, i 'inci Katman 2 kullanıcısı ile Katman 1 kullanıcısının j 'inci anteni arasındaki kanal katsayısıdır.

Alıcı antendeki girişim gücü ele alındığından Problem 2.4 ve 2.5'teki girişim kısıtının doğrusallığı bu problemde değişmemiştir. Bu yüzden Problem 2.4 ve 2.5'in çözümlerini bu probleme genellemek için sadece $|g_i|^2$ yerine $\left(\sum_{j=1}^K |g_{i,j}|^2 \right)$ yazmak yeterli olacaktır. Tezin geri kalanında Problem 2.4 ve 2.5 ele alınmış ve bu problemler için çözümler geliştirilmiştir.

Bu problemlerdeki maliyet işlevi, içbükey bir işlev değildir. Dolayısıyla bilinen dışbükey programlama teknikleri kullanılamaz ve çok katmanlı yapılarda, çok kullanıcı senaryolar için analitik çözüm geliştirmek hayli zordur. Bu sebeple, ilk olarak SISO modelinde iki tane Katman 2 kullanıcısına yer verilip bu durumdaki analitik çözüm verilmiştir. Daha sonra çok kullanıcıli durumlar için bazı yaklaşımlar yapılmış ve bu durumlar için analitik çözümler geliştirilmiştir. Yapılan bu çözümler daha sonra SIMO modeline genişletilmiştir.

3. SISO MODELİ

3.1 İki tane Katman 2 kullanıcılı senaryo için analitik çözüm

3.1.1 Tek Katman 1 kullanıcılı senaryo

Bu bölümde Problem 2.4'ün iki kullanıcılı versiyonu için analitik çözüm geliştirilmiştir. Burada yapılan çözümler, özellikle problemin geometrik yapısını anlamamız açısından önemlidir.

Problem 2.4'ü iki kullanıcı için tekrar yazarsak

$$\begin{aligned} \text{enbüyüt} \quad R(\mathbf{P}) &= \log \left(1 + \frac{|h_1|^2 P_1}{|h_2|^2 P_2 + \sigma^2} \right) + \log \left(1 + \frac{|h_2|^2 P_2}{|h_1|^2 P_1 + \sigma^2} \right) \quad (3.1) \\ \text{kısıtlar} \quad |g_1|^2 P_1 + |g_2|^2 P_2 &\leq Q \\ 0 &\leq P_{1,2} \leq P_{azami} \end{aligned}$$

elde edilir.

Önsav 3.1 *Eniyi güç kontrolü olurlu kümenin sınırlarındadır [14].*

İspat. Problem 3.1'deki maliyet işlevindeki güç vektörlerini $\beta > 1$ gibi bir katsayıyla çarparsak, güç değerleri artar.

$$R(\beta \mathbf{P}) = \log \left(1 + \frac{|h_1|^2 P_1}{|h_2|^2 P_2 + \sigma^2/\beta} \right) + \log \left(1 + \frac{|h_2|^2 P_2}{|h_1|^2 P_1 + \sigma^2/\beta} \right) > R(\mathbf{P}) \quad (3.2)$$

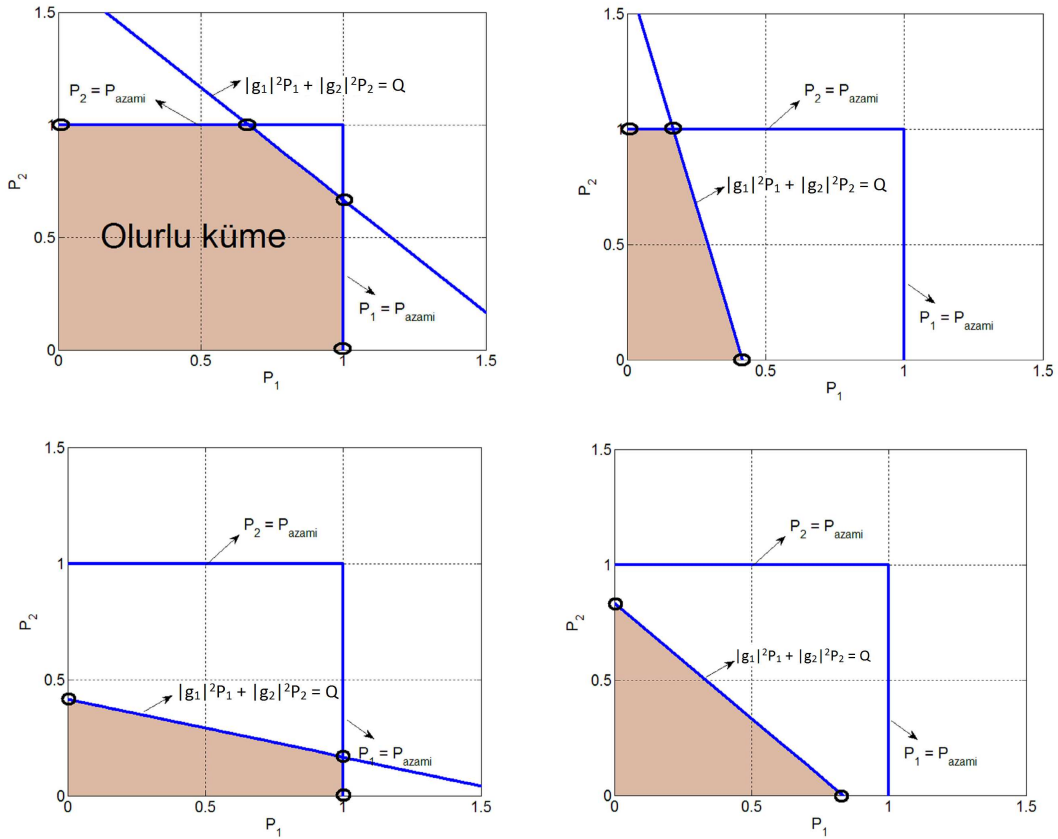
Denklem 3.2'de görüldüğü gibi bu durum gürültü bileşenlerini de β oranında düşürür. Ve bu durum veri hızının artmasına sebep olur. β ne kadar büyürse maliyet işlevinin değeri artar ve en sonunda sınıra dayanır. Bu nedenle çözüm olurlu kümenin sınırlarında çıkmak zorundadır. ■

Buna göre, Problem 3.1'i çözen enbüyük nokta dört farklı durum için;

- Eğer $\frac{Q}{|g_1|^2} > P_{azami}$ ve $\frac{Q}{|g_2|^2} > P_{azami}$ ise, $P_1 = P_{azami}$, $P_2 = P_{azami}$ doğrularının veya kısıt doğrusunun olurlu küme ile kesiştiği doğru parçasının üzerinde olur.

- Eğer $\frac{Q}{|g_1|^2} < P_{azami}$ ve $\frac{Q}{|g_2|^2} > P_{azami}$ ise, $P_2 = P_{azami}$ doğrusunun ve kısıt doğrusunun olurlu küme ile kesiştiği doğru parçasının üzerinde olur.
- Eğer $\frac{Q}{|g_1|^2} > P_{azami}$ ve $\frac{Q}{|g_2|^2} < P_{azami}$ ise, $P_1 = P_{azami}$ doğrusunun ve kısıt doğrusunun olurlu küme ile kesiştiği doğru parçasının üzerinde olur.
- Eğer $\frac{Q}{|g_1|^2} < P_{azami}$ ve $\frac{Q}{|g_2|^2} < P_{azami}$ ise, kısıt doğrusunun olurlu küme ile kesiştiği doğru parçasının üzerinde olur.

Şekil 3.1'de bu durumların geometrik gösterimi verilmiştir.



Şekil 3.1. 4 farklı durum için olurlu kümenin geometrik gösterimi. Sol üstteki şekil 1. durum, sağ üstteki şekil 2. durum, sol alttaki şekil 3. durum, sağ alttaki şekil 4. durumu gösterir.

Önsav 3.2 Maliyet işlevi kısıt doğrusu ($|g_1|^2 P_1 + |g_2|^2 P_2 = Q$) üzerinde dışbükeyim-sidir.

İspat. $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ tanımlı iki kere türevlenen işlevi,

$$\mathbf{y}^T \nabla f(\mathbf{x}) = 0 \Rightarrow \mathbf{y}^T \nabla^2 f(\mathbf{x}) \mathbf{y} \geq 0 \quad (3.3)$$

koşulunu, tüm $\mathbf{x} \in \text{dom } f$ ve tüm $\mathbf{y} \in \mathbb{R}^n$ için sağlanıyorsa f dışbükeyimsidir. Bu koşul, $\mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ tanımlı bir işlev için

$$f'(x) = 0 \Rightarrow f''(x) \geq 0 \quad (3.4)$$

olur. Yani birinci türevin sifıra eşit olduğu tüm noktalarda ikinci türev sıfırdan büyükse veya sifıra eşitse, bu işlev dışbükeyimsidir [11]. Maliyet işlevinin kısıt doğrusu üzerindeki davranışını anlamak için öncelikle değişkenlerden birisini elememiz gerekir.

Maliyet işlevinde $P_1 = \frac{Q - |g_2|^2 P_2}{|g_1|^2}$ yazılarak,

$$R(P_2) = \log \left(\frac{(|h_1|^2 \frac{Q - |g_2|^2 P_2}{|g_1|^2} + |h_2|^2 P_2 + \sigma^2)^2}{(|h_2|^2 P_2 + \sigma^2)(|h_1|^2 \frac{Q - |g_2|^2 P_2}{|g_1|^2} + \sigma^2)} \right) \quad (3.5)$$

elde edilir. Bu işlevin birinci türevini sıfır yapan nokta

$$P_2^0 = \frac{|h_2|^2 Q^2 |h_1|^4 + |g_2|^2 Q \sigma^2 |h_1|^4 - |h_2|^2 \sigma^4 |g_1|^4 + |g_2|^2 \sigma^4 |g_1|^2 |h_1|^2}{\sigma^2 |g_1|^4 |h_2|^4 + \sigma^2 |g_2|^4 |h_1|^4 + Q |g_1|^2 |h_1|^2 |h_2|^4 + Q |g_2|^2 |h_1|^4 |h_2|^2} \quad (3.6)$$

ile verilir.

$$\frac{\partial R}{\partial P_2} \Big|_{P_2=P_2^0} = 0 \quad (3.7)$$

Bu noktayı ikinci türevde yerine koyarsak

$$\frac{\partial^2 R}{\partial P_2^2} \Big|_{P_2=P_2^0} = \frac{1}{\left(\sigma^2 |g_1|^2 |h_2|^2 + \sigma^2 |g_2|^2 |h_1|^2 + Q |h_1|^2 |h_2|^2 \right)^2} \cdot \frac{\left(\sigma^2 |g_1|^4 |h_2|^4 + \sigma^2 |g_2|^4 |h_1|^4 + Q |g_1|^2 |h_1|^2 |h_2|^4 + Q |g_2|^2 |h_1|^4 |h_2|^2 \right)^4}{2 |g_1|^4 |h_1|^4 |h_2|^4 \left(|g_1|^2 \sigma^2 + Q |h_1|^2 \right)^2 \left(|g_2|^2 \sigma^2 + Q |h_2|^2 \right)^2} \quad (3.8)$$

çıkar. Buradaki tüm değişkenler \mathbb{R}_+ kümesinde olduğu sürece, bu ifade sıfırdan büyüktür veya sifıra eşittir. Böylece, veri hızı işlevinin kısıt doğrusu $(|g_1|^2 P_1 + |g_2|^2 P_2 = Q)$ üzerinde dışbükeyimsi olduğu gösterilmiş olur. ■

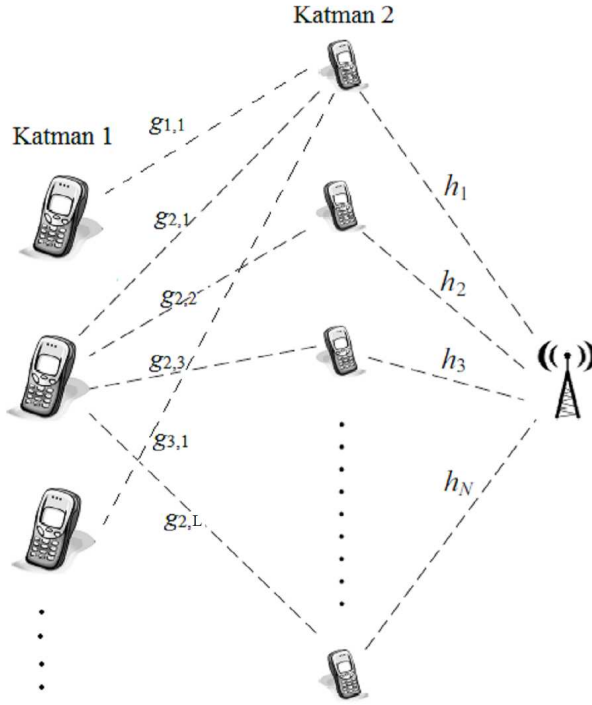
Teorem 3.1 *İki kullanıcının olduğu sistemde, bireysel güç kısıtları ve toplam girişim kısıtı altında eniyi güç kontrolü vektörü, olurlu kümenin köşelerinde çıkar.*

İspat. Önsav 3.1'e göre, Problem 3.1'i çözen enbüyük noktanın olurlu kümenin sınırlarında çıkması gerekmektedir. Bu sınırlardan birisi de kısıt doğrusunun kendisidir. Kısıt doğrusu üzerinde yapılacak enbüyütleme işlemi, bu doğru üzerine maliyet işlevinin dışbükeyimsi olmasından dolayı, bu doğrunun olurlu kümeyle kesişimi olan doğru parçasının uçlarında çıkar. Örneğin, bu 1. durum için $\left(P_{azami}, \frac{Q - |g_1|^2 P_{azami}}{|g_2|^2} \right)$ ve $\left(\frac{Q - |g_2|^2 P_{azami}}{|g_1|^2}, P_{azami} \right)$ noktalarını verir. Aynı zamanda maliyet işlevinin, Önsav 3.2'ye göre $P_1 = P_{azami}$ doğrusu üzerinde dışbükeyimsi olduğu gösterilebilir. (i.e. $Q = P_{azami}$, $|g_2|^2 = 0$ ve $|g_1|^2 = 1$) Dolayısıyla bu doğru parçası üzerinde yapılacak bir enbüyütleme işlemi de bu doğru parçasını sınırlayan noktalarda çıkar. Bu işlem $P_2 = P_{azami}$ doğrusu için de simetriktir ve bu doğru üzerinde de maliyet işlevinin dışbükeyimsi olduğu direkt olarak söylenebilir. Dolayısıyla, bu doğru parçasını da enbüyütleme noktalarının uçlarda çıkacağı bellidir. Bu durumda, herhangi olası olurlu küme için enbüyük noktanın köşelerde çıktığı belirlenir. Böylece, ispat tamamlanmış olur. ■

Teorem 3.1'in en önemli sonucu, iki kullanıcı sistemde, olurlu kümeyi kısıtlayan doğrular üzerinde maliyet işlevinin dışbükeyimsi olduğunu görmemizdir. İki kullanıcı için çözülen Problem 3.1'i N tane kullanıcıya genellemeden önce, başka bir problemin çözümü üzerine tartışalım.

3.1.2 Birden fazla Katman 1 kullanıcı senaryo

Problem 3.1'de Katman 1'de sadece bir kullanıcı vardır. Fakat gerçek hayatta makro-hücre kullanıcısı olarak düşünebileceğimiz bu kullanıcı tipinden birden fazla olabilir. Bununla birlikte makro-hücre kullanıcılarının hücre içinde buldukları yere göre farklı servis kalitesinde hizmet alabilecekleri de düşünülmelidir. Örneğin, hücre-kenar kullanıcıları ve gölgeleme altındaki kullanıcılar, hücre ortasındaki kullanıcılara göre daha düşük seviyede servis kalitesine sahiptir. Aynı şekilde, bu senaryoyu bilişsel-radyoda birincil kullanıcılar için de düşünebiliriz. Bunun gibi sebeplerden ötürü, farklı kısıt değerlerinde Katman 1 kullanıcılarının sayısını arttırmak daha gerçekçi bir yaklaşımdır.



Şekil 3.2. Birden fazla Katman 1 kullanıcısı için sistem modeli

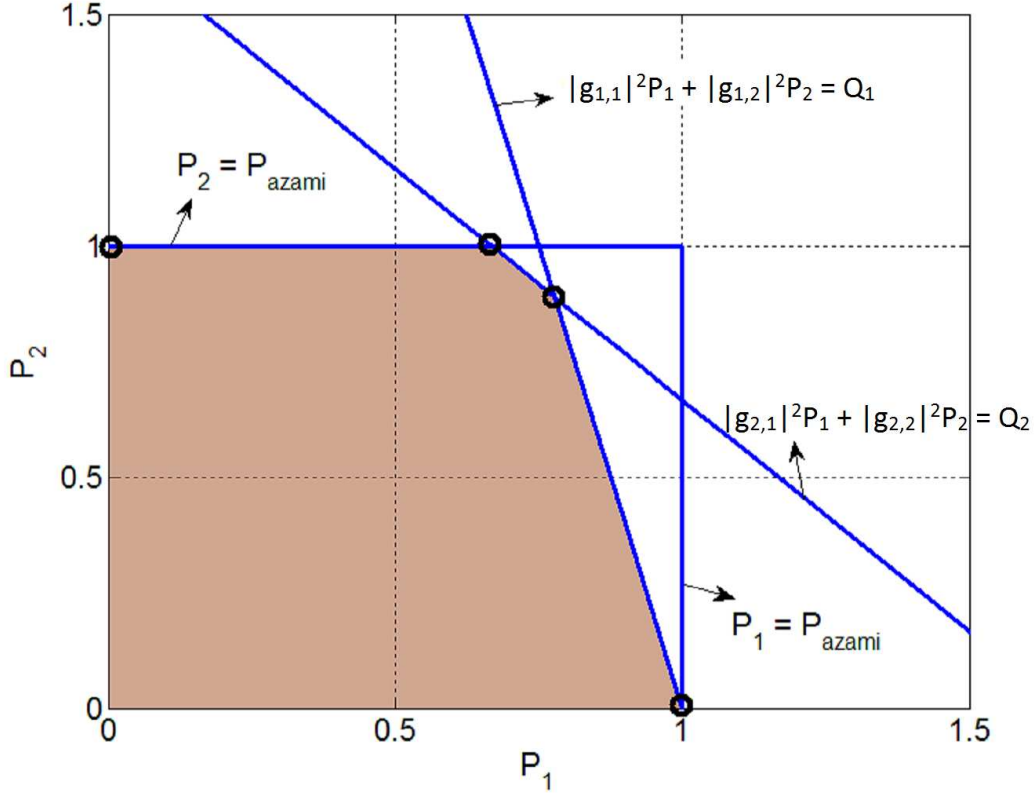
Bu bilgilerin ışığında Problem 3.1'de değişikliğe gitmek gerekmektedir. Yeni eniyileme problemini,

$$\begin{aligned} \text{enbüyült} \quad & R(\mathbf{P}), \\ \text{kısıtlar} \quad & \sum_{i=1}^2 |g_{k,i}|^2 P_i \leq Q_k, \quad k = 1, \dots, L, \quad i = 1, 2, \\ & 0 \leq P_i \leq P_{\text{azami}}, \quad i = 1, 2. \end{aligned} \quad (3.9)$$

şeklinde formüle edebiliriz. Burada $R(\mathbf{P}) = \sum_{i=1}^2 \log \left(1 + \frac{|h_i|^2 P_i}{\sigma^2 + \sum_{j=1, \{j \neq i\}}^2 |h_j|^2 P_j} \right)$ 'dir. $|g_{k,i}|^2$, k 'inci Katman 1 kullanıcısı ile i 'inci Katman 2 kullanıcısı arasındaki karmaşık değere sahip kanal katsayısıdır. Q_k ise k 'inci Katman 1 kullanıcısının karşılayabileceği girişim değeridir.

Bu problemin olası bir olurlu kümesini geometrik olarak Şekil 3.3'te görebiliriz. Burada iki Katman 1 kullanıcısı için rastgele oluşturulmuş bir olurlu küme gözlenmektedir. Buna göre Teorem 3.1'i genişletmek mümkündür.

Teorem 3.2 *Birden fazla Katman 1 kullanıcısı varken, iki Katman 2 kullanıcılı senaryoda, çözüm olurlu kümenin köşesinde çıkar.*



Şekil 3.3. İki tane Katman 1 kullanıcısı varken, iki tane Katman 2 kullanıcıları senaryoda olası bir olurlu kümenin geometrik gösterimi.

İspat. Önsav 3.1'den yararlanarak bu problemin çözümünün olurlu kümenin sınırlarında çıkacağını direkt söyleyebiliriz. Önsav 3.2'ye göre maliyet işlevi onu kesen kısıt doğrusu üzerinde dışbükeyimsidir. Fakat bu durum tek bir doğru için değil, maliyet işlevini kesen tüm $y = ax_1 + bx_2$, $a, b, x_1, x_2, y \in \mathbb{R}_+$ formundaki doğrular için geçerlidir. Bu yüzden, bu doğrular üzerinde yapılacak bir enbüyütleme işleminin çözümü bu doğruların sınırlarında çıkacaktır. Bu durumda, çözüm, kısıt doğrularının, $P_1 = P_{azami}$ ve $P_2 = P_{azami}$ doğrularının kesiştiği olurlu kümenin köşelerinde çıkmış olur ve ispat tamamlanır. ■

İki tane Katman 2 kullanıcısı varken, iki problemin de çözümü analitik olarak yapılabilirken, çok kullanıcıya geçerken problemin karmaşıklığı artmaktadır. Bu sebepten, sonraki bölümde Problem 2.4'ü çözmek için bazı yaklaşımlar yapılacaktır.

3.2 Çok Sayıda Katman 2 Kullanıcılı Senaryo

Bu bölümde, bir önceki bölümde tartışılan Problem 3.1'e ek olarak daha fazla Katman 2 kullanıcısı olduğundaki durum incelenecektir. Problem 2.4, analitik olarak çö-

zülmesi zor bir problemdir. Bu sebepten sonraki kısımlarda, bu problemin iki özel durumu incelenmiştir. Bunlardan birisi tek kullanıcının yayın yaptığı TDMA çözümüdür. Diğerinde ise düşük-SNR yaklaşımı yapılarak çözüm bulunmuştur.

3.2.1 Kanal duyarlı TDMA çözümü

Bu kısımda, belli kanal koşulları altında, eniyi çözümün TDMA olacağı gösterilmiştir. Spektrum tahsis edilen tek kullanıcının, eniyi kanal katsayısına sahip olan kullanıcı olduğu gösterilmiştir. Bu da, literatürde sıkça karşılaşılan bir kavram olan, **çok-kullanıcı çeşitliliği**'ni ortaya çıkarır.

Problem 2.4'ün çözümünü etkileyen parametreler; direkt kanal vektörü \mathbf{h} , girişim kanalı vektörü \mathbf{g} ve Q girişim kısıtıdır. Problemin çözümünde, açık olan her kullanıcı toplam girişim kısıtı bütçesinden belli bir kısmını, yani $|g_i|^2 P_i^* = Q_i^*$ kadarını harcar. Bireysel girişimlerin toplamı, toplam girişim kısıtından küçüktür veya buna eşittir.

$$\sum_{i=1}^N Q_i^* \leq Q \quad (3.10)$$

Bu durum, aynı zamanda toplam girişim kısıtının eniyi şekilde paylaşıldığı/harcandığı durumu da göstermektedir.

Önsav 3.3 *Problem 2.4'ü çözen eniyi güç dağılımı vektörü \mathbf{P}^* , Problem 3.11'i de çözer.*

$$\begin{aligned} \text{enbüyült} \quad R(\mathbf{P}) &= \sum_{i=1}^N \log \left(1 + \frac{|h_i|^2 P_i}{\sum_{\{j \neq i\}}^N |h_j|^2 P_j + \sigma^2} \right) \\ \text{kısıtlar} \quad 0 &\leq P_i \leq P_{\text{azami}} \\ &|g_i|^2 P_i \leq Q_i^* \end{aligned} \quad (3.11)$$

İspat. Problem 3.11'in olurlu kümesi, Problem 2.4'ün olurlu kümesinin alt kümesidir. Bu durumda Problem 3.11'in çözümü, Problem 2.4'ün çözümüne eşit veya bundan daha düşük bir değere sahiptir. Ancak $\{Q_i^*\}_{i=1}^N$ vektörü, toplam girişim kısıtı bütçesinin N kullanıcı üzerinden eniyi paylaşımı olursa, Problem 3.11'in çözümü, Problem

2.4'ün çözümüne eşit çıkar. Bu durum, Problem 3.11'i çözen güç dağılım vektörünün Problem 2.4'ü de çözeceğini göstermektedir. ■

Gözlem 1: Şimdi Q 'nun $\sum_{i=1}^N Q_i \leq Q$ olacak şekilde herhangi bir paylaşımını $\{Q_i\}_{i=1}^N$ düşünelim ve şu eniyileme problemini ele alalım

$$\begin{aligned} \text{enbüyült} \quad R(\mathbf{P}) &= \sum_{i=1}^N \log \left(1 + \frac{|h_i|^2 P_i}{\sum_{j \neq i}^N |h_j|^2 P_j + \sigma^2} \right) \\ \text{kısıtlar} \quad 0 &\leq P_i \leq P_{\text{azami}} \\ &|g_i|^2 P_i \leq Q_i \end{aligned} \quad (3.12)$$

Problem 3.12'nin çözümü $\mathbf{P}^*(Q_1, \dots, Q_N)$ olsun. Eğer her kullanıcı için girişim kısıtını Q yaparsak elde edilecek toplam veri hızı, bu problemin çözümünden elde edilecek toplam veri hızından daha büyük veya ona eşit olur. Bu durum iki problemin olurlu kümelerini karşılaştırılarak kolayca anlaşılabilir.

$$R(\mathbf{P}^*(Q_1, \dots, Q_N)) \leq R(\mathbf{P}^*(Q, \dots, Q)) \quad (3.13)$$

Sağ taraftaki problemin olurlu kümesi, $Q_i \leq Q$ olduğu için, sol taraftaki problemin olurlu kümesinden daha büyüktür.

Ayrıca, Problem 3.12'nin çözümünü tüm Q_i ve $\sum_{i=1}^N Q_i \leq Q$ üzerinden supremumunu alırsak

$$\sup_{Q_1, \dots, Q_N, \sum_{i=1}^N Q_i \leq Q} R(\mathbf{P}^*(Q_1, \dots, Q_N)) \leq R(\mathbf{P}^*(Q, \dots, Q)) \quad (3.14)$$

elde edilir.

Önsav 3.4 *Denklem 3.14'teki soldaki terimin çözümü aynı zamanda Problem 2.4'ün çözümüdür.*

İspat. Soldaki terimin supremumsuz hali Problem 2.4'ün olurlu kümesinin içinde kalmaktadır. Ayrıca, supremumlu hali en az bir noktada $(\{Q_i^*\}_{i=1}^N)$ Problem 2.4'teki giri-

şim kısıtını ve bireysel güç kısıtlarını sağlamaktadır.

$$\sup_{Q_1, \dots, Q_N, \sum_{i=1}^N Q_i \leq Q} R(\mathbf{P}^*(Q_1, \dots, Q_N)) \quad (3.15)$$

Bu durumda üstteki problemin çözümü Problem 2.4'ün çözümüne eşittir. ■

Teorem 3.3 Eğer $\exists i \in \{1, \dots, N\}$ için

$$|h_i|^2 \cdot \min \left\{ \frac{Q}{|g_i|^2}, P_{azami} \right\} \geq (e - 1)\sigma^2 \quad (3.16)$$

ise, Problem 2.4'ün çözümü öyledir ki;

$$i^* = \arg \max_{i \in \{1, \dots, N\}} |h_i|^2 \cdot \min \left\{ \frac{Q}{|g_i|^2}, P_{azami} \right\} \quad (3.17)$$

eşitliğini sağlayan i^* kullanıcısı $P_{i^*} = \min \left\{ \frac{Q}{|g_{i^*}|^2}, P_{azami} \right\}$ ile yayın yaparken diğer kullanıcılar yayın yapmaz.

$$\mathbf{P}_i^* = \begin{cases} \min \left\{ \frac{Q}{|g_{i^*}|^2}, P_{azami} \right\} & , i = i^* \\ 0 & , i \neq i^* \end{cases} \quad (3.18)$$

İspat. Problem 3.12, kullanıcı başına girişim kısıtı Q 'ya çekilip ve

$P_{azami, i} = \min \left\{ \frac{Q}{|g_i|^2}, P_{azami} \right\}$ yazılarak tekrar düzenlenirse;

$$\text{enbüyüt} \quad R(\mathbf{P}) = \sum_{i=1}^N \log \left(1 + \frac{|h_i|^2 P_i}{\sum_{\{j \neq i\}} |h_j|^2 P_j + \sigma^2} \right) \quad (3.19)$$

$$\text{kısıtlar} \quad 0 \leq P_i \leq \min \left\{ \frac{Q}{|g_i|^2}, P_{azami} \right\}$$

elde edilir. Ayrıca $R(\mathbf{P}) = \sum_{i=1}^N \log \left(1 + \frac{|h_i|^2 P_i}{\sum_{\{j \neq i\}} |h_j|^2 P_j + \sigma^2} \right)$ şu şekilde yazılabilir,

$$R(\mathbf{P}) = \sum_{i=1}^N \log \left(1 + \frac{|h'_i|^2 P'_i}{\sum_{\{j \neq i\}} |h'_j|^2 P'_j + \sigma^2} \right). \quad (3.20)$$

Denklem 3.20'de $|h'_i|^2 = |h_i|^2 \min \left\{ \frac{Q}{|g_i|^2}, P_{azami} \right\}$ ve $P'_i = \frac{P_i}{\min \left\{ \frac{Q}{|g_i|^2}, P_{azami} \right\}}$ 'dir. Bu eşitliklerle birlikte Problem 3.19 şuna dönüşür;

$$\begin{aligned} \text{enbüyült} \quad R_{h'}(\mathbf{P}) &= \sum_{i=1}^N \log \left(1 + \frac{|h'_i|^2 P'_i}{\sum_{\{j \neq i\}}^N |h'_j|^2 P'_j + \sigma^2} \right) \\ \text{kısıtlar} \quad 0 &\leq P'_i \leq 1. \end{aligned} \quad (3.21)$$

Gözlem 2: Şimdi $\exists i \in \{1, \dots, N\}$ için $|h'_i|^2 = |h_i|^2 \min \left\{ \frac{Q}{|g_i|^2}, P_{azami} \right\} \geq (e - 1)\sigma^2$ eşitsizliğini sağlayan i değerleri olduğunu varsayalım. Buna göre

$$\begin{aligned} \text{enbüyült} \quad R_{h''}(\mathbf{P}) \\ \text{kısıtlar} \quad 0 &\leq P_i \leq 1 \end{aligned} \quad (3.22)$$

probleminin çözümü; yalnız $i^* = \arg \max_{i \in \{1, \dots, N\}} |h'_i|^2$ kullanıcısının 1 iletim gücüyle çalıştığı kanal - duyarlı TDMA'dir [16]. Gözlem 1'den yararlanarak

$$\sup_{Q_1, \dots, Q_N, \sum_{i=1}^N Q_i \leq Q} R(\mathbf{P}^*(Q_1, \dots, Q_N)) \leq R(\mathbf{P}^{**}(Q, \dots, Q)) \quad (3.23)$$

yazılabilir. Burada $P_{i^*}^{**} = \min \left\{ \frac{Q}{|g_{i^*}|^2}, P_{azami} \right\}$ ve $P_i^{**} = 0, \forall i \neq i^*$ 'dir. \mathbf{P}^{**} hem toplam girişim kısıtını hem de bireysel güç kısıtlarını sağladığından, Problem 2.4'ün olurlu kümesi içindedir. Bu sebeple

$$R(\mathbf{P}^{**}) \leq \sup_{Q_1, \dots, Q_N, \sum_{i=1}^N Q_i \leq Q} R(\mathbf{P}^*(Q_1, \dots, Q_N)) \quad (3.24)$$

yazılabilir. Yani \mathbf{P}^{**} , Problem 2.4'ün çözümüne eşittir. Böylece, ispat tamamlanmış olur. ■

TDMA güç kontrolü politikasının, ne kadar önemli bir çözüm olduğu Kısım 6.2'de yapılan detaylı benzetim çalışmalarına bakılarak anlaşılabilir.

3.2.2 Düşük-SNR durumu

Düşük-SNR durumunda, Problem 2.4'teki maliyet işlevi, paydadaki gürültü bileşenin artmasıyla $R(\mathbf{P}) = \sum_{i=1}^N \log \left(1 + \frac{|h_i|^2 P_i}{\sigma^2} \right)$ 'a indirgenebilir. Böylelikle eniyileme problemi

$$\begin{aligned} \text{enbüyült} \quad & \sum_{i=1}^N \log \left(1 + \frac{|h_i|^2 P_i}{\sigma^2} \right) \\ \text{kısıtlar} \quad & \sum_{i=1}^N |g_i|^2 P_i \leq Q \\ & 0 \leq P_i \leq P_{azami} \end{aligned} \quad (3.25)$$

şeklinde yazılabilir. Bilindiği gibi, $x \ll 1$ ise $\sum \log(1 + x) \simeq \log(\sum x)$ 'dir. Bu eşitlikten yararlanarak, Problem 3.25'teki maliyet işlevine de $\sum_{i=1}^N \log \left(1 + \frac{|h_i|^2 P_i}{\sigma^2} \right) \simeq \log \left(\sum_{i=1}^N \frac{|h_i|^2 P_i}{\sigma^2} \right)$ dönüşümü uygulanabilir. Logaritma sürekli artan bir işlev olduğu için logaritma işlevinin enbüyültmesi yerine logaritmanın içine yazılan işlevin enbüyültmesi yapılabilir. Bu problem doğrusal eniyileme problemidir, ve

$$\begin{aligned} \text{enbüyült} \quad & \sum_{i=1}^N \frac{|h_i|^2 P_i}{\sigma^2} \\ \text{kısıtlar} \quad & \sum_{i=1}^N |g_i|^2 P_i \leq Q \\ & 0 \leq P_i \leq P_{azami} \end{aligned} \quad (3.26)$$

şeklinde formüle edilir.

Teorem 3.4 *Tüm $h \in \mathbb{R}^n$ ve $g \in \mathbb{R}^n$ 'ler için, Problem 3.26'yı çözen eniyi güç denetimi politikası, bir istisnai kullanıcı dışında ikilidir. Kullanıcılar P_{azami} gücü ile iletim yaparlar ya da tamamen kapalıdır. İstisnai kullanıcı ise $0 \leq P_k^* \leq P_{azami}$ ondalık gücünde iletim yapar.*

İspat. Bu teoremin ispatı [23] no.'lu kaynağa bakılarak yapılabilir. Problem 3.26'nın analitik çözümü Lagrange formu yazılarak bulunabilir. Bu durumda, Lagrange denk-

lemine yazarsak

$$L(\mathbf{P}, \mu, \alpha, \lambda) = - \sum_{i=1}^N \frac{|h_i|^2 P_i}{\sigma^2} + \lambda \left(\sum_{i=1}^N |g_i|^2 P_i - Q \right) + \sum_{i=1}^N \mu_i (P_i - P_{azami}) - \sum_{i=1}^N \alpha_i P_i \quad (3.27)$$

elde edilir. Karush-Kuhn-Tucker durum denklemleri

$$\frac{\partial L}{\partial P_i} \Big|_{P_i=P_i^*} = \frac{|h_i|^2}{\sigma^2} - \lambda |g_i|^2 - \mu_i + \alpha_i = 0, \quad i \in \{1, \dots, N\} \quad (3.28)$$

$$\lambda \left(\sum_{i=1}^N |g_i|^2 P_i^* - Q \right) = 0, \quad i \in \{1, \dots, N\} \quad (3.29)$$

$$\mu_i (P_i^* - P_{azami}) = 0, \quad i \in \{1, \dots, N\} \quad (3.30)$$

$$\alpha_i P_i^* = 0, \quad i \in \{1, \dots, N\}. \quad (3.31)$$

şeklinde yazılır. Burada iki durum karşımıza çıkar. Eğer $\lambda = 0$ ise, Denklem 3.28'den $\frac{|h_i|^2}{\sigma^2} - \mu_i + \alpha_i = 0$ elde edilir. Burada açıkça, $|h_i|^2$ ve σ^2 değişkenleri pozitif değerler olduğu için $\frac{|h_i|^2}{\sigma^2} > 0$ her zaman doğru olduğu görülür. Böylece $\mu_i - \alpha_i > 0$ elde edilir ve $P_i^* = P_{azami}$ durumu $\forall i \in \{1, \dots, N\}$ için geçerlidir. Yani, eğer $\lambda = 0$ ise tüm kullanıcılar tam güçle çalışıyorlar demektir. İkinci durum ise $\lambda > 0$ olduğu durumdur. Bu durumda Denklem 3.29; $\sum_{i=1}^N |g_i|^2 P_i^* = Q$ halini alır. Şimdi $(0, P_{azami})$ aralığında bir güç olduğunu varsayalım (yani $0 < P_k^* < P_{azami}$). Böylece, Denklem 3.30 ve 3.31'den $\mu_i = \alpha_i = 0$ olduğu kolaylıkla görülür. Denklem 3.28'i tekrar yazarsak; $\frac{|h_k|^2}{\sigma^2} - \lambda |g_k|^2 = 0$. Ve buradan λ 'yı çekersek,

$$\lambda = \frac{|h_k|^2}{|g_k|^2} \cdot \frac{1}{\sigma^2} \quad (3.32)$$

olduğunu görürüz. Kanal katsayıları \mathbf{h} ve \mathbf{g} sürekli dağılımlara sahip olduklarından, $\lambda = \frac{|h_k|^2}{|g_k|^2} \cdot \frac{1}{\sigma^2}$ eşitliğini bir olasılığıyla sağlayan sadece bir tane (h_k, g_k) çifti vardır

[23]. Bu durumdan faydalanarak, kullanıcıları kümelerle tanımlayalım;

$$\begin{aligned} S_1 &= \{P_{azami} \text{ ile iletim yapanlar}\}, \\ S_2 &= \{0 < P_k^* < P_{azami} \text{ ile iletim yapan kullanıcı}\}, \\ S_3 &= \{\text{iletim yapmayanlar}\}, \end{aligned}$$

Denklem 3.32'yi, Denklem 3.28'de yerine koyarsak; $S = S_1 \cup S_2$ kümesi için $\frac{|h_i|^2}{\sigma^2} - \left(\frac{|h_k|^2}{|g_k|^2} \cdot \frac{1}{\sigma^2}\right) |g_i|^2 - \mu_i = 0$ elde ederiz ve buradan da $|g_i|^2$ 'yi çekersek;

$$|g_i|^2 = \frac{|g_k|^2}{|h_k|^2} \sigma^2 \left(\frac{|h_i|^2}{\sigma^2} - \mu_i \right) \quad (3.33)$$

bulunmuş olur. $|g_i|^2$ 'yi Denklem 3.29'da yerine yazacak olursak ve bazı düzenlemelerden sonra,

$$\sum_{i \in S_1} \frac{|h_i|^2 P_{azami}}{\sigma^2} + \frac{|h_k|^2 P_k^*}{\sigma^2} = \frac{|h_k|^2}{|g_k|^2 \sigma^2} Q + \sum_{i \in S_1} \mu_i P_{azami} \quad (3.34)$$

elde edilir. Denklem 3.33'teki μ_i 'lar S_1 kümesinden geldiği için pozitifdir. Bu denklemden μ_i 'yi çekersek,

$$\mu_i = \frac{\left(\frac{|g_k|^2}{|h_k|^2} |h_i|^2 \right) - |g_i|^2}{\frac{|g_k|^2}{|h_k|^2} \sigma^2} > 0 \quad (3.35)$$

elde ederiz ve bazı sadeleştirmelerden sonra

$$\frac{|h_i|^2}{|g_i|^2} > \frac{|h_k|^2}{|g_k|^2} \quad (3.36)$$

bulunur. Yani tam güçle çalışan kullanıcıların $\frac{|h_i|^2}{|g_i|^2}$ 'si ondalık güçle çalışan kullanıcının $\frac{|h_k|^2}{|g_k|^2}$ 'sından büyüktür. Ayrıca buradan Denklem 3.31'i ve $\alpha_i \geq 0$ gerçeğini kullanarak, $i \in S_3$ kümesinde olan kullanıcılar için $\frac{|h_i|^2}{|g_i|^2} \leq \frac{|h_k|^2}{|g_k|^2}$ eşitsizliğinin geçerli olduğunu gösterilebilir. ■

SISO modeli için geliştirilmiş bu çözümler belli koşullar için geçerli olduğundan tüm koşullar altındaki eniyi çözümler değildir. Sonraki bölümde kanal duyarlı TDMA çözümlerinin çok antenli sistemler için hem tek katmanlı hem de çok katmanlı yapılara genellemesi yapılacaktır.

4. SIMO MODELİ

Bu bölümde sistem modelinde daha önce verilen SIMO problem için analitik çözümler geliştirilmiştir. Bu çözümler yapılırken baz istasyonunda **doğrusal** alıcı olduğu varsayılmıştır. Bu doğrusal alıcının, öncelikle rastgele seçildiği farzedilmiş, sonra da eniyi doğrusal alıcı bulunmuştur.

4.1 SIMO Modelinde Girişim Kısıtı Olmadığında Eniyi Güç Kontrolü

Problem 2.5'i çözmeden önce $Q = \infty$ durumu için problemi çözelim. Bu durumda girişim kısıtı ortadan kalkmış olur. Problemi tekrar yazarsak,

$$\begin{aligned} \text{enbüyült} \quad R(\mathbf{P}, \mathbf{r}) &= \sum_{i=1}^N \log \left(1 + \frac{|\mathbf{r}^\top \mathbf{h}_i|^2 P_i}{\sigma^2 + \sum_{j=1, \{j \neq i\}}^N |\mathbf{r}^\top \mathbf{h}_j|^2 P_j} \right) \\ \text{kısıtlar} \quad \mathbf{0} &\preceq \mathbf{P} \preceq P_{azami} \mathbf{1} \end{aligned} \quad (4.1)$$

elde edilir.

Teorem 4.1 *Problem 4.1'in çözümü, \mathbf{P}^* ikili bir güç dağılım vektörüdür. Yani herhangi bir Katman 2 kullanıcısı, ya sıfır güç ya da en yüksek güç, P_{azami} 'de yayın yapar. Bunun yanında, P_{azami} yayın gücü ile çalışan kullanıcılar, $|\mathbf{r}^\top \mathbf{h}_i|^2$ değerleri daha yüksek olan Katman 2 kullanıcılarıdır.*

İspat. Bu teoremin ispatı direkt olarak, [16] no.'lu kaynakta ispatı verilen Teorem 1'den gelmektedir. Bu çalışmadaki skalar kanal değerlerini $|h_i|^2, i \in \{1, 2, \dots, N\}$, doğrusal çözücünün çıkışındaki $|\mathbf{r}^\top \mathbf{h}_i|^2, i \in \{1, 2, \dots, N\}$, değerleri ile değiştirerek ispat tamamlanır. ■

Teorem 4.1'den çıkarılacak en önemli sonuç, [16] no.'lu kaynakta verilen polinom-zamanlı algoritmanın bu problemi hızlı bir şekilde çözüyor olmasıdır. Teorem 4.1'de, alıcıda kullanılan doğrusal alıcıyla ilgili herhangi bir eniyileme yapılmamıştır. Bu çözüm, verilen herhangi bir doğrusal alıcıya yöneliktir. Şimdi, bu problemi ortaklaşa çözerek, hem eniyi güç tahsis vektörü \mathbf{P}^* hem de eniyi doğrusal alıcı \mathbf{r}^* 'yi bulalım ve Teorem 4.1'i buna göre genelleştirelim. Güç tahsis vektörleri ve doğrusal çözücüler

üzerinden olan eniyileme problemi,

$$\begin{aligned}
 \text{enbüyült} \quad R(\mathbf{P}, \mathbf{r}) &= \sum_{i=1}^N \log \left(1 + \frac{|\mathbf{r}^\top \mathbf{h}_i|^2 P_i}{\sigma^2 + \sum_{j=1, \{j \neq i\}}^N |\mathbf{r}^\top \mathbf{h}_j|^2 P_j} \right) \\
 \text{kısıtlar} \quad \mathbf{0} &\preceq \mathbf{P} \preceq P_{\text{azami}} \mathbf{1} \\
 &\sum_{i=1}^K |r_i|^2 = 1
 \end{aligned} \tag{4.2}$$

şeklinde yazılabilir.

Teorem 4.2 $i^* = \arg \max_{1 \leq i \leq N} \|\mathbf{h}_i\|^2$ olduğunu düşünelim. Eğer, $\|\mathbf{h}_{i^*}\|^2 \geq (e-1)\sigma^2$ ise, Problem 4.2'yi çözen birimsel doğrusal alıcı

$$\mathbf{r}^* = \left(\frac{\mathbf{h}_{i^*}}{\|\mathbf{h}_{i^*}\|} \right)^* \tag{4.3}$$

şeklinde ve güç tahsis vektörü

$$P_{i^*}^* = P_{\text{azami}} \text{ ve } P_j^* = 0, j \neq i^* \tag{4.4}$$

şeklinde verilir.

İspat. Bu teoremin ispatı, mevcut probleme üst sınır olacak bir problemin çözümü verilerek ve orijinal problemin bu üst sınırı bir noktada yakaladığı gösterilerek yapılacaktır. Özgün maliyet işlevini,

$$R(\mathbf{P}) = \sum_{i=1}^N \log \left(1 + \frac{\|\mathbf{h}_{i^*}\|^2 P_i}{\sigma^2 + \sum_{j=1, \{j \neq i\}}^N \|\mathbf{h}_{i^*}\|^2 P_j} \right) \tag{4.5}$$

ile değiştirelim. Değiştirilmiş eniyileme problemi

$$\begin{aligned}
 \text{enbüyült} \quad R(\mathbf{P}) \\
 \text{kısıtlar} \quad \mathbf{0} &\preceq \mathbf{P} \preceq P_{\text{azami}} \mathbf{1}
 \end{aligned} \tag{4.6}$$

şeklinde formüle edilir. Problem 4.6'nın çözümü $\hat{\mathbf{P}}$ olsun. Problem 4.2'nin olurlu her noktası (\mathbf{P}, \mathbf{r}) için, $R(\hat{\mathbf{P}}) \geq R(\mathbf{P}, \mathbf{r})$ olduğu görülebilir. Çünkü $\frac{|\mathbf{r}^\top \mathbf{h}_i|^2}{\|\mathbf{h}_{i^*}\|^2} \leq 1$ ve

$P_i \frac{|\mathbf{r}^\top \mathbf{h}_i|^2}{\|\mathbf{h}_{j^*}\|^2} \leq P_{azami}, i \in \{1, 2, \dots, N\}$. Dolayısıyla $P_i \frac{|\mathbf{r}^\top \mathbf{h}_i|^2}{\|\mathbf{h}_{j^*}\|^2}, i \in \{1, 2, \dots, N\}$, güç değerleri Problem 4.6 için de olurlu noktalardır. Diğer taraftan, Problem 4.6'nın çözümü sadece bir kullanıcının P_{azami} ile yayın yaptığı ve diğer kullanıcıların yayın yapmadığı güç tahsis vektörüdür. Bu durum $\|\mathbf{h}_{j^*}\|^2 \geq (e - 1) \sigma^2$ eşitsizliği sağlandığında TDMA'nın eniyi olmasından kaynaklanmaktadır [16]. Dolayısıyla,

$$R(\hat{\mathbf{P}}) = \log \left(1 + \frac{\|\mathbf{h}_{j^*}\|^2 P_{azami}}{\sigma^2} \right) \quad (4.7)$$

olarak yazılabilir.

Bu noktada, Problem 4.2'de, Denklem 4.3'teki doğrusal alıcıyı kullanırsak, i 'inci Katman 2 kullanıcısının kanal katsayısı $|(\mathbf{r}^*)^\top \mathbf{h}_i|^2, i \in \{1, 2, \dots, N\}$, olur. Bu durumda, \mathbf{r}^* doğrusal alıcısının çıkışındaki en yüksek kanal kazancı $\|\mathbf{h}_{j^*}\|^2$, ile j^* kullanıcıasına aittir. $\|\mathbf{h}_{j^*}\|^2$ değeri ise $(e - 1) \sigma^2$ değerinden büyük olduğundan, sadece j^* no.'lu Katman 2 kullanıcısı P_{azami} gücü ile yayın yaparken, diğer kullanıcılar yayın yapmazlar. Bu durumun sonucunda, $R(\mathbf{P}^*, \mathbf{r}^*) = R(\hat{\mathbf{P}})$ olduğu görülür. Yani, $R(\hat{\mathbf{P}})$ üst sınırına, Problem 4.2'de $(\mathbf{P}^*, \mathbf{r}^*)$ olurlu noktasında ulaşılabilmektedir. Bu da bize, bu olurlu noktanın Problem 4.2'nin eniyi çözümü olduğunun göstermektedir. ■

4.2 SIMO Modelinde Girişim Kısıtı Altında Eniyi Güç Kontrolü

Şu ana kadar ortaya attığımız teoremlerde, tek katmanlı bir yapıdan bahsettik. Bu, Problem 2.5'teki girişim kısıtı Q 'nun sonsuz (∞) olduğu durum olarak verilmişti. Şimdi Problem 2.5'i girişim kısıtı varken de çözelim. Teorem 4.3'te, herhangi bir doğrusal alıcı için, Problem 2.5'in çözümü verilmiştir.

Teorem 4.3 *Eğer bir tane $i \in \{1, 2, \dots, N\}$ kullanıcısı için*

$$|\mathbf{r}^\top \mathbf{h}_i|^2 \cdot \min \left\{ \frac{Q}{|g_i|^2}, P_{azami} \right\} \geq (e - 1) \sigma^2 \quad (4.8)$$

sağlanır ise Problem 2.5'in çözümü \mathbf{P}^ öyledir ki sadece,*

$$i^* = \arg \max_{1 \leq i \leq N} |\mathbf{r}^\top \mathbf{h}_i|^2 \cdot \min \left\{ \frac{Q}{|g_i|^2}, P_{azami} \right\} \quad (4.9)$$

kullanıcısı

$$P_{i^*}^* = \min \left\{ \frac{Q}{|g_{i^*}|^2}, P_{azami} \right\} \quad (4.10)$$

güç değeri ile yayın yaparken, diğer kullanıcılar yayın yapmaz.

İspat. Bu teoremin ispatı, 3. kısımdaki Teorem 3.1'de $|h_i|$ yerine, $|\mathbf{r}^\top \mathbf{h}_i|^2$ koyularak, direkt olarak yapılabilir. ■

Bu teorem, rastgele seçilen bir doğrusal alıcı için çözümü verir. Fakat, orijinal problemimiz, veri hızını enbüyük yapan doğrusal alıcıyı bulmayı amaçlamaktadır. Bu durumda, Problem 2.5'i tekrar yazarsak,

$$\begin{aligned} \text{enbüyüt} \quad R(\mathbf{P}, \mathbf{r}) &= \sum_{i=1}^N \log \left(1 + \frac{|\mathbf{r}^\top \mathbf{h}_i|^2 P_i}{\sigma^2 + \sum_{j=1, \{j \neq i\}}^N |\mathbf{r}^\top \mathbf{h}_j|^2 P_j} \right) \\ \text{kısıtlar} \quad \mathbf{0} &\leq \mathbf{P} \leq P_{azami} \mathbf{1} \\ &\sum_{i=1}^N |g_i|^2 P_i \leq Q \\ &\sum_{i=1}^K |r_i|^2 = 1 \end{aligned} \quad (4.11)$$

elde edilir.

Teorem 4.4 Eğer bir tane $i \in \{1, 2, \dots, N\}$ kullanıcısı için

$$\|\mathbf{h}_i\|^2 \cdot \min \left\{ \frac{Q}{|g_i|^2}, P_{azami} \right\} \geq (e - 1) \sigma^2 \quad (4.12)$$

sağlanır ise Problem 4.11'in çözümü, \mathbf{r}^* ve \mathbf{P}^* ,

$$i^* = \arg \max_{1 \leq i \leq N} \|\mathbf{h}_i\|^2 \cdot \min \left\{ \frac{Q}{|g_i|^2}, P_{azami} \right\} \quad (4.13)$$

$$\mathbf{r}^* = \left(\frac{\mathbf{h}_{i^*}}{\|\mathbf{h}_{i^*}\|} \right)^* \quad (4.14)$$

$$P_{i^*}^* = \min \left\{ \frac{Q}{|g_{i^*}|^2}, P_{azami} \right\} \text{ ve } P_j^* = 0, j \neq i^* \quad (4.15)$$

şeklinde verilir.

İspat. Bu teoremin ispatı için, Teorem 4.2'de $\|\mathbf{h}_{i^*}\|^2$ yerine $\|\mathbf{h}_{i^*}\|^2 \cdot \min \left\{ \frac{Q}{|g_{i^*}|^2}, P_{azami} \right\}$ yazacağız. Bundan sonraki adımımız yine Teorem 4.2'nin ispatındaki gibi bu probleme üst sınır olacak bir problem tanımlamak olacak. Buna göre;

$$\begin{aligned} \text{enbüyüt} \quad R(\mathbf{P}) &= \sum_{i=1}^N \log \left(1 + \frac{\|\mathbf{h}_{i^*}\|^2 P_i}{\sigma^2 + \sum_{j=1, \{j \neq i\}}^N \|\mathbf{h}_{i^*}\|^2 P_j} \right) \\ \text{kısıtlar} \quad \mathbf{0} &\preceq \mathbf{P} \preceq P_{azami} \mathbf{1} \\ &\sum_{i=1}^N |g_i|^2 P_i \leq Q \end{aligned} \quad (4.16)$$

problemini tanımlarsak, bu problemin eniyi çözüm noktasının orijinal problemimize üst sınır olacağını söyleyebiliriz. Çünkü $\frac{|\mathbf{r}^\top \mathbf{h}_i|^2}{\|\mathbf{h}_{i^*}\|^2} \leq 1$ ve $P_i \frac{|\mathbf{r}^\top \mathbf{h}_i|^2}{\|\mathbf{h}_{i^*}\|^2} \leq P_{azami}$, $i \in \{1, 2, \dots, N\}$. Dolayısıyla $P_i \frac{|\mathbf{r}^\top \mathbf{h}_i|^2}{\|\mathbf{h}_{i^*}\|^2}$, $i \in \{1, 2, \dots, N\}$, güç değerleri Problem 4.16 için de olurlu kümenin içindedir. Ayrıca Problem 4.16'nın çözümü sadece bir kullanıcının

$$\min \left\{ \frac{Q}{|g_{i^*}|^2}, P_{azami} \right\} \quad (4.17)$$

ile iletim yaptığı TDMA çözümüdür (Bkz. Teorem 3.1). Buna göre; çözüm

$$R(\mathbf{P}^{**}) = \log \left(1 + \frac{\|\mathbf{h}_{i^*}\|^2 \min \left\{ \frac{Q}{|g_{i^*}|^2}, P_{azami} \right\}}{\sigma^2} \right) \quad (4.18)$$

şeklinde yazılabilir. Burada \mathbf{P}^{**} , Problem 4.16 için, eniyi güç tahsis vektörüdür.

Bundan sonrası Teorem 4.2 ile özdeştir. Problem 4.11'de, Denklem 4.14'te verilen doğrusal alıcıyı kullanırsak, doğrusal alıcının çıkışındaki kanal katsayısı, i^* kullanıcısı için $\|\mathbf{h}_{i^*}\|^2$ olur. Bu durumda, Problem 4.11'in çözümü, $\|\mathbf{h}_{i^*}\|^2 \min \left\{ \frac{Q}{|g_{i^*}|^2}, P_{azami} \right\}$ değeri $(e - 1) \sigma^2$ değerinden büyük olduğu için sadece i^* no.'lu Katman 2 kullanıcısının $\min \left\{ \frac{Q}{|g_{i^*}|^2}, P_{azami} \right\}$ ile yayın yaptığı, diğer kullanıcıların yayın yapmadığı TDMA çözümü olur. Böylece, $R(\mathbf{P}^*, \mathbf{r}^*) = R(\mathbf{P}^{**})$ eşitliğinin $(\mathbf{P}^*, \mathbf{r}^*)$ noktaları için sağlandığı gösterilmiş olur. ■

5. BENZETİMDE KULLANILAN ALGORİTMALAR

5.1 DC Algoritması (DCA)

Genel olarak Problem 2.4'ü çözen algoritmalar, Ek B'de de bahsedildiği gibi birincil problemi ve ikincil problemi çözmek ve ikilik aralığını enküçültmek yönündedir. Çünkü bu iki problemin sonuçları birbirine eşittir (Teorik detaylar için bkz. Ek B). Ancak iki problemi aynı anda çözüp birbiriyle karşılaştırmanın işlem yükü oldukça yüksektir. Bunun yerine sadece birincil problemi çözen yinelemeli algoritmalar türetilmiştir. Bunların arasında; dallan-ve-sınırla (branch-and-bound), kesen düzlem (cutting plane), yarı-kesin programlama (Semidefinite Programming, SDP) algoritmaları en bilinenleridir [51], [52].

Problem 2.4'teki maliyet işlevini, $R(\mathbf{P}) = \sum_{i=1}^N \log \left(1 + \frac{|h_i|^2 P_i}{\sum_{\{j \neq i\}}^N |h_j|^2 P_j + \sigma^2} \right)$, düzenler ve

$$R(\mathbf{P}) = \sum_{i=1}^N \log \left(\sum_{i=1}^N |h_i|^2 P_i + \sigma^2 \right) - \sum_{i=1}^N \log \left(\sum_{\{j \neq i\}}^N |h_j|^2 P_j + \sigma^2 \right) \quad (5.1)$$

şeklinde yazarsak, problem;

$$\text{enbüyült} \quad R(\mathbf{P}) = h(\mathbf{P}) - g(\mathbf{P}) \quad (5.2a)$$

$$\text{kısıtlar} \quad \sum_{i=1}^N |g_i|^2 P_i \leq Q \quad (5.2b)$$

$$0 \leq P_i \leq P_{azami} \quad (5.2c)$$

şekilde formüle edilebilir. Logaritmanın içine yazılan doğrusal bir işlev içbükeyliği bozmaz ve içbükeylerin toplamı yine içbükey bir işlevdir. Dolayısıyla problem iki içbükey işlevin farkının $h(\mathbf{P}) - g(\mathbf{P})$ enbüyültülmesi olarak karşımıza çıkar.

Bu problemi çözmek için $g(\mathbf{P}) = \sum_{i=1}^N \log \left(\sum_{\{j \neq i\}}^N |h_j|^2 P_j + \sigma^2 \right)$ işlevinin birinci dereceden Taylor serisi açılır. Problem, dışbükey eniyileme problemi haline getirilmiş olur.

$$\begin{aligned}
\text{enbüyült} \quad & h(\mathbf{P}) - g(\mathbf{P}^{(\kappa)}) - \nabla g(\mathbf{P}^{(\kappa)}) \cdot (\mathbf{P} - \mathbf{P}^{(\kappa)}) & (5.3) \\
\text{kısıtlar} \quad & \sum_{i=1}^N |g_i|^2 P_i \leq Q \\
& 0 \leq P_i \leq P_{azami}
\end{aligned}$$

Bu problem herhangi bir dışbükey program çözen bir yazılım paketiyle (örn. CVX) çözülebilir [25]. Buradan yapılabilecek önemli gözlemler:

- $g(\mathbf{P})$ işlevi \mathbf{P} 'deki değişimlere az duyarlıdır, bu yüzden $g(\mathbf{P})$ 'nin birinci dereceden Taylor seri açılımı \mathbf{P} 'nin geniş komşuluklarında iyi bir yaklaşımdır [25]. Ayrıca bu da maliyet işlevinin iyi bir içbükey yaklaşımı olduğunu göstermektedir. Başka bir deyişle, dışbükey-olmayan bir problemin iyi bir dışbükey probleme yaklaşımının yapıldığının göstergesidir. Aslında Denklem 5.2a'nın düşük (gizli) dışbükey-olmayanlık derecesi vardır [53]. Bu da etkili bir eniyileme algoritmasının, Denklem 5.2a'nın genel eniyi çözümününün yaklaşımını vereceği anlamına gelir.
- $g(\mathbf{P})$ işlevi içbükey bir işlev olduğundan, $\nabla g(\mathbf{P}^{(\kappa)})$ onun süper-gradyanıdır [53]. Böylece,

$$g(\mathbf{P}) \leq g(\mathbf{P}^{(\kappa)}) + \nabla g(\mathbf{P}^{(\kappa)}) \cdot (\mathbf{P} - \mathbf{P}^{(\kappa)}) \quad (5.4)$$

yazılır. Bu özellik Denklem 5.2a'nın Problem 5.3'teki dışbükey maliyet işlevine iyi bir alt sınır yaklaşımı olduğunu gösterir. $\mathbf{P}^{(\kappa)}$, Problem 5.3 için olurlu nokta olduğu sürece, $h(\mathbf{P}^{(\kappa+1)}) - g(\mathbf{P}^{(\kappa+1)}) \geq h(\mathbf{P}^{(\kappa+1)}) - g(\mathbf{P}^{(\kappa)}) - \nabla g(\mathbf{P}^{(\kappa)}) \cdot (\mathbf{P}^{(\kappa+1)} - \mathbf{P}^{(\kappa)}) \geq h(\mathbf{P}^{(\kappa)}) - g(\mathbf{P}^{(\kappa)})$ eşitsizliği her zaman geçerlidir. Yani, bir sonraki çözüm noktası $\mathbf{P}^{(\kappa+1)}$ her zaman bir önceki çözüm noktası $\mathbf{P}^{(\kappa)}$ 'dan daha iyi bir noktadır.

Buradan algoritmanın bitiş ölçütü belirlenebilir, çünkü algoritma belli bir ϵ değerine yakınsayacaktır. DCA Çizelge 5.1'de verilmiştir [25], [26].

Bu algoritmada başlangıç noktasını iyi seçmek hayli önemlidir. Başlangıç noktasının $\mathbf{P}^{(0)} = \mathbf{1}P_{azami}$ seçildiğinde daha hızlı yakınsadığı gözlemlenmiştir. Genel olarak

Çizelge 5.1. Algoritma 1 - DC algoritması?

Başlat: $\kappa = 0$, $\mathbf{P}^{(0)}$ seç ve $R(\mathbf{P}^{(0)})$ 'yi hesapla;

κ 'inci yineleme:

Problem 5.3'ü bir dışbükey paket yazılımıyla çöz ve \mathbf{P}^* 'i bul.

$\kappa = \kappa + 1$.

$\mathbf{P}^{(\kappa)} = \mathbf{P}^*$ ve $R(\mathbf{P}^{(\kappa)})$ 'yi hesapla.

Dur: $|R(\mathbf{P}^{(\kappa)}) - R(\mathbf{P}^{(\kappa-1)})| \leq \epsilon$ ise dur.

Problem 5.3'ün karmaşıklığı $O(N^3)$ ile verilir [25]. Burada N kullanıcı sayısını vermektedir.

Bu ve buna benzer algoritmalar, özellikle kaynak tahsisi ve güç kontrolü problemlerinde sıkça kullanılmaktadır. Toplam veri hızı enbüyütmesi, enbüyük-enküçük problemlerinde ve benzeri senaryolarda DCA'nın kullanıldığını literatürde görmek mümkündür [25], [26].

5.2 Önerilen algoritma

Problem 2.4'teki olurlu küme bir politop oluşturmaktadır. Girişim kısıtının olmadığı bir senaryoda problemin çözümünün köşelerden birinde çıkacağı bellidir [16]. Bu bilginin ışığında, önerilen algoritma temel olarak köşe tarama algoritması olarak düşünülebilir. Köşeleri tararken de sıralama algoritması kullanılmaktadır.

$$|h_i|^2 P_i = |h_i|^2 \cdot \min \left\{ P_{azami}, \Delta_k / |g_i|^2 \right\} \quad (5.5)$$

Burada $\Delta_k = Q - |g_i|^2 P_i$ 'dir. Denklem 5.5'in sıralanmasıyla ve elemanların en büyüğünün seçilmesiyle algoritmanın ilk adımı başlar. Bu işlem TDMA çözümünden esinlenilmiştir. Hatırlanacağı üzere TDMA çözümünde $|h_i|^2 \cdot \min \left\{ \frac{Q}{|g_i|^2}, P_{azami} \right\} \geq (e-1)\sigma^2$ eşitsizliğini sağlayan i kullanıcısı, $\min \left\{ \frac{Q}{|g_i|^2}, P_{azami} \right\}$ yayın gücüyle iletim yapmaktadır. Dolayısıyla ilk adımda $\Delta_0 = Q$ alınmalıdır. Sonraki adımlar yinelemeli olarak devam eder. Algoritma $\Delta_k = 0$ oluncaya kadar ya da artık kaynak tahsis edecek kullanıcı kalmayıncaya kadar devam eder. Algoritma Çizelge 5.2'de özetlenmiştir.

Çizelge 5.2. Algoritma 2 - Önerilen algoritma

Başlat: $\mathbf{P}^*(\mathbf{h}, \mathbf{g}) = 0$, $S = \{i : i \in P_i(\mathbf{h}, \mathbf{g}) \neq 0\}$, $\Delta_1 = Q$, $k = 1$

k'inci yineleme: $P_{azami,i} = \min \{P_{azami, \Delta_k / |g_i|^2}\}$, $i \in N - S$,

$i_{(|S|+1)} = \arg \max |h_i|^2 P_{azami,i}$,

$P_{i_{(|S|+1)}}^*(\mathbf{h}, \mathbf{g}) = P_{azami, i_{(|S|+1)}}$.

$R_k(\mathbf{P}^*)$ 'yi hesapla.

$\Delta_k = Q - \sum_{j=1}^{|S|+1} |g_{i_{(j)}}|^2 P_{i_{(j)}}^*$ 'yi hesapla.

$k = k + 1$

Dur: eğer $R_k(\mathbf{P}^*) \leq R_{k-1}(\mathbf{P}^*)$ veya $\Delta_k = 0$ ise dur.

Benzetimler MATLAB'ta yapıldığından ve MATLAB'ın sıralama algoritması hızlı sıralama (quick sort) olduğundan bunun hesaplama karmaşıklığı $O(N \log N)$ olarak belirlenir. Ancak sıralama algoritması en fazla N kere dönebileceğinden toplam algoritmanın karmaşıklığı en kötü durumda $O(N^2 \log N)$ olarak verilir.

5.2.1 Değiştirilmiş Doğrusal-olmayan Programlama (DDP)

Toplam veri hızı işlevi Schur-dışbükeydir [16]. Bu özellik işlevin uç noktalarına doğru artmakta olduğunun göstergesidir. Bundan faydalanarak, önerilen algoritmanın çıktı noktasını bir doğrusal-olmayan programlama yazılımında başlangıç noktası olarak belirlersek, var olan çözümden daha iyi bir çözüm elde edebiliriz. Bu algoritma Çizelge 5.3'te özetlenmiştir.

Çizelge 5.3. Algoritma 3 - DDP algoritması

1. Önerilen algoritmayı çalıştır. $\mathbf{P}^{(0)} = \mathbf{P}^*$,

2. Çalışılan problemi doğrusal-olmayan programlama yazılımıyla çöz.

6. BENZETİM BULGULARI

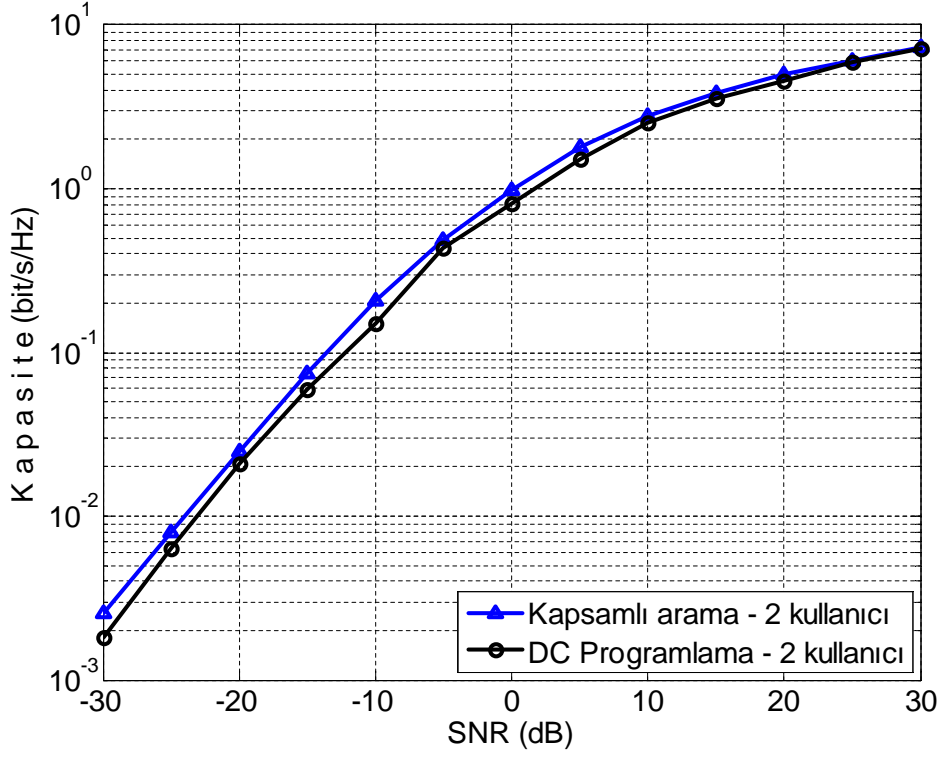
Bu bölümde, DCA, SISO modeline uygulanmış ve kapsamlı arama ile karşılaştırılmıştır. TDMA çözümünün verimliliği ve önemine ilişkin uygulamalar yapılmıştır. Sonrasında, önerilen algoritmanın, DCA, DDP ve kapsamlı aramayla kıyaslaması yapılmıştır. Bölümün sonunda ise SISO ve SIMO modeli için bu algoritmayla uygulamalar yapılmıştır.

6.1 Kapsamlı Arama ile DCA'nın Karşılaştırılması

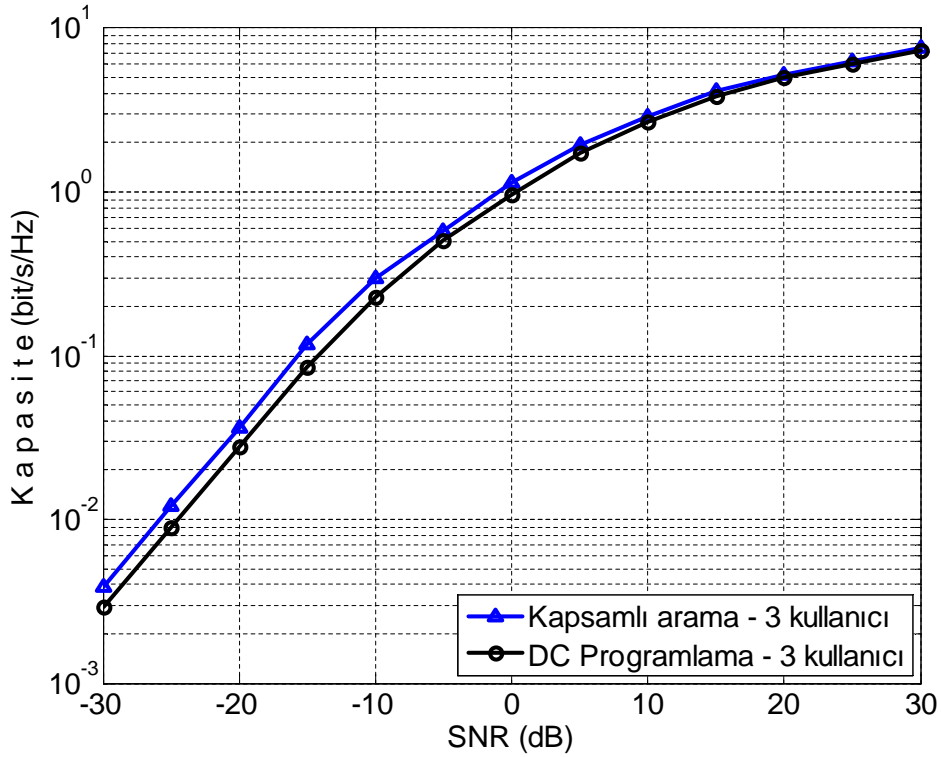
Bu çalışmada kapsamlı arama, olası her güç vektörünü 0.01 çözünürlükle bulup, bu noktadaki elde edilen enbüyük toplam veri hızını hesaplayarak yapılmıştır. Kapsamlı arama ve diğer tüm benzetimlerde, 100 benzetim sayısından ortalama alınarak sonuçlar elde edilmiştir. Kapsamlı arama sadece iki ve üç tane Katman 2 kullanıcı senaryolarında gerçekleştirilmiştir. Daha yüksek kullanıcı sayıları için kapsamlı aramanın hesaplama karmaşıklığı artmaktadır ve bu yüzden yüksek kullanıcı sayıları için kapsamlı arama yapılamamıştır. DCA'nın içindeki dışbükey paket yazılımı CVX olarak belirlenmiştir. Toplam girişim kısıtı, Q ve kullanıcıların enbüyük iletim gücü, P_{azami} , $1 W$ olarak alınmıştır. Kanal katsayıları h ortalama değeri 1 olan, girişim kanalı katsayıları g ise ortalama değeri 0.3 olan Rayleigh dağılımına sahiptir.

Şekil 6.1 ve Şekil 6.2'de, iki ve üç tane Katman 2 kullanıcı sistemde toplam veri hızını enbüyükten güç kontrolüne karşılık gelen veri hızları, SNR değişimine göre çizdirilmiştir. Bu şekillerde DCA'nın eniyiye çok yakın ve iyi bir yaklaşım olduğu görülmektedir. Bunun yanında daha önce bahsedildiği üzere iyi bir alt sınır olduğu gözlemlenmektedir. Bu sebeple, önerilen algoritma ile DCA daha yüksek kullanıcı sayıları için karşılaştırılabilir. İki şekil için de yüksek-SNR kısımlarında iki grafiğin birbirine yaklaştığı, düşük-SNR kısımlarında ise uzaklaştığı söylenebilir.

Yüksek-SNR'daki yakınsamayı daha iyi anlamamız için TDMA durumunun ne sıklıkla karşımıza çıktığını görmemiz önemlidir. Dolayısıyla, önerilen algoritmayı vermeden önce, algoritmanın çıkış noktası olan TDMA çözümünün ortaya ne kadar olasılıkla çıktığını gözlemleyeceğiz.



Şekil 6.1. DC programlamanın, iki tane Katman 2 kullanıcısı için kapsamlı arama ile karşılaştırılması



Şekil 6.2. DC programlamanın, üç tane Katman 2 kullanıcısı için kapsamlı arama ile karşılaştırılması

6.2 TDMA Güç Kontrol Politikasının Olasılığı

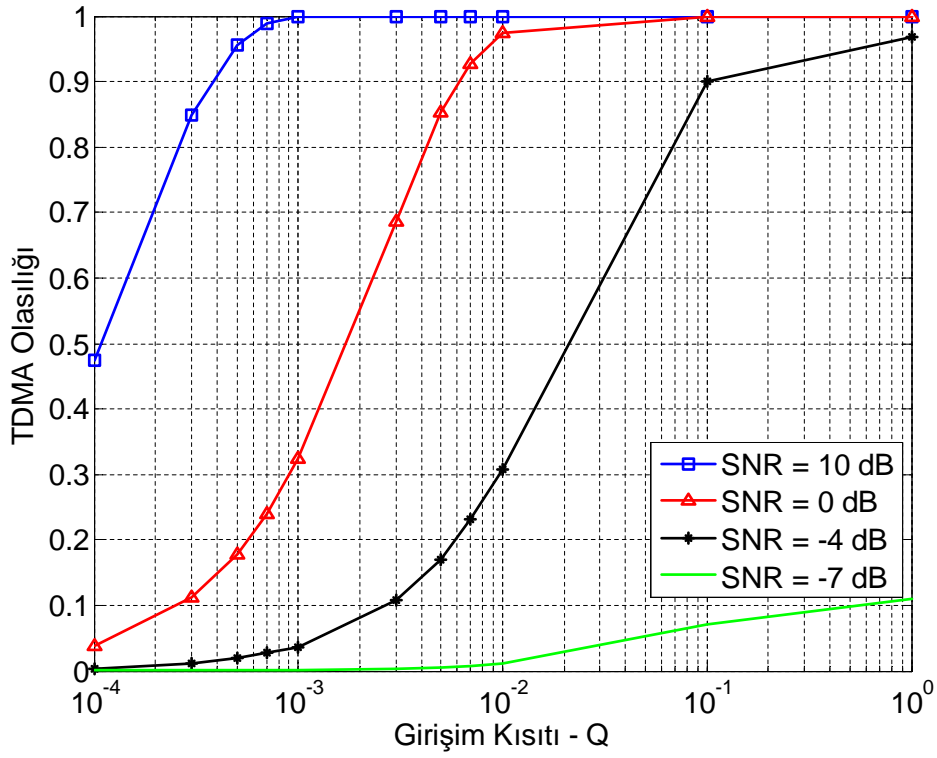
Kısım 3.2.1’de bahsedilen TDMA çözümünün ortaya çıkması, Teorem 3.3’te verilen $|h_i|^2 \cdot \min \{P_{azami}, Q/|g_i|^2\} \geq (e - 1)\sigma^2$ eşitsizliğine bağlıdır. Sistemde bu eşitsizliği sağlayan herhangi bir kullanıcının olması, sadece o kullanıcının yayın yapacağı anlamına gelmektedir. Acaba TDMA durumu ile ne kadar sıklıkla karşılaşılacaktır? Bu sorunun cevabını bulmamız sistemin işlem yükünü azalması açısından çok önemlidir. Çünkü eşitsizlik sağlandığında sadece bir kullanıcı yayın yapacaktır.

Sonuçlar elde edilirken, kanal katsayıları **h** ve **g**, Rayleigh dağılımlı alınmıştır ve ortalama değerleri -diğer benzetimlerle de örtüşecek şekilde- sırasıyla 1 ve 0.3’tür. Ayrıca, Şekil 6.3 ve Şekil 6.4’te görülen “TDMA Olasılığı”, 100000 benzetimde kaç kere TDMA politikasının eniyi olduğunu bularak, benzetim sayısı ile oranlanmış değerdir. Şekil 6.3’de girişim kısıtının, 100 tane Katman 2 kullanıcısının olduğu bir sistemde TDMA olasılığını nasıl etkilediği görülmektedir. Girişim kısıtının, sıkılaşması TDMA olasılığını düşürdüğü net bir şekilde gözükmektedir. Ancak, 10 dB SNR eğrisinden anlaşılacağı üzere, girişim kısıtı %1 veya %0.1 sıkılaşsa bile, bu SNR değerlerinde TDMA olasılığı %100’dür. Ayrıca girişim kısıtının yine bu değerinde, 0 dB SNR değerinde %97,47 çıkmaktadır. Bu da, TDMA çözümünün uygulamadaki yerinin ne kadar önemli olduğunu göstermektedir.

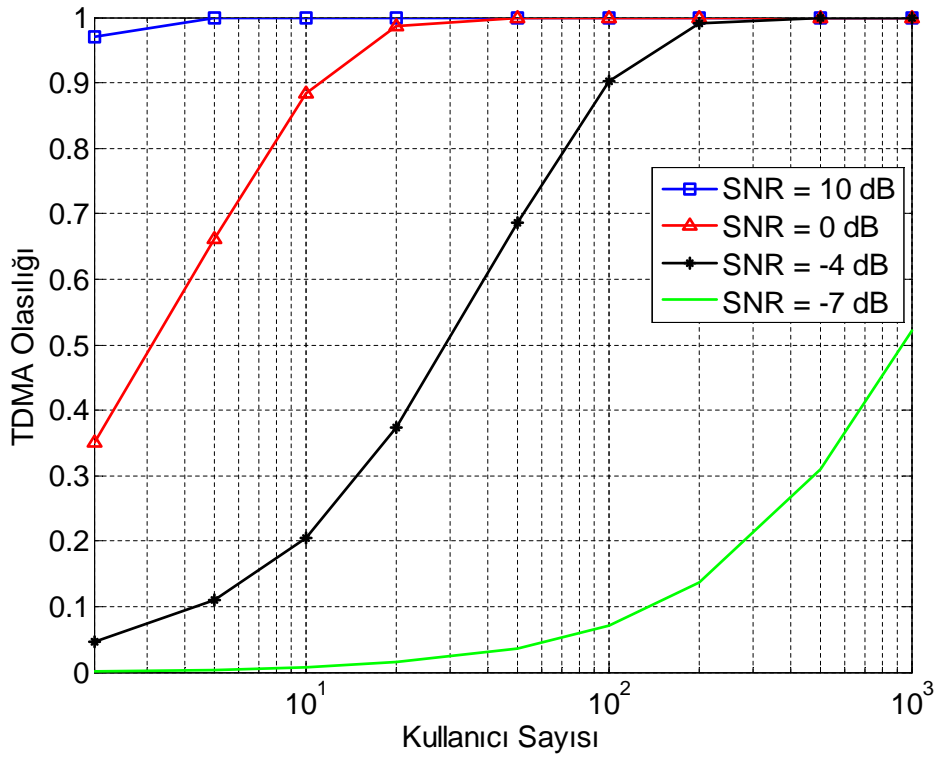
TDMA güç kontrolü politikası yüksek SNR değerlerinde çok sık karşımıza çıkarırken, Katman 2’deki kullanıcı sayısının az veya çok olmasına göre de bu olasılık değişmektedir. Şekil 6.4’te bakınca, sistemde çok-kullanıcı çeşitliliğinin olduğunu rahatlıkla söyleyebiliriz. Görüldüğü üzere SNR değerleri düşmesine rağmen, kullanıcı sayısının artması TDMA politikasının uygulanma olasılığını arttırmaktadır. Yani, kullanıcı sayısı arttıkça, en iyi kanalı bulma ihtimali artmaktadır.

6.3 Kapsamlı Arama ile Önerilen Algoritmanın Karşılaştırması

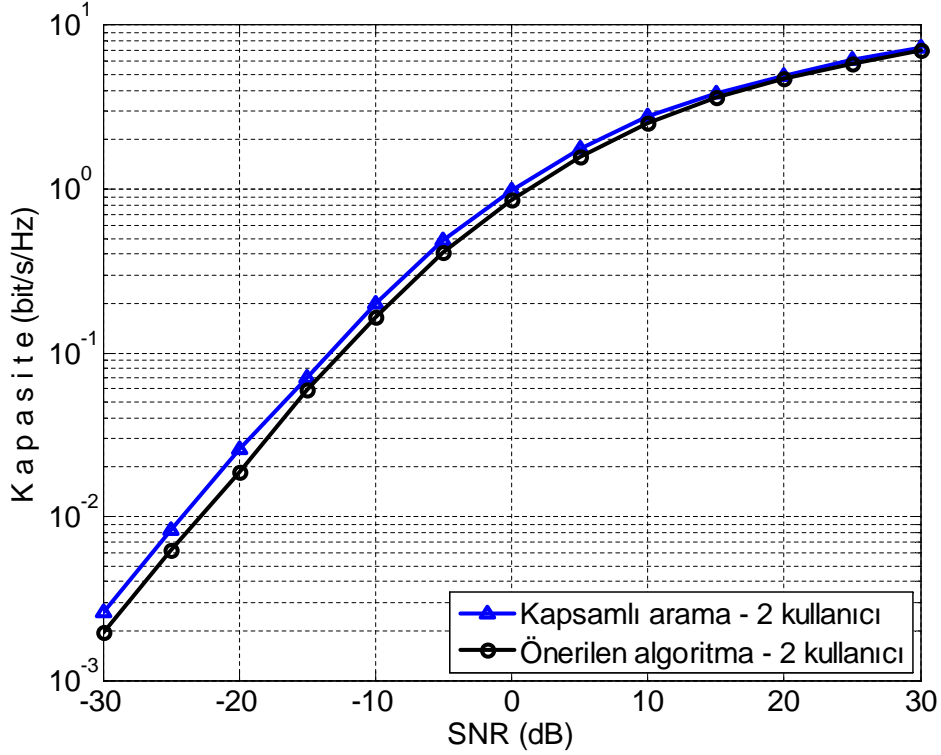
Bu bölümde Kısım 5.2’de verilen önerilen algoritmanın güvenilirliğini bulmak için kapsamlı arama ile karşılaştırılması yapılmıştır. Kapsamlı arama için Kısım 6.1’de bulunan sonuçlar kullanılmıştır. Yine aynı sebeplerden, kapsamlı arama sadece iki ve üç tane Katman 2 kullanıcıları senaryolar için yapılmıştır. Kapsamlı arama ve diğer tüm benzetimlerde, 100 benzetim sayısından ortalama alınarak sonuçlar elde edilmiştir. Toplam girişim kısıtı, Q ve kullanıcıların enbüyük iletim gücü, P_{azami} , 1 W



Şekil 6.3. Girişim kısıtının, 100 tane Katman 2 kullanıcıli senaryoda ve farklı SNR değerlerinde, TDMA olasılığına etkisi



Şekil 6.4. Kullanıcı sayısının, girişim kısıtı, Q, 0.1 iken ve farklı SNR değerlerinde, TDMA olasılığına etkisi

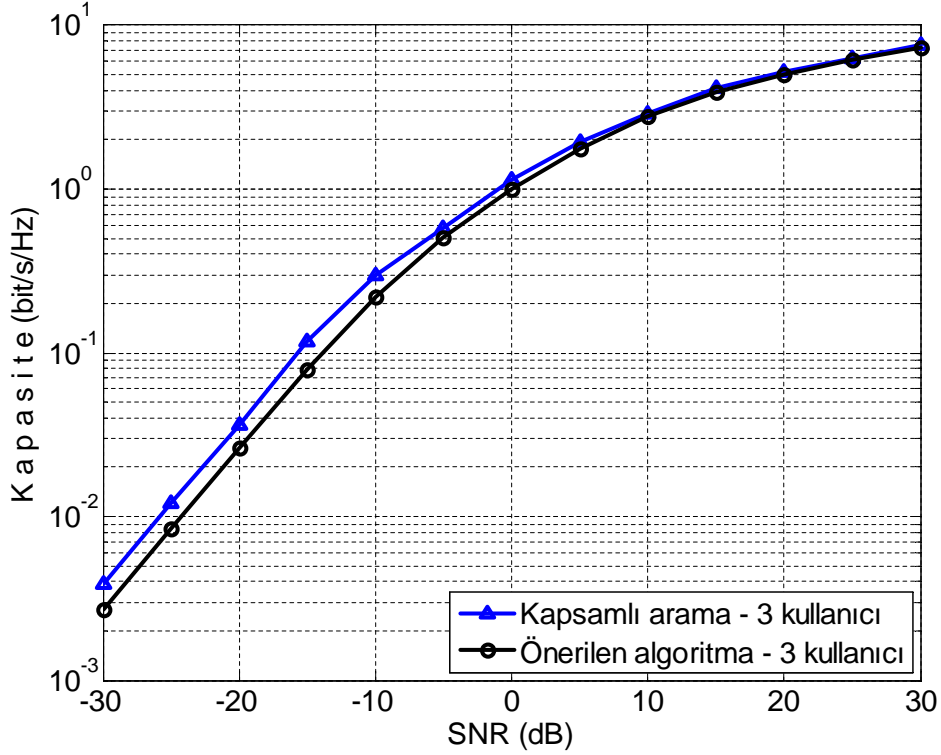


Şekil 6.5. Kapsamlı arama ve önerilen algoritmanın iki tane Katman 2 kullanıcısı için karşılaştırılması

olarak alınmıştır. Kanal katsayıları h ortalama değeri 1 olan, girişim kanalı katsayıları g ise ortalama değeri 0.3 olan Rayleigh dağılımına sahiptir.

Şekil 6.5 ve Şekil 6.6'da önerilen algoritma ve kapsamlı arama iki ve üç tane Katman 2 kullanıcı senaryolar için karşılaştırılmıştır. Görüldüğü üzere, algoritmanın performansı kullanıcı sayısı arttıkça ve yüksek-SNR değerlerine ulaştıkça yükselmektedir. Bu durumu yüksek-SNR değerlerinde TDMA güç kontrolü politikasının ortaya çıkma olasılığının artmasıyla açıklayabiliriz. Ayrıca üç tane Katman 2 kullanıcı senaryoda 10 dB civarında, iki tane Katman 2 kullanıcıli sisteme göre daha iyi bir sonuç elde edilmiştir. Bu da yüksek kullanıcı sayısında önerilen algoritmanın en iyi sonuca daha çok yaklaşacağını göstermektedir.

Kapsamlı aramanın 4 ve daha fazla Katman 2 kullanıcısı için karmaşıklığı arttığından dolayı, daha çok kullanıcıyla kapsamlı arama yapılamamıştır. Bunun yerine literatürde yer edinmiş ve Kısım 6.1'de belirtildiği üzere en iyi sonuca iyi bir alt sınır olan DCA ile daha yüksek kullanıcı senaryolar için sonuçlar bulunmuştur ve önerilen algoritma bu sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

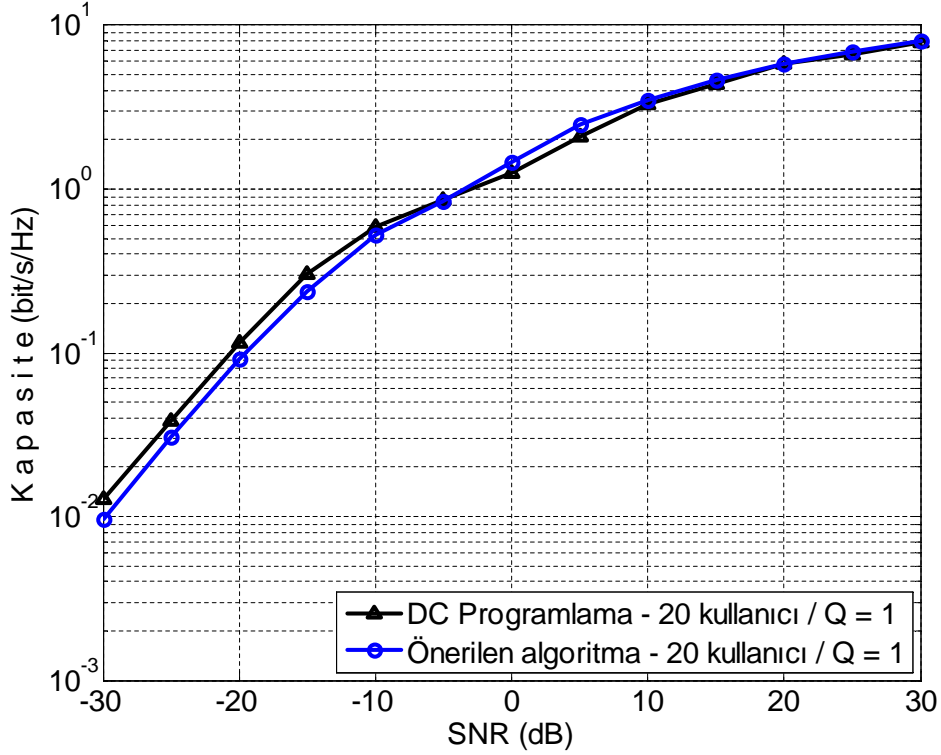


Şekil 6.6. Kapsamlı arama ve önerilen algoritmanın üç tane Katman 2 kullanıcısı için karşılaştırılması

6.4 Önerilen Algoritma ile DCA'nın Karşılaştırılması

Bu bölümde, 20 tane Katman 2 kullanıcıları senaryodaki toplam veri hızını enbüyüten güç kontrolü için önerilen algoritma ile DCA karşılaştırılmıştır. Öncelikle, Şekil 6.7'de sonuçların birbirine çok yakın çıktığı gözlemlenebilir. Yüksek-SNR bölgesinden SNR değerinin -5 dB'ye düştüğü noktaya kadar önerilen algoritma DCA'dan daha iyidir. -5 dB'den düşük SNR'larda DCA'nın performansı artmaktadır ve algoritma alt sınırdan daha kötü bir değer vermektedir. Fakat teorik olarak -5dB'den küçük SNR değerleri araştırılabilir olsa da pratikte bu değerlerde iletişim yapmak mümkün değildir ve önerilen algoritma iletişimin olabileceği SNR değerlerinde alt-sınırın üstüne çıkmaktadır. Ancak bu değerlere yüksek-SNR bölgesinde eniyi denebiliyorken, daha düşük SNR bölgesinde bu değerlerin eniyi-altı olduğunu rahatlıkla söyleyebiliriz.

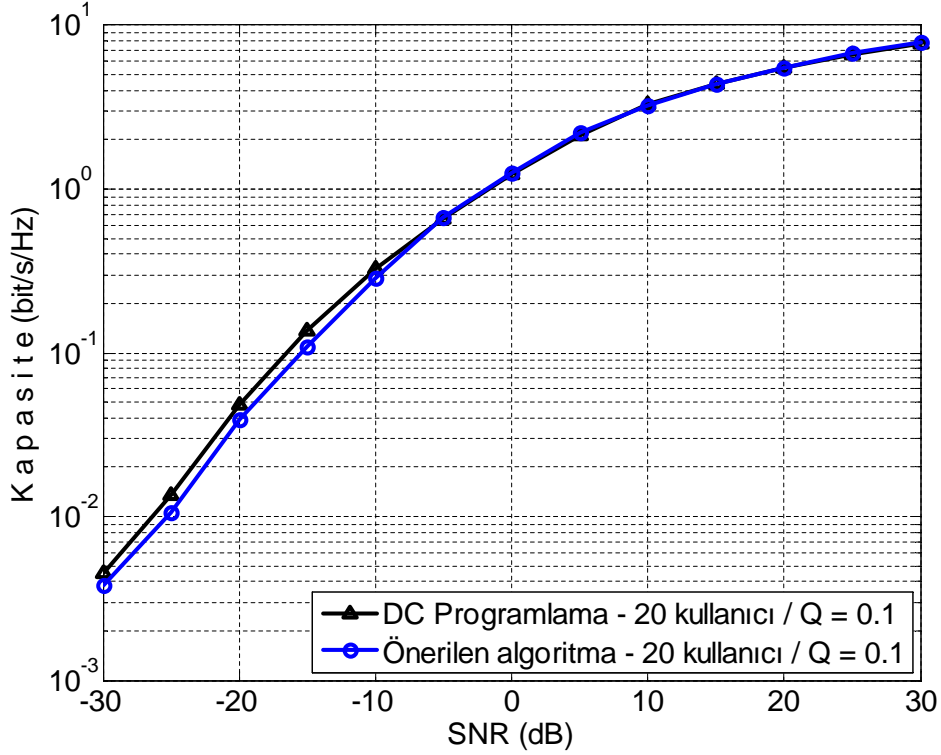
Şekil 6.7'de, kullanıcıların enbüyük iletim gücü, P_{azami} ve toplam girişim kısıtı, Q , 1 W'tır. İki kanal katsayısı h ve g , Rayleigh dağılımlıdır ve sırasıyla 1 ve 0.3 ortalama değerlerine sahiptirler. Şekil 6.8'deki senaryoda ilkinden farklı olarak Q değeri 0.1 W'a çekilip, daha sıkı bir girişim kısıtı yaratılmıştır. Bu durum özellikle düşük SNR



Şekil 6.7. 20 kullanıcıli sistemde DC programlama ve önerilen algoritmanın karşılaştırılması, $Q = 1$

kısımında sistemi olumsuz etkilemiştir ve toplam veri hızı düşmüştür. Bu kısımda, önerilen algoritma ve DC programlama çözümleri birbirine yaklaşmış ancak yine DC programlama daha iyi sonuç vermiştir.

Bunların yanında, önerilen algoritma, DCA'ya nazaran sonucu çok hızlı bulmaktadır. Kullanıcı sayısı arttıkça, L kadar yineleme için, $O(LN^3)$ karmaşıklığıyla çalışan DCA daha da yavaşlamaktadır. Ayrıca önerilen algoritmadan çıkan noktanın DCA'da başlangıç noktası olarak seçilmesiyle DCA'nın hızının iki kat arttığı gözlemlenmiştir. Örneğin, 20 tane Katman 2 kullanıcıli sistemde, toplam girişim kısıtı, $Q, 1 W$ iken başlangıç noktası $\mathbf{P}^{(0)} = P_{azami} \mathbf{1}$ seçildiğinde, DCA 40 dk.'ya yakın sürede sonuç verirken, önerilen algoritmanın çıktığı noktasını başlangıç noktası olarak verdiğimizde bu süre 20 dk. civarına düşmüştür. Bu da DCA'nın problem eniyi noktaya ne kadar yakınsa o kadar hızlı çözüm ürettiğinin doğal sonucudur. Buradaki önemli gözlemimiz ise aslında önerilen algoritmanın eniyi çözüme ne kadar yakın olduğudur.



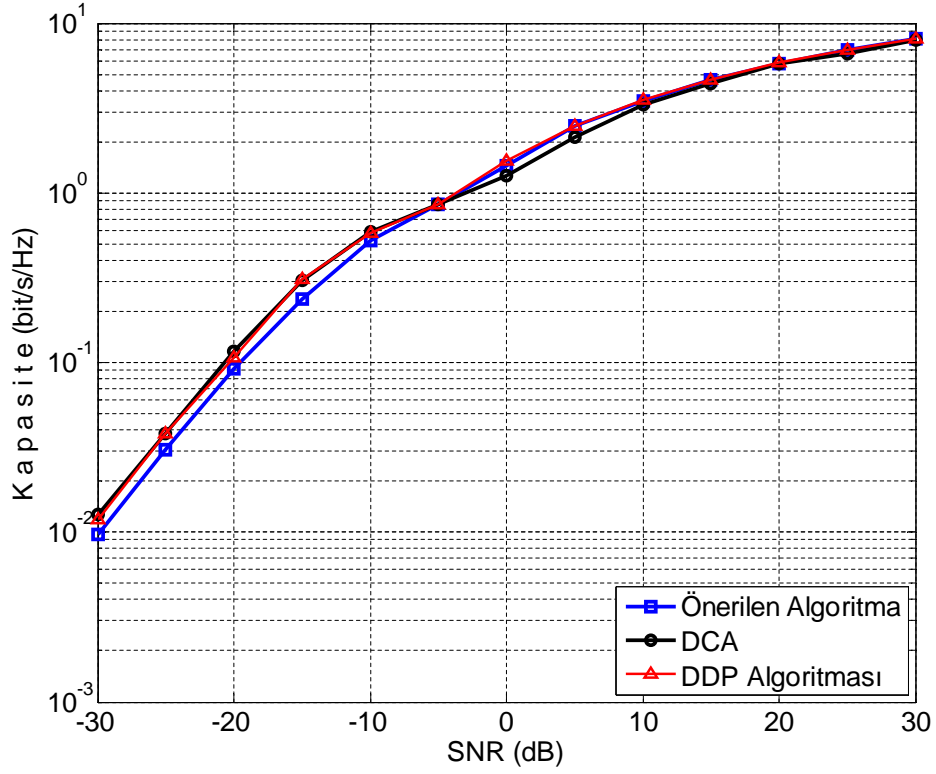
Şekil 6.8. 20 tane Katman 2 kullanıcıli sistemde DC programlama ve önerilen algoritmanın karşılaştırılması, $Q = 0.1$

6.5 Değişirilmiş Doğrusal-olmayan Programlama ve Algoritmaların Karşılaştırılması

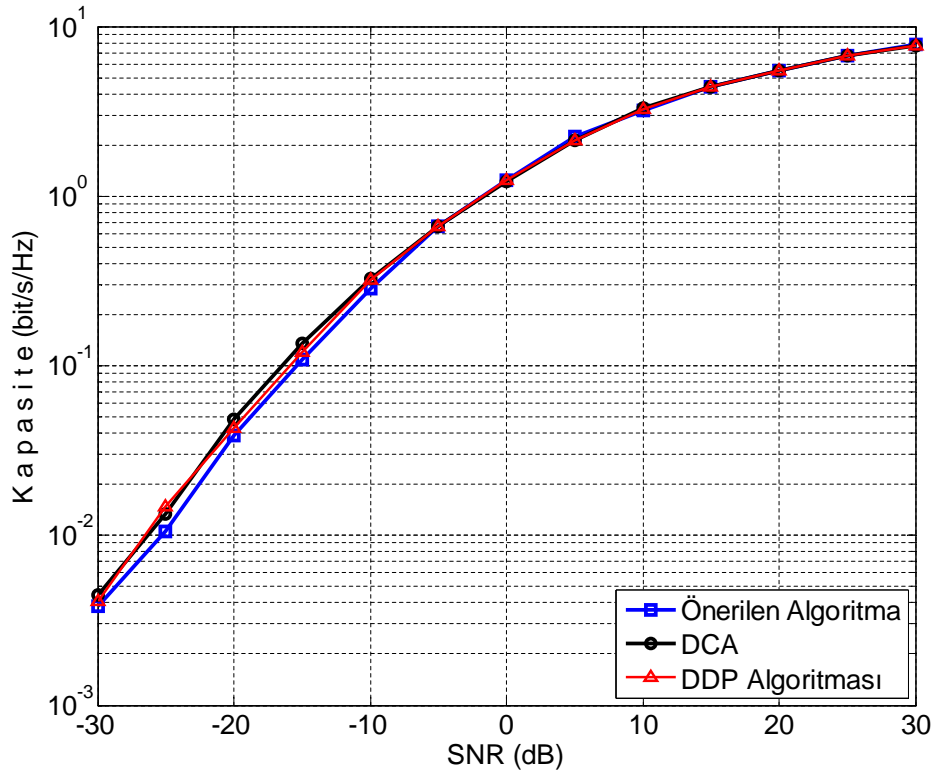
DDP algoritmasından çıkan sonuçlar hayli ilgi çekicidir. Daha önce yapıldığı gibi 20 kullanıcıli sistemde benzetim çalışması yapıldığında, -5 dB'den fazla SNR değerlerinde, önerilen algoritmanın bulduğu değerlerden fazla bir sapma olmadığı Şekil 6.9'da görülmektedir. Ancak -5 dB'den daha düşük değerlerde DDP algoritması DC programlamanın sonucunu takip etmektedir. Burada da yapılan bütün çalışmalarda h ve g sırasıyla 1 ve 0.3 ortalama değerine sahip Rayleigh dağılımlı kanal katsayılarıdır.

Şekil 6.10, Q değerinin değişmesine rağmen DDP algoritmasının davranışının değişmediğini göstermektedir. Girişim daha da kısıtlanmış ama sonuç olarak bir önceki çalışmanın aynısı elde edilmiştir.

Yeniden düzenlenen bu algoritma diğer önerilen algoritmadan teorik olarak daha iyi sonuç vermesine karşın hesaplama karmaşıklığı daha çöktür. Eğer MATLAB'ta



Şekil 6.9. DDP algoritmasının diğer iki algoritmayla karşılaştırılması - $Q = 1$



Şekil 6.10. DDP algoritmasının diğer iki algoritmayla karşılaştırılması - $Q = 0.1$

"fmincon" kullanılarak çözümlerse ikinci adımın karmaşıklığı yaklaşık $O(N^3)$ olmaktadır.

Özetle; önerilen algoritma, DC programlama ve DDP algoritması kıyaslandığında;

- DC programlama eniyi nokta için iyi bir alt sınır yaklaşımıdır.
- TDMA güç politikasının olasılığı ve DC programlama göz önüne alındığında, önerilen algoritma yüksek-SNR değerlerinde eniyi çözümü vermektedir.
- Önerilen algoritma pratik olarak uygulanabilir ve düşük-SNR değerlerinde eniyi altı sonuç vermektedir. Ancak alt sınır olarak kabul edilen DC programlamadan hala daha iyi sonuç vermektedir.
- DDP algoritması teorik olan düşük-SNR değerlerinde DC programlama ile aynı sonucu verirken, daha yüksek-SNR değerlerinde önerilen algoritma ile aynı sonucu vermektedir.
- Karmaşıklığı en düşük olan $O(N^2 \log N)$ ile önerilen algoritmadır. Bunu $O(N^3)$ ile DDP algoritması ve $O(LN^3)$ ile DC programlama izlemektedir.

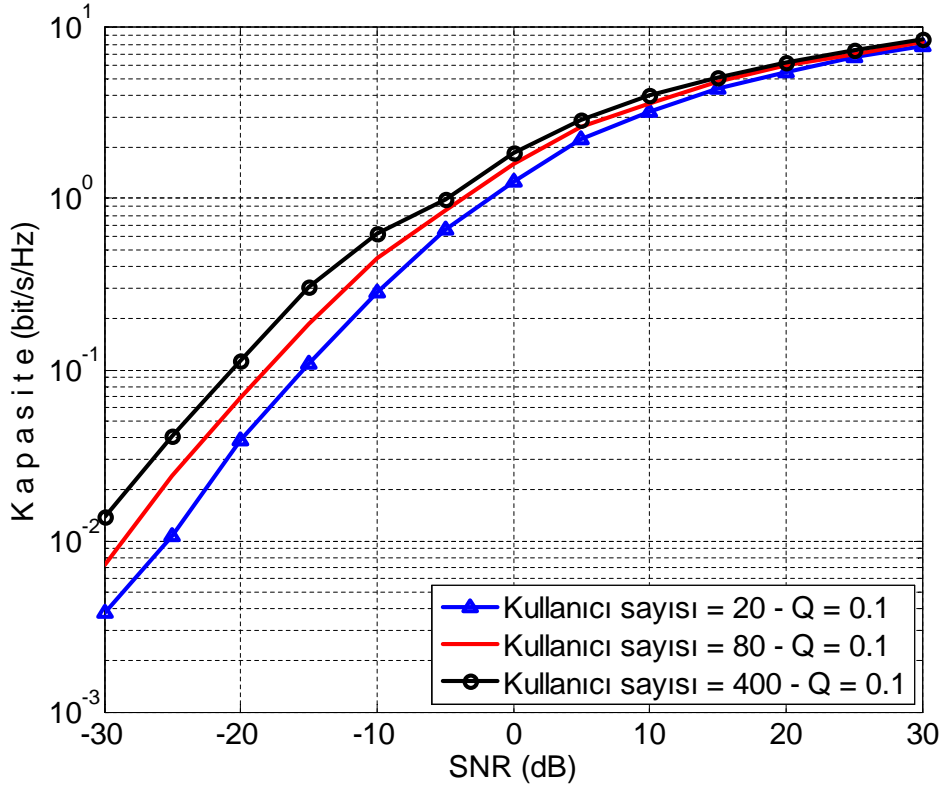
6.6 Önerilen algoritmanın SISO modele uygulanması

Çalışılan senaryoda, sistemi etkileyen birçok değişken vardır. Kullanıcı sayısı, kanalların durumu, Katman 1 kullanıcısının karşılayabileceği girişim miktarı ve buna bağlı olarak bu kullanıcının servis kalitesi (QoS) bunlardan sayılabilir. Buradan hareketle, sistemin davranışını anlamak amaçlı önerilen algoritmayla bazı uygulamalar yapılmıştır.

6.6.1 Kullanıcı sayısının ve girişim kanallarının etkisi

Bu bölümde kullanıcı sayısı artışında ve girişim kanallarının ortalama değerlerindeki değişimlerde toplam veri hızının nasıl etkilendiği incelenmiştir. Öncelikli olarak kullanıcı sayısının artmasının tüm SNR değerlerinde sistemi nasıl etkilediğine bakılmıştır.

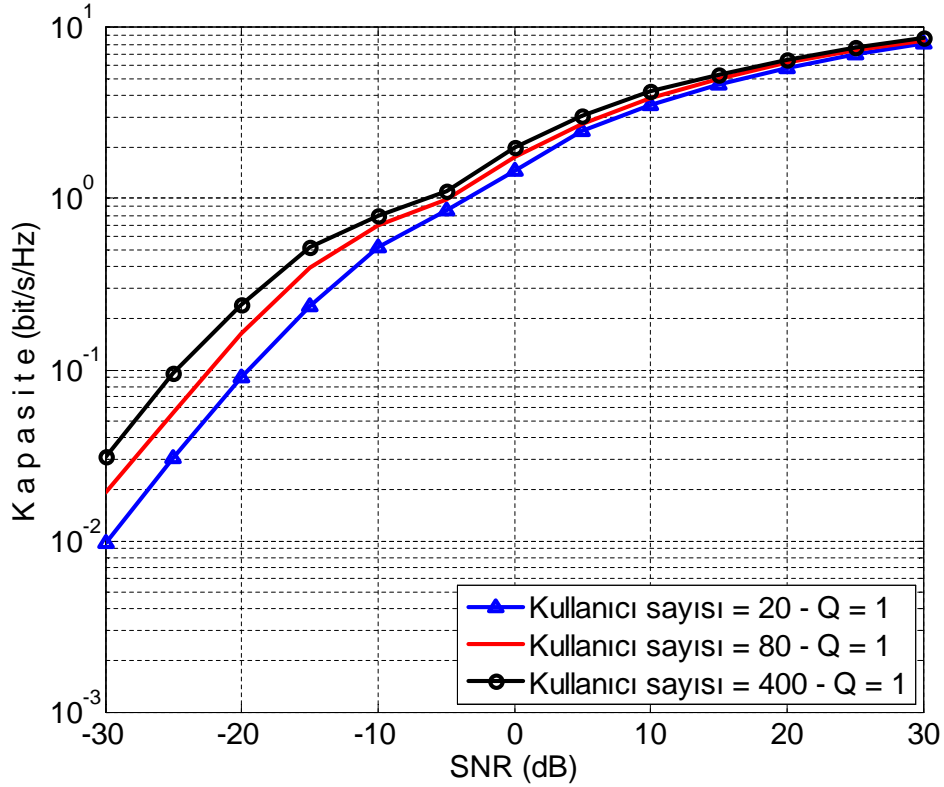
Şekil 6.11'de girişim kısıtı, Q , 0.1 W iken kullanıcı sayısının tüm SNR değerlerinde sistemi nasıl etkilediğine bakılmıştır. Düşük-SNR bölgelerinde kullanıcı sayısının art-



Şekil 6.11. Girişim kısıtı $Q = 0.1$ iken kullanıcı sayısının sistem kapasitesine etkisi

ması sistemin kapasitesini hayli arttırırken, SNR değerleri yükseldikçe kullanıcı sayısının artmasından bağımsız olarak kapasite eğrileri birbirine yaklaşımaktadır. Aynı gözlemleri Şekil 6.12'de girişim kısıtı değeri, Q , 1 W iken de yapabiliriz. Düşük-SNR bölgelerinde sistemin davranışı girişim kısıtı ihlali olmadığı sürece tüm kullanıcıların açık olması yönündedir. Dolayısıyla kullanıcı sayısı arttıkça bu bölgede açık olan kullanıcıların da sayısı artmaktadır ve kapasite de bununla orantılı olarak artmaktadır. Yüksek-SNR bölgelerinde ise TDMA güç kontrolü politikasının ortaya çıkması söz konusudur. Dolayısıyla kullanıcı sayısı arttıkça özellikle 10 dB'den sonra kapasite eğrileri birbirine yakınlaşmaktadır. Ancak kullanıcı sayısı artması aynı zamanda en iyi kanala sahip kullanıcı bulma olasılığını da arttırdığından yüksek sayıda kullanıcı için çizilen eğriler daha yüksek kapasite değerleri vermektedir.

Kullanıcı sayısının artması kapasiteyi arttırıyor gözükse de kapasite artışı belli bir kullanıcı sayısından sonra yavaşlar ve doygunluğa ulaşır. Şekil 6.13'te -10 dB SNR değeri için kullanıcı sayısına karşı kapasite grafiği verilmiştir. -10 dB SNR değeri, Şekil 6.12 ve öncesinden hatırlanacağı üzere düşük-SNR bölgesine denk gelmektedir. Yine hatırlanacağı gibi bu bölgede sistem, girişim kısıtı ihlal edilmediği sürece tüm

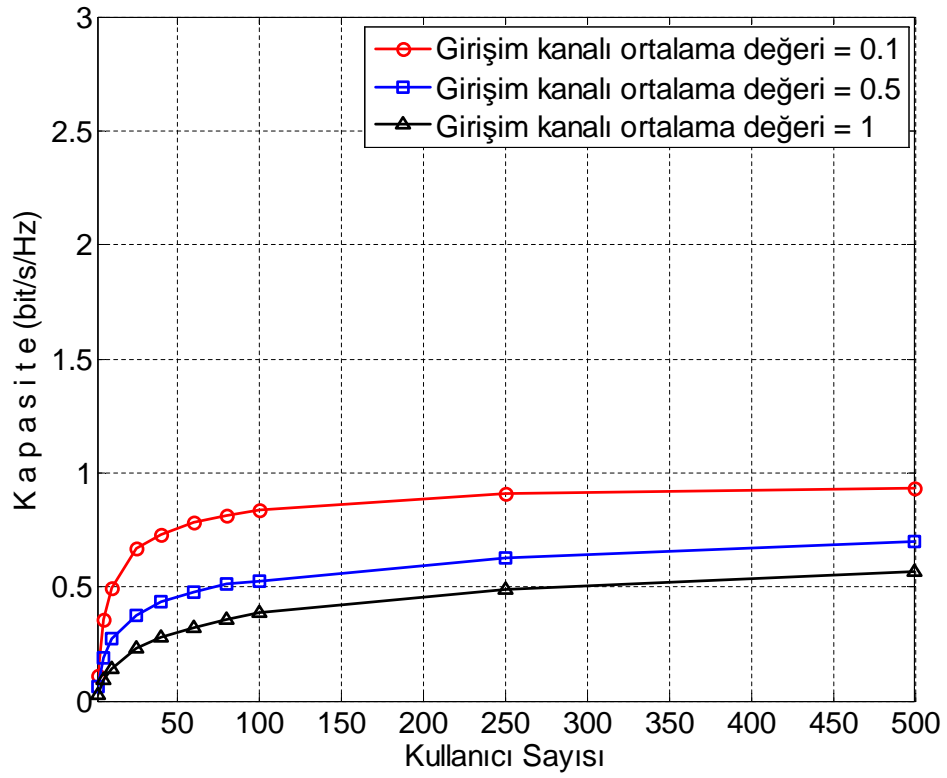


Şekil 6.12. Girişim kısıtı $Q = 1$ iken kullanıcı sayısının sistem kapasitesine etkisi

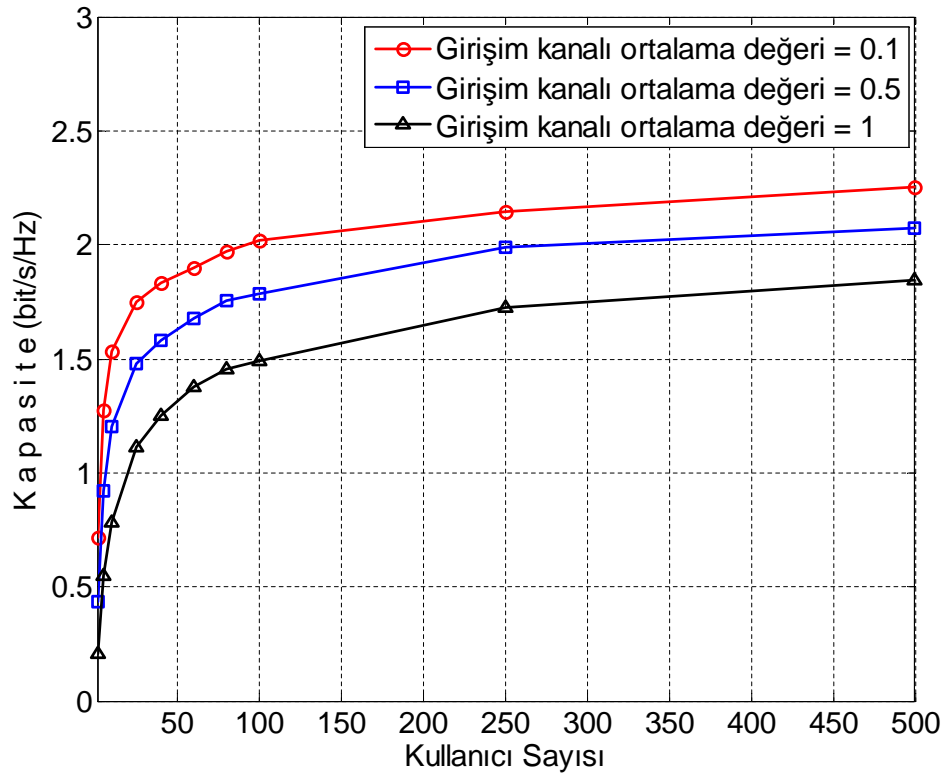
kullanıcıların açık olması yönünde davranış göstermektedir. Bu nedenle kullanıcı sayısı arttıkça girişim kısıtı ihlalinin artma olasılığı da artacağından, kapasite artışı da belli sayıda kullanıcıdan sonra Şekil 6.13'te görüldüğü gibi sabitlenmek durumunda kalacaktır.

Şekil 6.14 ve Şekil 6.15'te sırasıyla 0 dB ve 10 dB SNR değerleri için kullanıcı sayısına karşı kapasite değeri çizilmiştir. Bu grafiklerde ise Şekil 6.13'e göre durum biraz daha farklıdır. Yine Şekil 6.13'e göre kapasite değeri belli kullanıcı sayısından sonra doyuma ulaşmaktadır ancak bu durum, açık kullanıcı sayısının sabitlenmesinden dolayı değil, TDMA güç kontrolü politikasından dolayıdır. Sistemde 250 kullanıcı olsa da 500 kullanıcı olsa da bir kullanıcı iletim yapacaktır. 100 benzetimin ortalaması alındığında ise bu değerler birbirine çok yakın çıkmaktadır. Daha çok kullanıcının olması durumunda ise artık kapasitede herhangi bir değişikliğin olmaması beklenmelidir.

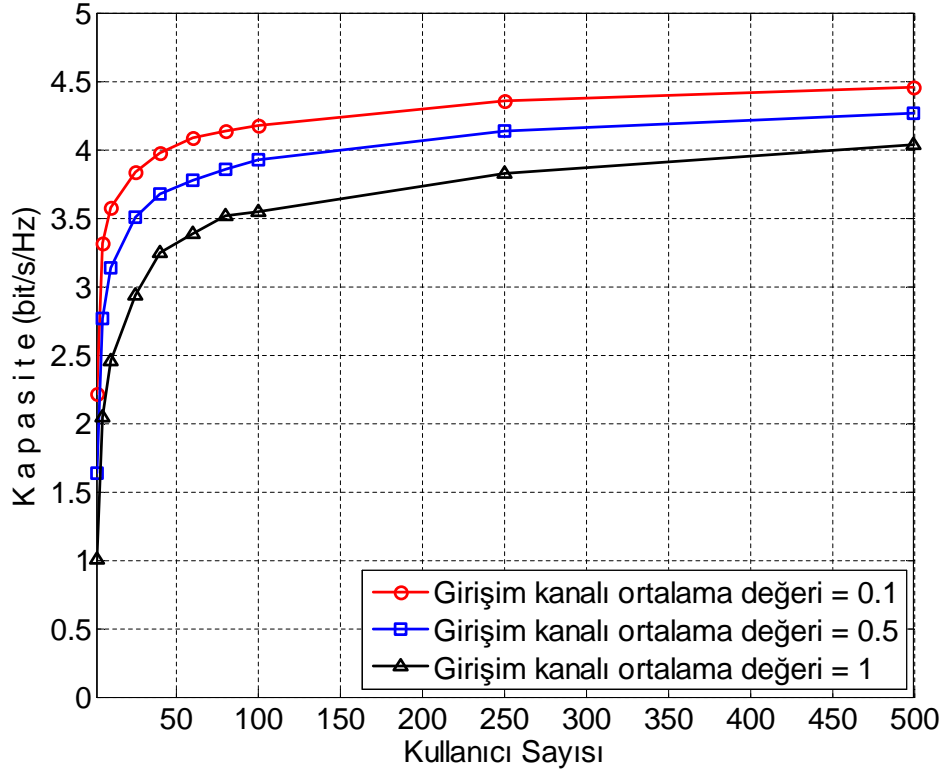
Şekil 6.13, Şekil 6.14 ve Şekil 6.15'te aynı zamanda girişim kanalının ortalama değerinin değişiminin etkisi resmedilmiştir. Girişim kanallarının ortalama değerinin düş-



Şekil 6.13. Toplam girişim kısıtı $Q = 0.1$ iken -10 dB SNR değeri için kapasitenin kullanıcı sayısı ve girişim kanalı ortalama değerine göre değişimi



Şekil 6.14. Toplam girişim kısıtı $Q = 0.1$ iken 0 dB SNR değeri için kapasitenin kullanıcı sayısı ve girişim kanalı ortalama değerine göre değişimi

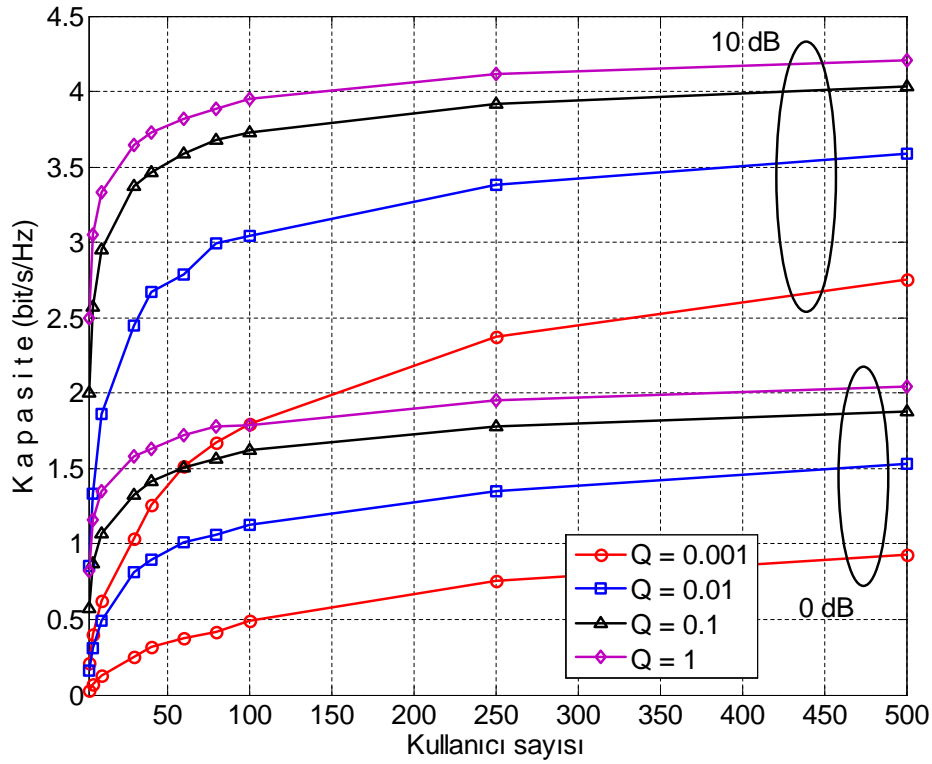


Şekil 6.15. Toplam girişim kısıtı $Q = 0.1$ iken 10 dB SNR değeri için kapasitenin kullanıcı sayısı ve girişim kanalı ortalama değerine göre değişimi

mesiyle orantılı olarak kapasite eğrileri daha yukarıya çıkmaktadır. Yani kapasite artmaktadır. Ortalama değer düşmesi daha az kanal kazancı gelmesi ihtimalinin artması demektir. Yani Katman 1 kullanıcısının alıcı anteninde daha az girişim gücü toplanması anlamına gelmektedir. Bu durum düşük-SNR bölgesinde daha fazla kullanıcının çalışmasını sağlarken, yüksek-SNR bölgesinde ise P_{azami} ile yayın yapma ihtimalini arttırır.

6.6.2 Katman 1 kullanıcısının karşılayabileceği girişim değerinin etkisi

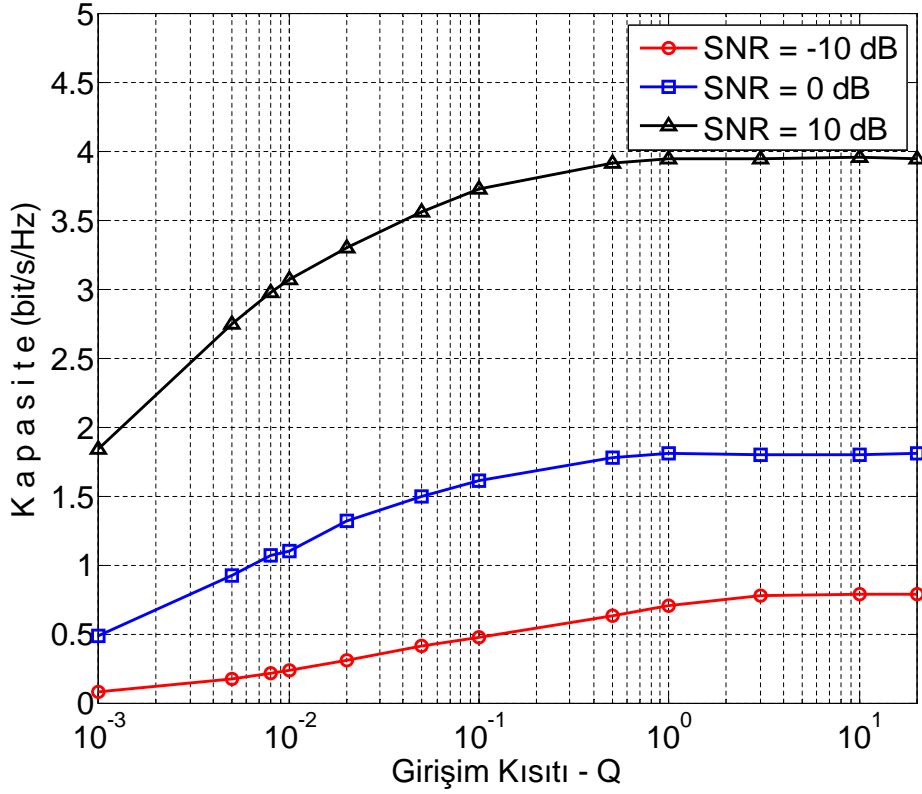
Bu bölümde Katman 1 kullanıcısının servis kalitesini belirleyen Q değişkeninin sistemi nasıl etkilediği incelenmiştir. Şekil 6.16'da kullanıcı sayısının artarken ve girişim kısıtı değeri değişirken kapasite grafikleri resmedilmiştir. Kullanıcı sayısının artması sistemin kapasitesine önceki bölümdeki etkiyi yaratırken girişim kısıtının sıkılaşması davranış yönünden bir etki yaratmamıştır. Ancak açıkça görülmektedir ki girişim kısıtının sıkılaşması sistemin kapasitesini düşürmüştür. Girişim kısıtının enbüyük iletim gücünün %10'una düşmesi sistemin kapasitesinde sayısal olarak ciddi derecede



Şekil 6.16. İki SNR değeri için toplam girişim kısıtının sistem kapasitesine etkisi.

azalmaya neden olmazken, girişim kısıtının daha da sıkılaşması sistem performansında özellikle düşük kullanıcı sayılarında ciddi düşüğe sebep olmaktadır. Girişim kısıtının sıkılaşması ile sistemde çalışan kullanıcı sayısı ve bu kullanıcıların yayın gücü giderek azalmaktadır. Bu da kapasiteyi oldukça düşürmektedir. Girişim kısıtındaki artışın sistem performansını giderek daha az etkilemesi beklenmektedir. Problemin geometrisini düşünürsek girişim değerini arttırdıkça bir hiperdüzlem oluşturan girişim kısıtı, güç kısıtlarının oluşturduğu politopu kesmemektedir ve girişim kısıtı etkisiz hale gelmektedir.

Çok katmanlı ağlarda girişim yapılan katmanın karşılayabileceği girişim değeri oldukça önemlidir. Birbiri arasında kooperatif çalışan bu sistemlerde girişim kısıtını anlık olarak Katman 1'e göre uyarlamalı seçmek akılcı olabilir. Örneğin, Katman 1 kullanıcısı hücre-kenar kullanıcısı olabilir ve kanal durumu çok kötüdür. Bu durumlarda Katman 1 baz istasyonlarından gelen veriler (X2 arayüzü) doğrultusunda ya da bilişsel radyodaki gibi spektrum algılama sonucunda Q değerinin çok küçülmesi gerekebilir. Şekil 6.17'de açıkça görülmektedir ki, Q girişim kısıtının kullanıcıların yayın yapabileceği azami gücün ($P_{azami} = 1$) onda birinden daha az olduğu Q değerle-



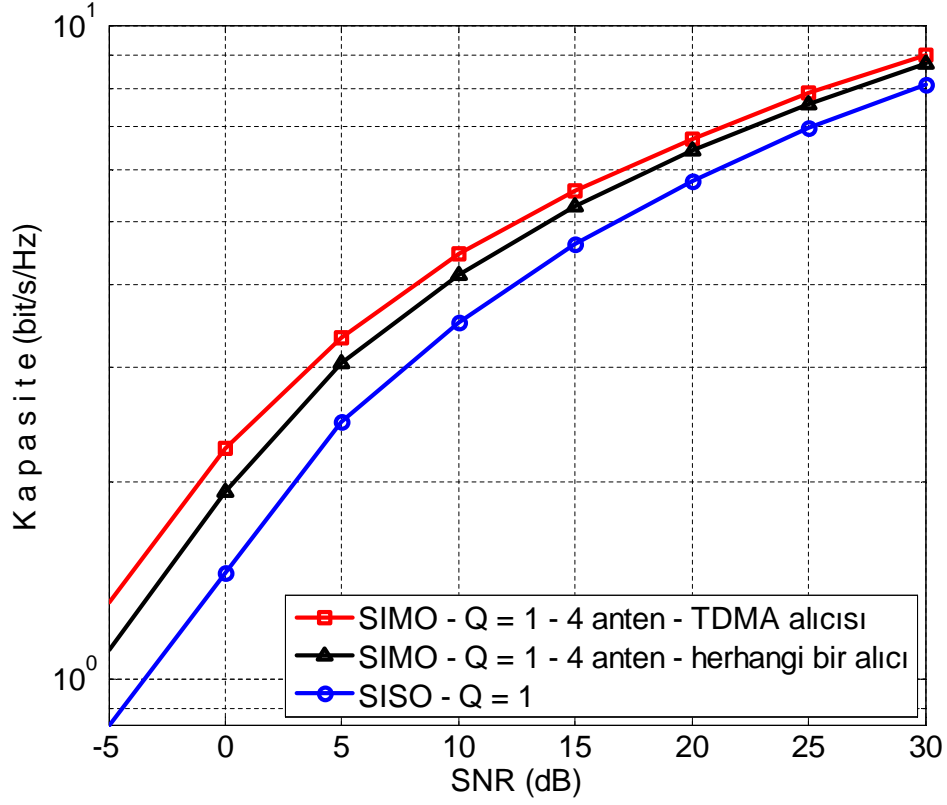
Şekil 6.17. Girişim kısıtının 100 kullanıcıli sistem kapasitesi üzerine etkisi.

rinde sistem kapasitesi düşmektedir. Yüksek-SNR değerlerinde kapasite diğer SNR değerlerine göre daha çok azalmaktadır. Bu da yine TDMA politikasının bir sonucudur. Hatırlanacağı üzere TDMA politikası geçerli olduğunda yayın yapan tek kullanıcının $\left\{ \frac{Q}{|g_i|^2}, P_{azami} \right\}$ gücüyle yayın yapmaktadır. Q değerinin düşmesi en küçük işlevinden ötürü sürekli yayın gücünü $\frac{Q}{|g_i|^2}$ yapacaktır ve bununla doğru orantılı olarak da kapasitede Şekil 6.17'de görüldüğü gibi düşüş yaşanacaktır. Girişim değerinin azami yayın gücünün onda birinden fazla olduğu durumda ise sistem kapasitesine neredeyse hiçbir olumsuz etki yapmadığı görülür.

6.7 Önerilen algoritma ile SIMO uygulamaları

Bu bölümde dördüncü bölümde analitik çözümleri yapılan SIMO modelindeki alıcı çeşitlerinin karşılaştırılması yapılmıştır. Sonrasında ise anten sayısının ve girişim kısıtının etkisi incelenmiştir.

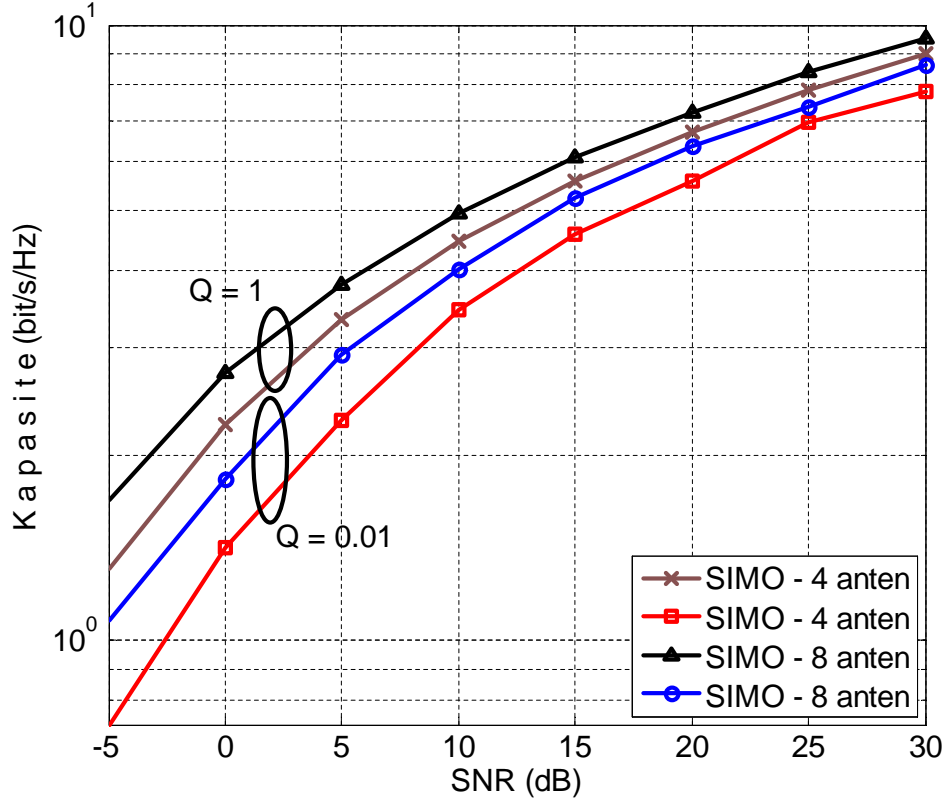
Hatırlanacağı gibi dördüncü bölümde rastgele seçilmiş doğrusal bir alıcı için TDMA



Şekil 6.18. Herhangi bir alıcı ve TDMA alıcısının 20 tane Katman 2 kullanıcısının olduğu sistemde karşılaştırılması

durumunda güç kontrolü politikasının nasıl olması gerektiği verilmiştir. Sonrasında TDMA durumu için eniyi alıcı da eniyi güç kontrolü politikası yanında verilmiştir. Bu sonuçlar ışığında, Şekil 6.18'de alıcıda 4 anten varken ve girişim kısıtı değeri, Q , 1 W seçildiğinde iki doğrusal alıcı çeşidi için 20 tane Katman 2 kullanıcı sistemde, TDMA'nın olası olduğu SNR değerlerine karşılık kapasite grafiği çizilmiştir. Ayrıca bir referans vermesi açısından SISO modeli de çizdirilmiştir. Şekil 6.18'de görüldüğü gibi TDMA alıcısı, rastgele seçilmiş bir alıcıdan -beklenildiği gibi- daha iyi sonuç vermektedir. Burada, herhangi bir alıcı, tekdüze dağılımlı sayılardan oluşan birimsel bir vektör olarak oluşturulmuştur. Rastgele seçilmiş bu alıcı özellikle yüksek-SNR değerlerinde eniyiye yakın performans gösterdiği görülmektedir. TDMA alıcısı aslında enbüyük oran birleştirme yapan bir alıcıdır. Bu alıcının oluşturulamadığı durumlarda tekdüze dağılımlı bir alıcının da iş göreceği görülmektedir.

Katman 2'deki kullanıcı sayısı yirmi iken alıcıda eniyi alıcı olan TDMA alıcısı yani enbüyük oran birleştirme alıcısı kullanıldığında anten sayısının ve girişim kısıtının etkisini Şekil 6.19'da görebiliriz. Girişim kısıtı sıkılaştığında sistemin performansının



Şekil 6.19. Girişim kısıtının 0.01 ve 1 olduğu durumda, 4 ve 8 antenli TDMA alıcısı varken, 20 tane Katman 2 kullanıcıli sistemin davranışı

SISO modeldeki gibi düşmekte olduğu gözlemlenmektedir. Anten sayısının artması beklenildiği gibi kapasitede artış sağlamaktadır. Ancak girişim kısıtının çok sıkılaşması anten sayısının artmasından gelecek kazancı gölgelemektedir. Dolayısıyla girişim kısıtı değeri sistem performansında kritik bir yere sahiptir.

7. SONUÇLAR

7.1 Katkılar

Gelecek nesil haberleşme sistemlerinde veri hızlarını enbüyütmek için güç kontrolü yapmak oldukça önemlidir. Literatürde, tek katmanlı ağlarda herhangi bir girişim giderimi tekniği kullanmadan veri hızını enbüyütmek için güç kontrolü politikaları bulunmuş olsa da gelecek nesil haberleşme ağlarının çok katmanlı olması beklendiği için bu politikalar büyük ölçüde geçerliliğini yitirecektir. Bu tezde, literatürdeki bu açığı kapatmak amaçlanmakta ve buna ek olarak alıcı baz istasyonunda çoklu antenin olduğu SIMO sistemler için yeni nesil güç kontrolü politikaları önerilmektedir.

SISO model için iki tane Katman 2 kullanıcısının olduğu sistemde toplam girişim kısıtı ve bireysel girişim kısıtları altında veri hızını enbüyütmek için çözüm bulunmuş ve sonucun problemin olurlu kümesinin köşelerinde çıktığı ispatlanmıştır. Daha sonra bu problem Katman 1’de birden fazla kullanıcının olması durumuna genellenmiş ve sonucun yine köşelerde çıkacağı ispatlanmıştır.

Katman 2’de kullanıcı sayısının ikiden fazla olduğu durumlar için iki kullanıcı çözümü geçerliliğini yitirdiği için bu problemin alt-problemleri sayılabilecek olan “kanal duyarlı TDMA” ve “düşük-SNR” problemlerinin çözümleri verilmiştir. Buna göre TDMA’nın eniyi olduğu durumu sağlayan kanal katsayısına sahip kullanıcının $\min\left\{\frac{Q}{|g_i|^2}, P_{azami}\right\}$ gücüyle iletim yaptığı diğer kullanıcılar herhangi bir iletim yapmadığı ispatlanmıştır. Bunun yanında gürültünün çoğaldığı durumlarda maliyet işlevinde girişim yoksayılarak dışbükey yaklaşımı yapılabilir. Bu durumda da direkt kanal katsayısı girişim kanal katsayısına oranı en yüksek olan kullanıcıların girişim kısıtını aşmadıkları sürece tam güçle çalıştıkları, sadece bir kullanıcının kesirli güçle çalışabileceği ve bu durumda girişim kısıtının eşitlikle sağlandığı ispatlanmıştır.

Alıcıdaki anten sayısı arttığında öncelikle tek katmanlı yapılar için eniyi güç kontrolü rastgele seçilmiş bir doğrusal alıcı için bulunurken daha sonra TDMA’nın eniyi olduğu durum için eniyi doğrusal alıcı ve güç kontrolü politikası bulunmuştur. Buna göre eniyi doğrusal alıcı enbüyük oran birleştirme alıcısı olduğu ve eniyi kanal durumuna sahip kullanıcı P_{azami} gücüyle iletim yaparken diğerlerinin iletim yapmadığı ispatlanmıştır. Dahası, rastgele seçilmiş bir doğrusal alıcı için eniyi güç tahsisi politikasının basit bir polinom zamanlı algoritmayla bulunabileceği gösterilmiştir. Daha

sonra bu problem iki katmanlı yapılara genişletilerek, TDMA'nın eniyi olduğu durumda eniyi doğrusal alıcının enbüyük oran birleştirme alıcısı olduğu ve eniyi kanal durumuna sahip kullanıcının $\min\left\{\frac{Q}{|g_i|^2}, P_{azami}\right\}$ ile yayın yaparken diğer kullanıcıların yayın yapmadığı ispatlanmıştır.

Girişim kısıtı ve bireysel güç kısıtları altında eniyiye yakın güç kontrolü politikasını bulan bir köşe tarama algoritması önerilmiştir. Bu algoritmanın performansı literatürde çalışılmış olan *DC programlama algoritması* ve problemin geometrik yapısından faydalanarak türetilen *değiştirilmiş doğrusal-olmayan programlama (DDP)* ile kıyaslanmıştır. Ayrıca TDMA olasılığı nümerik olarak belli SNR değerleri ve belli kullanıcı sayıları için bulunmuştur. Buna göre önerilen algoritma yüksek-SNR değerlerinde, diğer bir deyişle TDMA durumunun eniyi olduğu SNR değerlerinde, eniyi değeri vermekle birlikte SNR değerinin düşmesi ile güvenilirliğini kaybetse de alt sınır olarak belirlenmiş DCA'dan hala daha iyi sonuç vermektedir. Pratik olmayacak kadar düşük SNR değerlerinde ise alt sınırın altında kalmaktadır. Bunun yanında diğer iki algoritma ile kıyaslandığında önerilen algoritmanın hesaplama karmaşıklığı daha düşüktür.

Önerilen algoritmayla sistemin davranışını anlamak için çeşitli benzetimler yapılmıştır. Burada kullanıcı sayısının, girişim kanallarının ortalama değerinin ve girişim kısıtının sistem üzerindeki etkisi incelenmiştir. Kullanıcı sayısının artması düşük-SNR değerlerinde sistemi olumlu etkilerken, yüksek-SNR değerlerinde çok küçük farklılıklara neden olmaktadır. Dahası yüksek-SNR'da en iyi kanal katsayısına sahip kullanıcı seçildiğinden çok-kullanıcı çeşitliliğinden bahsedilebilir. Bunların yanında, girişim kısıtının değeri, Katman 2 kullanıcılarının yayın güçlerinin onda birine düşse bile sistemin performansının çok etkilendiği söylenemez. Ancak girişim kısıtı değeri iletim gücünün yüzde biri ya da binde birine geldiğinde, sistem artık çok sıkışık girişim kısıtı karşısında neredeyse yarı yarıya varan bir performans düşüşü yaşamaktadır. Bunların yanında, anten sayısının sistemin performansını olumlu etkilediği görülürken, girişim kısıtının sıkışması anten sayısından gelen kazancı elemektedir. Örneğin, girişim kısıtı değeri 0.01 iken ve alıcıda 8 anten olduğundaki kapasite değeri, girişim kısıtı 1 iken ve anten sayısı 4 olduğundaki kapasite değerinden daha düşüktür. Bu da girişim kısıtının sistemin performansında etkin bir rol oynadığını göstermektedir.

7.2 Gelecek Çalışmalar

Bu tezde literatürde henüz çalışılmamış sinyal girişiminin yok edilemediği sistemler üzerine çalışılmıştır. Ancak ortaya konulan problemde kullanıcılar adına herhangi bir adalet mekanizması yoktur. Özellikle TDMA politikasının eniyi olduğu durumda, sadece bir kullanıcı yayın yaptığı için diğer kullanıcılar için herhangi bir veri hızı söz konusu olmaz. Bu durumda, sistemin kapasitesini fırsatçı bir şekilde arttırmak yerine adaletli bir biçimde enbüyütmek gerekmektedir. İlgilenilen probleme asgari bireysel sinyal-girişim+gürültü-oranı (Signal-to-Interference-plus-Noise-Ratio, SINR) ya da asgari bireysel kapasite kısıtı koymak bu sorunu çözmek için yeterlidir. Bu problemin çözümü, iki katmanlı ağlar için hala yapılmamıştır.

Ele alınan senaryoda Katman 1'de sadece bir kullanıcı olduğu varsayılmıştır. Dolayısıyla problemin formülasyonunda bir kullanıcı için bir doğrusal girişim kısıtı vardır. Birden fazla Katman 1 kullanıcısı için iki tane Katman 2 kullanıcısı olduğunda çözüm yapılmış olsa da ikiden fazla Katman 2 kullanıcısı için çözüm hala araştırmaya açık bir konudur.

İlgilenilen eniyileme problemlerinde Katman 2 kullanıcılarında tek anten olduğu varsayılmıştır. Ancak gelecek nesil haberleşme sistemlerinde (LTE-A ve ilerisi) çoklu anten teknolojisi hem alıcıda hem vericide kullanılacaktır. Dolayısıyla literatürün bu tarafı henüz doldurulamamıştır.

Bunların yanında, kanal bilgisinin alıcıda mükemmel bir şekilde olduğu varsayılmıştır ancak bu durumda geri besleme kanalının kapasitesinin sonsuz olması gerekir. Böyle bir durum söz konusu olmadığı için veri hızları ile geri besleme kanalı kapasitesi arasında ödünleşim vardır. Geri besleme kanalı kapasitesinin kısıtlı olduğu durumlarda veri hızları ile geri besleme kanal kapasitesi arasındaki ilişki hala araştırılmamış konular arasındadır.

KAYNAKLAR

- [1] Aein, J. M., *Power Balancing in Systems Employing Frequency Reuse*, COM-SAT Technical Review, 3, 277-300, **1973**.
- [2] Hanly, S. V., Capacity and Power control in Spread Spectrum Macrodiversity Radio Networks, *IEEE Transactions on Communications*, 44, 247-256, **1996**.
- [3] Yanikömeroğlu, H. ve Sousa, E., SIR-balanced Macro Power Control for Reverse Link of CDMA Sectorized Distributed Antenna System, *in Proc the 9th IEEE International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications* , **1998**.
- [4] Bambos, N., Toward Power-sensitive Network Architectures in Wireless Communications: Concepts, Issues and Design Aspects, *IEEE Personal Communication*, 5, 3, 50–59, **1998**.
- [5] Yates, R. D., A Framework for Uplink Power Control in Cellular Radio Networks, *IEEE Journal of Selected Areas on Communication*, 13, 1341-1347, **1995**.
- [6] Zander, J., Performance of Optimum Transmitter Power Control in Cellular Radio Systems, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 41, 57–62, **1992**.
- [7] Hanly, S. V. ve Tse, D. N. C., Power Control and Capacity of Spread Spectrum Wireless Networks, *Automatica*, 35, 1987– 2012, **1999**.
- [8] Goldsmith, A. J. ve Varaiya, P. P., Capacity of Fading Channels with Channel Side Information, *IEEE Transactions on Information Theory*, 43, 1986-1992, **1997**.
- [9] Tse, D. N. C. ve Hanly, S. V., Multiaccess Fading Channels - Part I: Polymatroid Structure, Optimal Resource Allocation and Throughput Capacities, *IEEE Transactions on Information Theory*, 44, 2796-2815, **1998**.
- [10] Knopp, R. ve Humblet, P. A., Information Capacity and Power Control in Single Cell Multiuser Communications,” *in Proc. IEEE International Conference on Communications*, Seattle, WA, **1995**.
- [11] Boyd, S. ve Vandenberghe, L., *Convex Optimization*, Cambridge University Press, **2004**.
- [12] Chiang, M., Hande, P., Lan, T. ve Tan, C. W., Power Control in Wireless Cellular Networks, *Foundations and Trends in Networking*, 2, 381–553, **2008**.
- [13] Chiang, M., Tan, C. W., Palomar, D. P., O’Neill, D., ve Julian, D., Power Control By Geometric Programming, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 6, **2007**.
- [14] Gjendemsjø, A., Gesbert, D., Øien, G. E. ve Kiani, S. G., Binary Power Control for Sum Rate Maximization over Multiple Interfering Links, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 7, **2008**.

- [15] Bhaskaran, S. R., Hanly, S. V., Badruddin, N. ve Evans, J. S., Maximizing the Sum Rate in Symmetric Networks of Interfering Links, *IEEE Transactions on Information Theory*, 56, **2010**.
- [16] Inaltekin, H. ve Hanly, S. V., Optimality of Binary Power Control for the Single Cell Uplink, *IEEE Transactions on Information Theory*, 58, **2012**.
- [17] Boche, H. ve Jorswieck, E. A., Optimum Power Allocation and Complete Characterization of The Impact of Correlation on the Capacity of MISO Systems with Different CSI at The Transmitter, *IEEE International Symposium on Information Theory*, Yokohama, Japan, **2003**.
- [18] Yu, W., Rhee, W. ve Cioffi, J. M., Optimal Power Control in Multiple Access Fading Channels with Multiple Antennas, *IEEE International Conference on Communication*, **2001**.
- [19] King, T. W. ve Smith, P. J., Transmit Power Control in MIMO Cellular Systems, *Communications Theory Workshop, AusCTW*, **2009**.
- [20] Liu, J., Hou, Y. T., Shi, Y., Sherali, H. D. ve Kompella, S., On the Capacity of Multiuser MIMO Networks with Interference, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 7, **2008**.
- [21] Naeem, M., Pareek, U. ve Lee, D.C., Interference-aware Joint User Selection and Quantised Power Control Schemes for Uplink Cognitive Multiple-Input Multiple-Output System, *IET Communications*, 5, 2266–2274, **2011**.
- [22] Ghasemi, A. ve Sousa, E. S., Fundamental Limits of Spectrum-Sharing in Fading Environments, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 6, **2007**.
- [23] Yükksekaya, B., İnaltekin, H., Toker, C., Optimum Uplink Power Control under Power and Interference Constraints, *IEEE Vehicular Technology Conference*, **2013**.
- [24] Anonim, DC Programming: The Optimization Method You Never Knew You Had To Know, MIT Opencourseware, **2012**.
- [25] Kha, H. H., Tuan, H. D. ve Nguyen, H. H., Fast Global Optimal Power Allocation in Wireless Networks By Local DC Programming, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 11, 2, **2012**.
- [26] Vucic, N., Shi, S. ve Schubert, M., DC Programming Approach for Resource Allocation in Wireless Networks, *The International Conference on Resource Allocation of Wireless Networks*, **2010**.
- [27] Damnjanovic, A., Montojo, J., Wei, Y., Ji, T., Luo, T., Vajapeyam, M., Yoo, T., Song, O. ve Malladi, D., A Survey on 3GPP Heterogeneous Networks, *IEEE Wireless Communications*, 18, 10-21, **2011**
- [28] Chandrasekhar, V., Andrews, J. G. ve Gatherer, A., Femtocell Networks: A Survey, *IEEE Communications Magazine*, 46, 59-67, **2008**

- [29] Wang, B. ve Liu, K. J. R., Advances in Cognitive Radio Networks: A Survey, *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 5, 1, **2011**
- [30] *Facilitating Opportunities for Flexible, Efficient and Reliable Spectrum Use Employing Cognitive Radio Technologies: Notice of Proposed Rule Making and Order FCC*, FCC Döküman, 03-108. **2003**
- [31] Mitola, J., *Cognitive Radio: An Integrated Agent Architecture for Software Defined Radio*, Ph.D. dissertation, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, **2000**.
- [32] *Spectrum Policy Task Force Report*, FCC Döküman No. 02-135. **2002**
- [33] Akyildiz, I. F., Lee, W.-Y., Vuran, M. C., ve Mohanty, S., Next Generation/Dynamic Spectrum Access/Cognitive Radio Wireless Networks: A Survey, *Computer Network*, 50, 2127–2159, **2006**.
- [34] Haykin, S., Cognitive Radio: Brain-Empowered Wireless Communications, *IEEE Journal of Selected Areas on Communication*, 23, 201–220, **2005**.
- [35] Han, Z. ve Liu, K. J. R., *Resource Allocation for Wireless Networks: Basics, Techniques, and Applications*. Cambridge, U.K.: Cambridge University Press, **2008**.
- [36] Clancy, T., Achievable Capacity under the Interference Temperature Model, *in Proc. 26th IEEE International Conference Computer Communication*, Anchorage, AK, sf. 794–802. **2007**.
- [37] *Establishment of Interference Temperature Metric to Quantify and Manage Interference and to Expand Available Unlicensed Operation in Certain Fixed Mobile and Satellite Frequency Bands*, FCC Döküman, **2003**.
- [38] Kolodzy, P. J., Interference Temperature: A Metric for Dynamic Spectrum Utilization, *International Journal of Network Management*, 16, pp. 103–113, **2006**.
- [39] Clancy, T. C., Formalizing the Interference Temperature Model, *Journal of Wireless Communication and Mobile Computing*, 7, 1077–1086, **2007**.
- [40] Yucek, T. ve Arslan, H., A Survey of Spectrum Sensing Algorithms for Cognitive Radio Applications, *IEEE Communication Surveys and Tutorials*, 11, 116–130, **2009**.
- [41] Horne, W. D., Adaptive Spectrum Access: Using the Full Spectrum Space, *in Proc. Annual Telecommunication Policy Research Conference*, Arlington, VA, **2003**.
- [42] Ganesan, G. ve Ye, L., Cooperative Spectrum Sensing in Cognitive Radio, Part I: Two User Networks, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 6, 2204–2213, **2007**.
- [43] Zhao, Q. ve Sadler, B., A Survey of Dynamic Spectrum Access, *IEEE Signal Processing Magazine*, 24, 79–89, **2007**.

- [44] Ren, W., Zhao, Q. ve Swami, A., Power Control in Cognitive Radio Networks: How to Cross A Multi-lane Highway, *in Proc. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, **2008**.
- [45] Gao, L., Wu, P. ve Cui, S., Power and Rate Control with Dynamic Programming for Cognitive Radios, *in Proc. IEEE Global Telecommunication Conference*, **2007**.
- [46] Chen, Y., Yu, G., Zhang, Z., Chen, H. ve P., On Cognitive Radio Networks with Opportunistic Power Control Strategies in Fading Channels, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 7, 2752–2761, **2008**.
- [47] Nasif, A. ve Mark, B., Collaborative Opportunistic Spectrum Access in the Presence of Multiple Transmitters, *in Proc. IEEE Global Telecommunication Conference*, **2008**.
- [48] Jain, K., Padhye, J., Padmanabhan, V. ve Qiu, L., Impact of Interference on Multi-Hop Wireless Network Performance, *In Proc. of Mobile Communication*, **2003**.
- [49] Yang, L., Cao, L. ve Zheng, H., Physical Interference Driven Dynamic Spectrum Management, *in Proc. IEEE Dynamic Spectrum Access Network*, **2008**.
- [50] Goldsmith, A., *Wireless Communications*, Standford University, **2004**.
- [51] Horst, R. ve Thoai, N. V., DC Programming: Overview, *Journal of Optimization Theory and Applications*, 103, 1-43, **1999**.
- [52] An, L. T. H. ve Tao, P. D., DC Programming and DCA For Nonconvex Optimization: Theory, Algorithm And Applications, *The International Conference on Approximation Methods and Numerical Modelling in Environment and Natural Resources*, **2009**.
- [53] Tuy, H., *Convex Analysis And Global Optimization*, KLUWER ACADEMIC, **1998**.
- [54] Anonim, GSM, <http://tr.wikipedia.org/wiki/GSM>, (Mart, **2014**).
- [55] Garcia-Alis, D., Stirling, I. ve Stewart, B., Introduction to LTE, Steepest Ascent, <http://www.steepestascent.com>, (Kasım, **2012**)
- [56] Anonim, 4G Specifications and releases, <http://www.3gpp.org/specifications/releases>, (Kasım, **2012**).
- [57] Anonim, 3GPP LTE-Evolved UTRA-Radio Interface Concepts, <http://ecee.colorado.edu/ecen4242/LTE/radio.htm>, (Kasım, **2012**).
- [58] Wannstrom, J., *LTE-Advanced*, for 3GPP, **2012**.
- [59] Ghosh, A., Ratasuk, R., Mondal, B., Mangalvedhe, N. ve Thomas, T., LTE-Advanced: Next-Generation Wireless Broadband Technology, *IEEE Wireless Communication*, **2010**.
- [60] Brüggem, T., *R&S TS8980 Test System Analyzes LTE Quality Indicators: CQI, PMI and RI*, Wireless Technologies, **2011**.

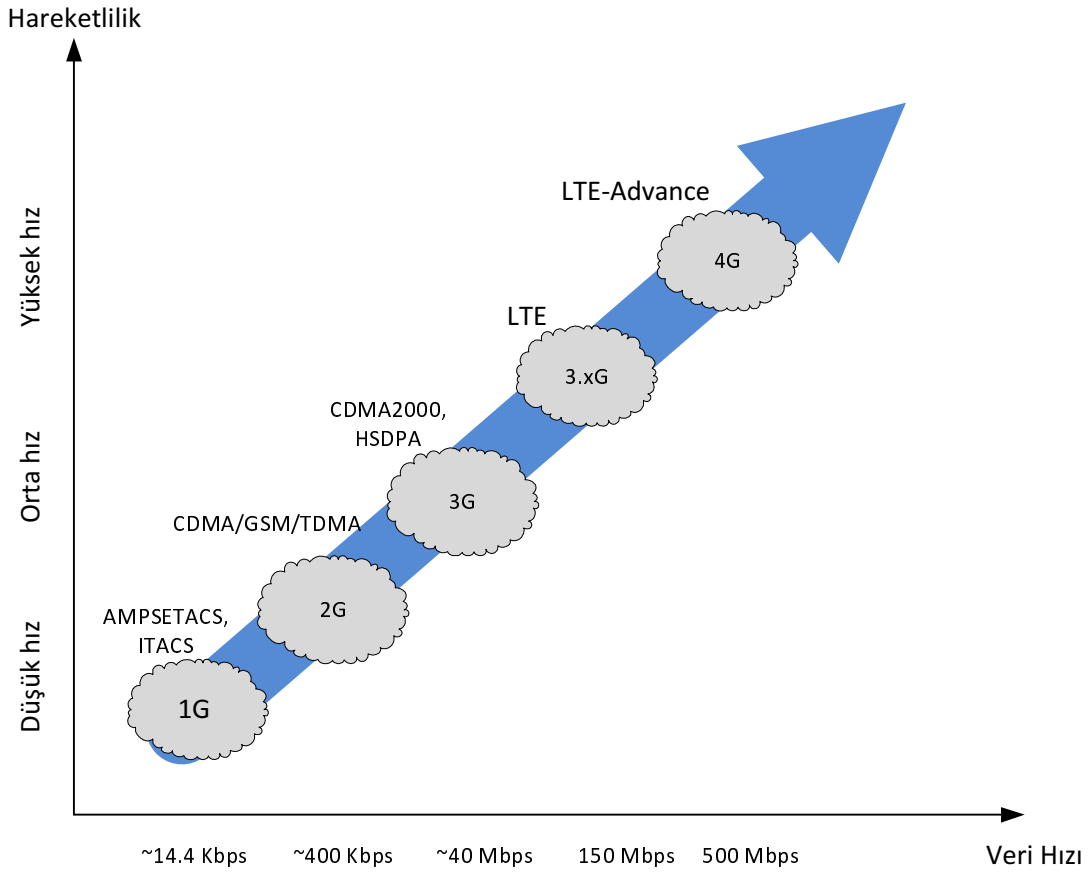
- [61] Taoka, H., Nagata, S., Kakishima, Y., She, X. ve Kusume, K., *MIMO and CoMP in LTE-Advanced*, NTT DOCOMO Technical Journal,12, **2010**.
- [62] Xu, J., *LTE-Advanced Signal Generation and Measurement Using System*, Agilent EEsof EDA, **2011**.
- [63] Lee, J., Kim, Y., Lee, H., Ng, B. L., Mazzaresse, D., Liu, J., Xiao, W. ve Zhou, Y., Coordinated Multipoint Transmission and Reception in LTE-Advanced Systems, *IEEE Communications Magazine*, **2012**.
- [64] Logroño, G. C., *LTE-Advanced Release 10*, Lunds Universitet, **2010**.
- [65] Lopez-Perez, D., Güvenç, İ., De La Roche, G., Kountourise, M., Quek, T. Q. S. ve Zhang, J., Enhanced Intercell Interference Coordination Challenges in Heterogeneous Networks, *IEEE Wireless Communications*, **2011**.
- [66] Boudreau, G., Anicker, J. P., Chang, R., Wang, N. ve Vrzic, S., Interference Coordination and Cancellation for 4G Networks, *IEEE Communication Magazine*, **2009**.
- [67] Pauli, V., Naranjo, J. D. ve Seidel, E., *Heterogeneous LTE Networks and Inter-Cell Interference Coordination*, Nomor, White Paper, **2010**.
- [68] Toland, J. F., Duality In Non-Convex Optimization, *Journal Of Mathematical Analysis And Applications*, 66, 399 - 415, **1978**.

A. LTE VE LTE-A

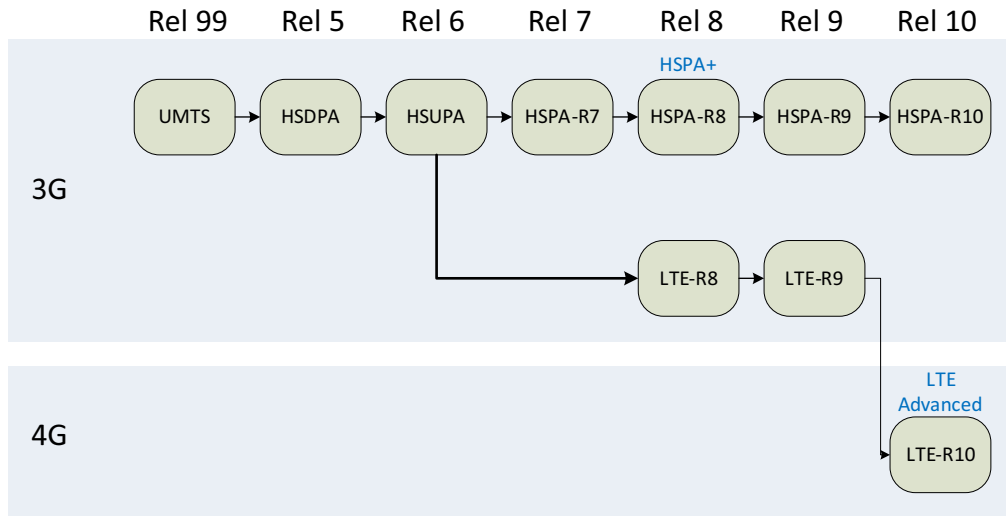
Tarihsel açıdan bakıldığında iletişim sistemleri hem veri hızlarını hem de kullanıcı hareketliliğini arttırmaya yönelik gelişmiştir. AMPSETACS, ITACS sistemleri 1G olarak adlandırılmaktadır. Bu sistemler analog iletişim üzerine kurulmuştur ve veri hızları çok düşük seviyededir. Bunun yanında hareketliliği de çok düşüktür [54]. Her ne kadar günümüzde pek örneği kalmasa da evimizde kullandığımız telsiz telefonları bu gruptan düşünebiliriz. Daha sonra gelen nesilde, Türkiye’de hala kullanılan GSM mevcuttur. Bu sistemde TDMA ve Frekans Bölümlü Çoklu Erişim (Frequency Division Multiple Access, FDMA) kullanılmaktadır. Bu sistemin de ana hedefi sesli iletişimi desteklemektir. İlerleyen zamanlarında paket mesaj servisi eklenerek veri hızında belli bir kademe ileri gidilmiş, buna ek olarak GPRS ve sonrasında 2.5G diye adlandırılan EDGE ile 3G veri hızları yakalanmaya çalışılmıştır. Hareketlilik GSM’in de sorunlarından biri olmuştur. 250 km/sa hızla giden bir taşıtın üzerinde (örn. hızlı tren) GSM önemli bağlantı sorunları yaşamaktadır. Bir sonraki nesil olan 3G de günümüzde ülkemizde kullanılmaktadır. 3G’de daha yüksek veri hızı ve bant genişliğinin daha verimli kullanılması amaçlanmıştır [54]. Bu nesilde ortaya çıkan HSDPA ve HSUPA ile veri hızları daha da arttırmıştır ve şu anda kullanılan LTE’yi meydana getirmektedir. LTE tabiri, sıkça 4G yerine kullanılsa da bu yanlış bir kullanımdır. 3GPP aşağı yukarı senede bir kez yeni yayım çıkarmaktadır. Bunlardan LTE-R8 ve LTE-R9 yayımları, 3G içinde sayılırken LTE-R10 ve sonrası yayımları 4G/LTE-A olarak adlandırılmaktadır [55]. Şekil A.2’de bu ayırım net bir biçimde gösterilmiştir. Günümüzde en son çıkan yayım LTE-R12’dir. LTE-R13’ün çalışma planı yayınlanmış, fakat henüz gereksinimler yayımlanmamıştır, 2016’ya kadar bu yayımdaki çalışmaların bitirileceği öngörülmektedir [56].

LTE’nin günümüze getirdiği en önemli yenilik yüksek veri hızlarına ulaşabilmesidir. Buna ek olarak, LTE, yüksek spektral verimlilik, düşük bekleme süreleri sağlar ve değişik bant genişliklerini destekler. LTE’nin getirdiği yeniliklerden bazıları;

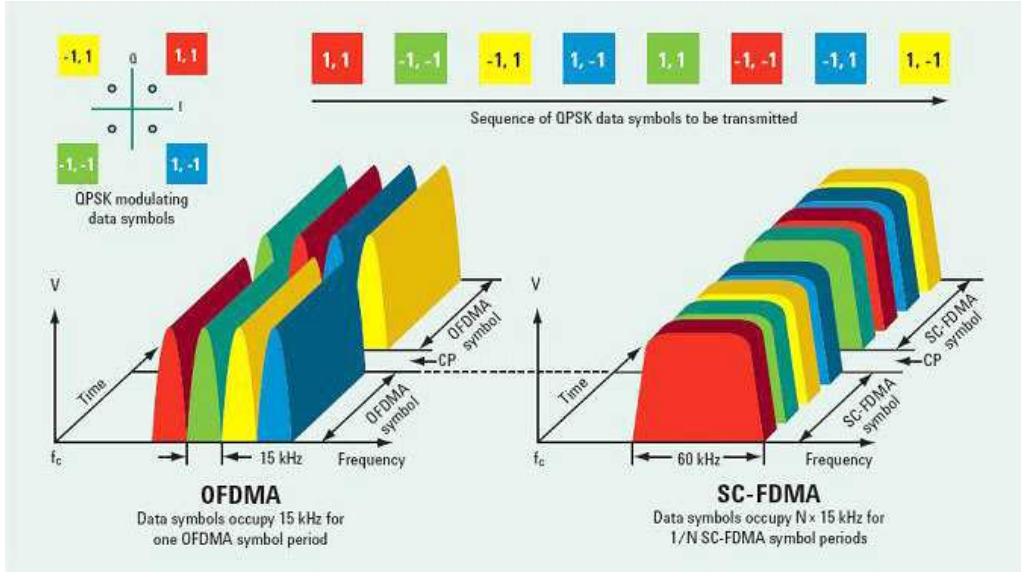
- **İniş yolunda, OFDM’nin çok kullanıcılı çeşidi olan OFDMA.** Bu özellik çok yönlü girişimin engellenmesi açısından sisteme bir sağlamlık kazandırır. Bunu çok giriş çok çıkış (multiple input multiple output, MIMO) anten sistemleri ve frekans uzayında kanal-bağımlı planlama ile birleştirerek başarır.
- **Çıkış yolunda, dinamik bant genişliği ile SC-FDMA.** SC-FDMA, düşük tepe-



Şekil A.1. Telsiz ağların tarihsel gelişimini gösteren çizge



Şekil A.2. Tarihsel süreçte 3G ve 4G ayrımı



Şekil A.3. QPSK kiplemesi için OFDMA ve SC-FDMA karşılaştırımı [57]

ortalama güç oranına sahiptir. Bu da kullanıcı aygıtlarının daha az güç harcamasını sağlar. Bu bakımdan iletim güç verimliliğini arttıran bir araçtır.

- **MIMO sistem modeli.** LTE'de veri hızlarının ve spektral verimliliğini arttıran en önemli özelliktir. MIMO modeli, alıcıda ve vericide iki veya dört antenle sağlanır. Bu sayede, girişim düşürülüp yüksek hızlara ulaşılabilir. Uzamsal çoklama ise dört katmana kadar çıkabilir.
- **Düşük bekleme süreleri,** düşük transfer gecikmeleri ve düşük kurulum zamanı sayesinde sağlanır. Düşük bekleme süreleri, ses ve video transferi gibi bir çok uygulama için en temel gereksinimlerden biridir.
- LTE, 1.4 MHz ile 20 MHz arasında çeşitli bant genişliklerini desteklemektedir.

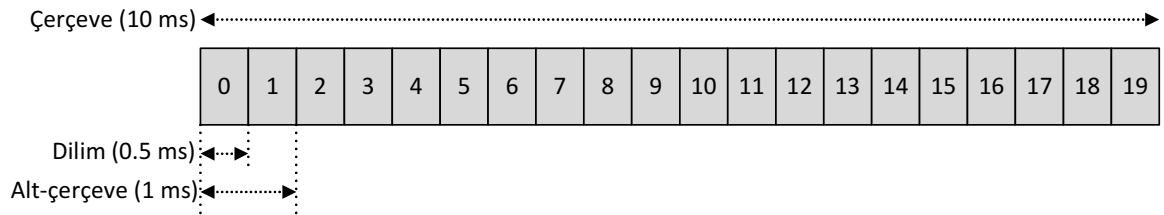
Bunların yanında bir sistemin LTE olması için bazı gereksinimler vardır. Bunlar sistemin kullanıcı kapasitesi, asgari veri hızı, spektral verimliliği gibi birçok parametreyle ölçülür [58]. Özetle LTE-R8'in gereksinimleri Çizelge A.1'de görülebilir.

LTE'de iki farklı ikileme yöntemi kullanılır. Bunlar Frekans Bölümlü İkileme (Frequency Division Duplexing, FDD) ve Zaman Bölümlü İkileme (Time Division Duplexing, TDD)'dir. Her iki ikileme yöntemi için de farklı çerçeve yapıları vardır. FDD çerçeve süresi 10 ms'dir ve 10 tane alt-çerçeveden oluşur. Her alt-çerçeve ise her biri 0.5 ms'lik iki tane dilimden oluşur. Şekil A.4'te bunun örneği gösterilmiştir. Diğer ikileme

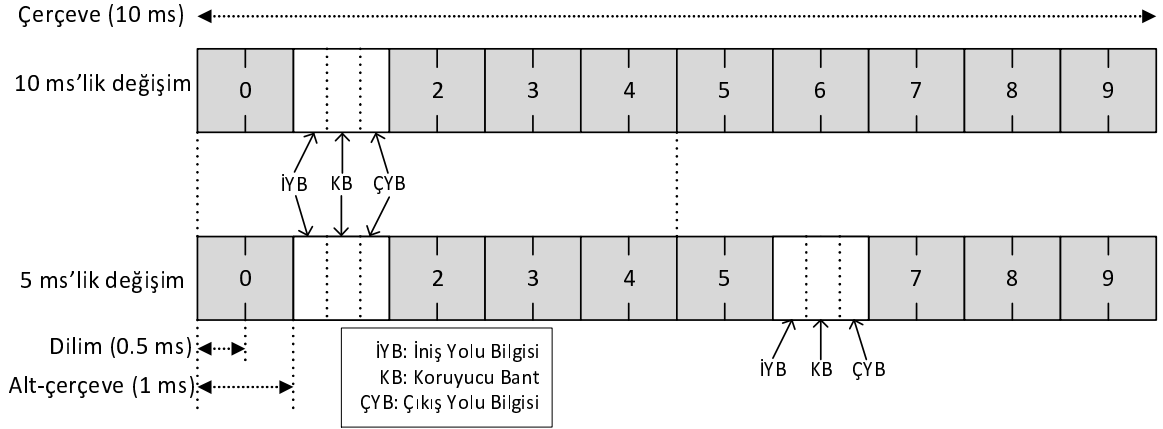
LTE-R8	Gereksinimler
Veri hızı	ÇY: 100 Mbps İY: 50 Mbps
Spektral verimlilik	ÇY: 5 bps/Hz İY: 2.5 bps/Hz
Desteklenen bant genişliği	1.4, 3, 5, 10, 15, 20 MHz
Bekleme süresi	< 5 ms
VoIP kapasitesi	Hücre başına ve 5 MHz başına 200 aktif kullanıcı
Hareketlilik	- 0 km/sa'dan 15 km/sa için eniyi - 120 km/sa'ya kadar yüksek performansa erişilmeli - Bağlantı 350 km/sa'ya kadar korunmalıdır.
Kapsama alanı	- 5 km'ye kadar veri hızı, spektrum verimliliği ve hareketlilik hedefleri karşılanmalı. - 30 km'de az da olsa performans düşüşleri tolere edilebilir.

Çizelge A.1. LTE gereksinimleri çizelgesi

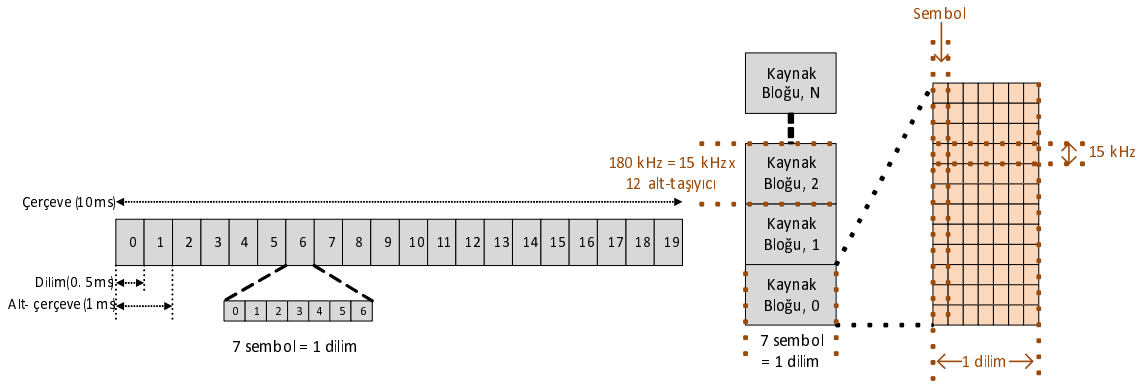
yöntemi TDD'nin çerçeve yapısı ise daha farklıdır. TDD'nin yapısından dolayı, çıkış yolunda bir veri varken iniş yolu beklemektedir. Bu ters durum için de geçerlidir. Bu sebepten TDD çerçevesinde her dilimde üç parça vardır. İlk parça iniş yolu bilgisini taşıırken üçüncü parça çıkış yolu bilgisini taşır. Birinci ve üçüncü parça arasında bir koruma bandı vardır. Bu durum Şekil A.5'te net bir şekilde ortaya konmuştur. TDD çerçeve yapısı da FDD gibi 10 ms'dir. Fakat TDD yapısında sistemin durumuna göre çerçevelerin içinde 5 ms de çerçevenin ilk 5 ms'lik kısmında gönderilen bilgiler tekrar gönderilebilir [55].



Şekil A.4. FDD çerçeve yapısı



Şekil A.5. TDD çerçeve yapısı



Şekil A.6. LTE'de kaynak bloğu

Çerçevelerin içindeki her dilim frekans ve zaman ekseninde bilgi taşır. LTE'de bu dilimlere kaynak bloğu ismi verilmiştir. LTE'nin en önemli özelliklerinden birisi de kaynak bloklarının tahsis edilmiş biçimidir. Her kaynak bloğu, zaman ekseninde yedi OFDM sembolüne ayrılır (Döngülü önek koymama durumuna göre altı sembol de olabilir). Frekans ekseninde ise 15 kHz'lik on iki tane alt-taşıyıcıdan oluşur. Dolayısıyla her kaynak bloğu, frekans ekseninde 180 kHz'lik bir bant kaplar. Bu değerler oluşturulurken sistemin karşılaşılabileceği en büyük gecikme süreleri ve Doppler kayması göz önüne alınmıştır. Bu değerler alıcı ve verici arasındaki kanalların tutarlılık bant genişliğine ve zamanına etki etmektedir.

LTE'de en kısa kodlanmış iletişim bir İletim-Zaman Aralığı'nda (Transmission Time Interval, TTI) yapılır. Bir TTI, iki dilimden oluşur. Yani, LTE'de en düşük tahsis edilebilecek kaynak, 1 ms ve 180 kHz'den oluşur.

A.1 LTE'de çıkış yolu

Kullanıcılar, baz istasyonlarıyla iletişim halindeyken çıkış yolu kanalını kullanırlar. Bunun yanında sinyallerinin çözülebilmesi için, kanalın kestirilmesi için ve senkronizasyonun sağlanabilmesi için veri sinyalleri haricinde bazı sinyaller gönderirler. LTE'de çıkış yolu için tanımlanmış üç farklı kanal ve iki farklı sinyal vardır. Bu kanallar;

1. Fiziksel Çıkış yolu Paylaşım Kanalı (Physical Uplink Shared Channel, PUSC),
2. Fiziksel Çıkış yolu Kontrol Kanalı (Physical Uplink Control Channel, PUCC),
3. Fiziksel Rastgele Erişim Kanalı'dır (Physical random access channel, PRACH).

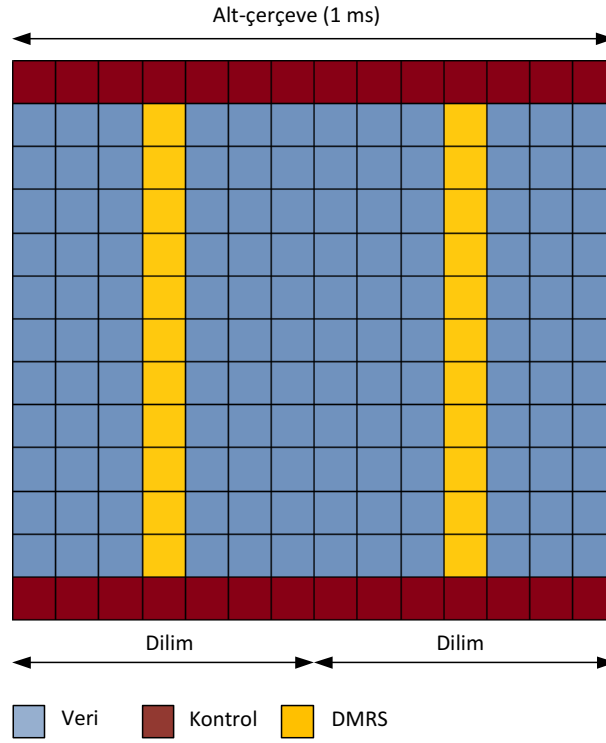
PUSC'de kullanıcı verileri taşınır. İletişim için hayli önemli olan kanal durum bilgisinin olduğu CQI, vericinin hangi kod matrisini kullanması gerektiğini söyleyen PMI, kanal matrisinin kerte bilgisinin taşındığı RI bitleri ve planlama bilgisi bitleri PUCC'de taşınır. Son olarak da iletişim başlangıç bitleri PRACH'ta taşınır.

Sinyaller ise;

1. Sonda Referans Sinyali (Sounding Reference Signal, SRS),
2. Kip çözme Referans Sinyali'dir (Demodulation Reference Signal, DMRS).

SRS, her iki alt-çerçeve de bir, alt-çerçevenin başında gönderilir. Bu sinyali baz istasyonu, kullanıcının kanal kalitesini kestirmek için kullanır. DMRS ise, yine baz istasyonu tarafından, evreuyumlu sezim yapmak için kullanılır. Bunun için de yine kanal kestirimi yapılmasında kullanılır [59].

Şekil A.7'de LTE'de çıkış yolu kaynak bloğu gösterilmiştir [59]. Görüldüğü gibi DMRS tüm alt-taşıyıcılarda ve belli zaman aralıklarıyla tekrar etmektedir. Kontrol sinyalleri ise tüm zaman aralıklarında fakat 11 alt-taşıyıcı aralıkla gönderilmektedir. Yine burada en kötü kanal durumları ele alınarak tutarlılık bant genişliğine ve zamanına göre bu seçimler yapılmıştır.



Şekil A.7. LTE'de çıkış yolu kaynak bloğu yapısı

Bunların yanında kontrol kanalında taşınan Kanal Kalite Göstergesi (Channel Quality Indicator, CQI), Önkodlama Matrisi Göstergesi (Precoding Matrix Indicator, PMI) ve Kerte Göstergesi'ne (Rank Indicator, RI) daha detaylı bakalım.

Kanal Kalite Göstergesi (CQI)

Bu göstergeç, analiz edilmiş kanalın blok hata oranının %10'u geçmeyecek şekilde, vericide kullanılması gereken en yüksek kipleme ve en yüksek kod oranını gösterir. 0'dan 15'e kesikli değerlerden oluşur. CQI kullanıcı tarafından farklı yöntemlerle baz istasyonuna iletilebilir. Örneğin, periyodik olarak kontrol kanalı kullanılarak iletir ya da periyodik olmayarak iletilebilir. Aperiodyik durumda ise baz istasyonunun kullanıcıdan bu raporu açıkça istemesi gerekir [60].

Önkodlama Matrisi Göstergesi (PMI)

Bu göstergeç, baz istasyonunda hangi veri akışının hangi antenlere haritalandırılacağını gösterir. Bu göstergenin kullanıcıda başarılı seçilmiş olması, baz istasyonundan enbüyük sayıda veri bitlerinin gönderilmesini sağlayacaktır. Bu da kullanıcının tüm kanal katmanlarına ulaşabiliyor olması anlamına gelmektedir [60], [61].

CQI index	Modulation	Target code rate	Imcs	Information bit payload (subframes 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9)	Binary channel bits per subframe (subframes 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9)	Actual code rate
0	out of range	out of range	DTX	–	12600	–
1	QPSK	0.0762	0	1384	12600	0.1117
2	QPSK	0.1172	0	1384	12600	0.1117
3	QPSK	0.1885	2	2216	12600	0.1778
4	QPSK	0.3008	4	3624	12600	0.2895
5	QPSK	0.4385	6	5160	12600	0.4114
6	QPSK	0.5879	8	6968	12600	0.5549
7	16QAM	0.3691	11	8760	25200	0.3486
8	16QAM	0.4785	13	11448	25200	0.4552
9	16QAM	0.6016	16	15264	25200	0.6067
10	64QAM	0.4551	18	16416	37800	0.4349
11	64QAM	0.5537	21	21384	37800	0.5663
12	64QAM	0.6504	23	25456	37800	0.6741
13	64QAM	0.7539	25	28336	37800	0.7503
14	64QAM	0.8525	27	31704	37800	0.8394
15	64QAM	0.9258	28	31704	37800	0.8394

Şekil A.8. CQI indeksleri çizelgesi [60]

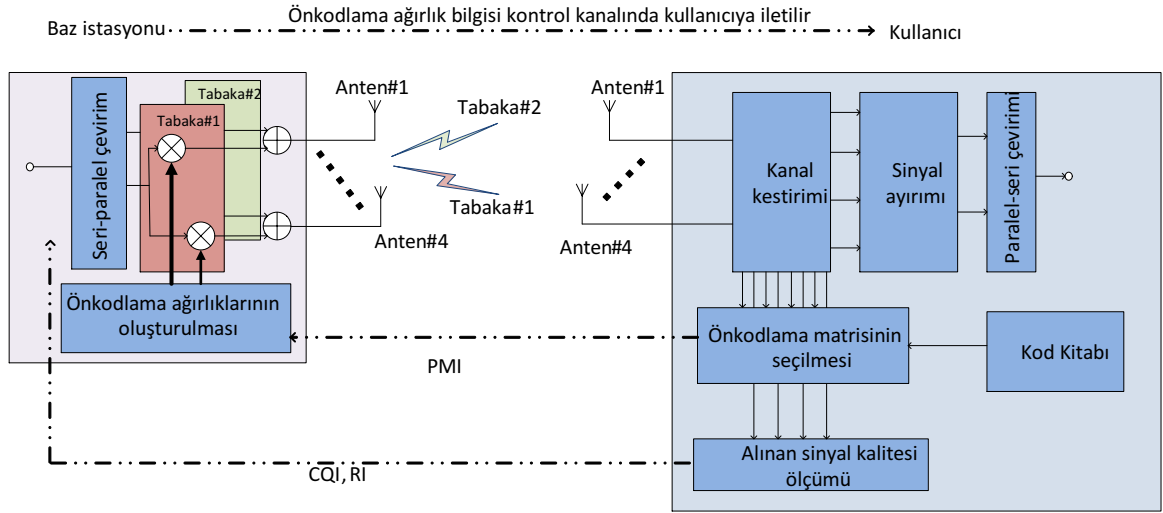
Kerte Göstergesi (RI)

Baz istasyonuna giden bu bilgi, kullanıcı ve baz istasyonunun arasındaki kanalın kertesini belirler. Bu şekilde baz istasyonunda, sinyalin kaç tabakada gönderileceği, ya da iniş yolunda kaç farklı sayıda sinyal akışı olacağı belirlenmiş olur. RI'nın ana amacı iniş yolundaki kanalın tam kerteli olmasını sağlamak ve tüm bant genişliğini verimli kullanarak kanal kapasitesini enbüyülmektir [60], [61].

Şekil A.9'da, 4×4 MIMO'da Kanal Durum Bilgisinin (Channel State Information, CSI) akış şeması verilmiştir. Görüldüğü gibi kullanıcıda olan kod kitabından seçilen bir kodla PMI oluşturulur ve baz istasyonuna bu bilgi gönderilir. Bu bilgi baz istasyonunda tabaka sayısını belirlemek için kullanılır. Şekil A.9'daki örnekte, kerte sayısı iki olduğu için tabaka sayısı da iki olarak verilmiştir. Sinyallerin kalitesine göre ise CQI, kipleme çeşitini belirlemek için kullanılır. RI ise kapasiteyi enbüyülmek için gereken sinyal işleme tekniklerinde kullanılır. Bu yüzden, baz istasyonunda sinyal tabakalara ayrılmadan daha önce kullanılırlar.

A.2 LTE'den LTE-A'ya geçiş

LTE her ne kadar, geliştirilmiş en iyi sistem olsa da, belirlenen 4G kıstaslarını sağlamamaktadır. Bunların en önemlisi de veri hızıdır. Veri hızındaki artışı sağlamak için kullanılacak akla ilk gelen yöntem de bant genişliğini arttırmaktır. LTE-A'da gelen en önemli özellik de taşıyıcı birleştirme (Carrier Aggregation) denilen özelliğinin getirilmesidir.



Şekil A.9. 4×4 MIMO'da kertesı 2 olan kanal için CSI mekanizması

LTE-A'da gelen yenilikleri özetlersek;

- LTE'de bant genişlikleri farklı genişliklerdedir. Çıkış yolu ve iniş yolunda kullanılan bant genişliğinin aynı olması gerekir. Fakat LTE-A'da bant genişlikleri iniş yolunda ve çıkış yolunda farklılık gösterebilir ve desteklenen bant genişliği 20 MHz'den 100 MHz'e kadar çıkmıştır.
- LTE-A'da geliştirilmiş MIMO teknikleri sayesinde, spektral verimlilik, ortalama veri hızları ve hücre-kenarı kullanıcılarının performansı artmıştır. LTE-A'da iniş yolunda 8×8 MIMO'ya, çıkış yolunda ise 4×4 MIMO'ya kadar destek vardır.
- Röleleme sayesinde kapsama alanı sorunu çözülmekte ve sistemin kapasitesi artırılmaktadır.
- Anten sayısının artmasıyla iniş yolunda 8-tabakalı iletim desteklenebilmektedir.

LTE-A'nın gereksinimleri Çizelge A.2'de özetlenmiştir. Bu gereksinimlerin karşılanabilmesi için birçok teknik kullanılmaktadır. Bunların arasında daha önce bahsi geçen taşıyıcı birleştirme, iniş yolunda Koordineli Çok-Noktalı iletim ve alım (Coordinated Multi-Point transmission and reception, CoMP), iniş yolunda 8-tabakalı MIMO ile uzamsal çoklama, çıkış yolunda ise 4-tabakalı MIMO ile uzamsal çoklama vardır.

LTE-A	Gereksinimler
Tepe veri hızı	ÇY: 1 Gbps İY: 500 Mbps
Enbüyük spektral verimlilik	ÇY: 30 bps/Hz İY: 15 bps/Hz
Desteklenen bant genişliği	20-100 MHz arasına kadar ÇY: 100 MHz'e kadar İY: 40 MHz'e kadar
Bekleme süresi	LTE'den daha az
VoIP kapasitesi	LTE'den 3 kat daha fazla
Hareketlilik	LTE ile aynı
Kapsama alanı	LTE ile aynı fakat yerel hücrelerin kullanılmasına yönelik eniyileştirilmeli

Çizelge A.2. LTE-A'nin getirdiği yenilikler

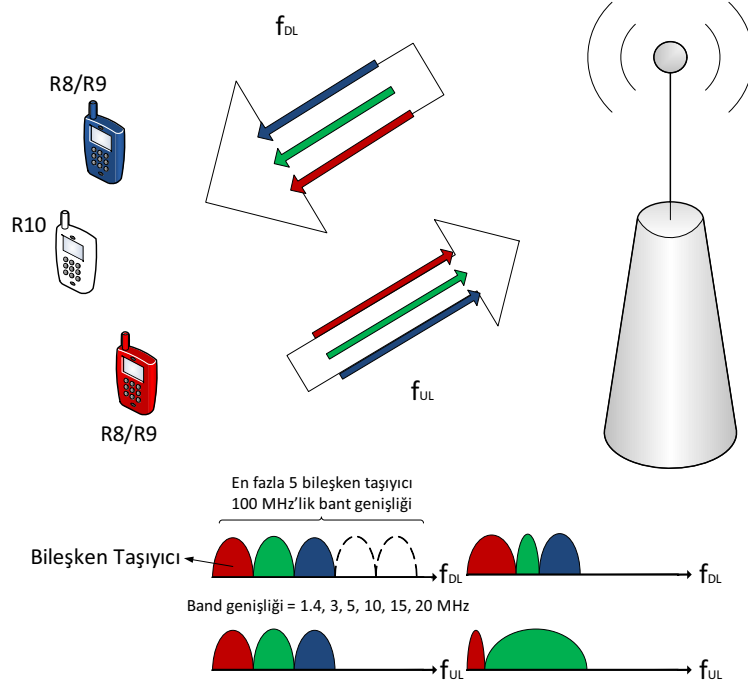
A.2.1 Taşıyıcı Birleştirme

LTE-A'da (R10 ve sonrası) taşıyıcıları birleştirirken bu durumun LTE (R8/R9) kullanıcıları için uyumlu olması durumu önemlidir. Dolayısıyla taşıyıcı birleştirme işlemi LTE'de kullanılan taşıyıcılar üzerinden olur. Bu işlem hem FDD'de hem de TDD'de kullanılabilir. Her birleştirilen taşıyıcıya bileşken taşıyıcıyı denir. Yani bileşken taşıyıcı LTE'deki 1.4, 3, 5, 10, 15 ve 20 MHz'lik bant genişliklerinden birine sahiptir. Bununla da LTE ile uyumluluk sağlanır. En fazla beş bileşken taşıyıcı birleştirilebilir. Bunun sonucu olarak da iniş yolunda enbüyük ulaşılabilecek olan bant genişliği 100 MHz'dir.

İniş yolunda ve çıkış yolunda farklı sayıda taşıyıcı birleştirilebilir. Ayrıca birleştirilen taşıyıcılar farklı bant genişliklerinde olabilirler. İniş yolunda birleştirilen taşıyıcıların sayısı çıkış yolunda birleştirilenlerden daha fazladır. Bu sebepten de çıkış yolunda ulaşılabilecek enbüyük bant genişliği 40 MHz'dir.

Şekil A.10'da görüldüğü gibi LTE-A (R10) kullanıcısı üç bileşken taşıyıcının birleştirilmesiyle oluşmuş taşıyıcıyı kullanırken, LTE (R8 ve R9) kullanıcıları da kendilerine tahsis edilmiş taşıyıcıları (kırmızı ve mavi taşıyıcılar) kullanmaktadır.

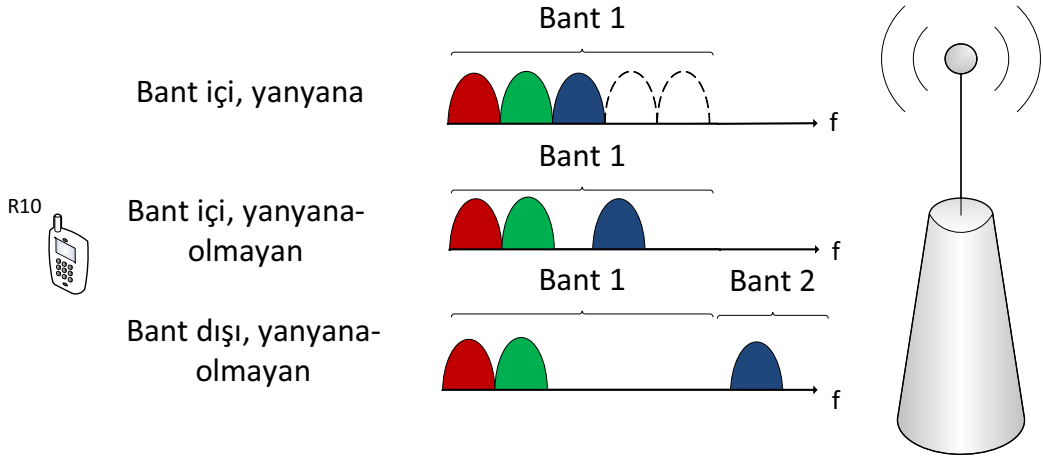
Taşıyıcı birleştirme işlemi üç şekilde yapılabilir [59]. Birincisi, birleştirmenin en ko-



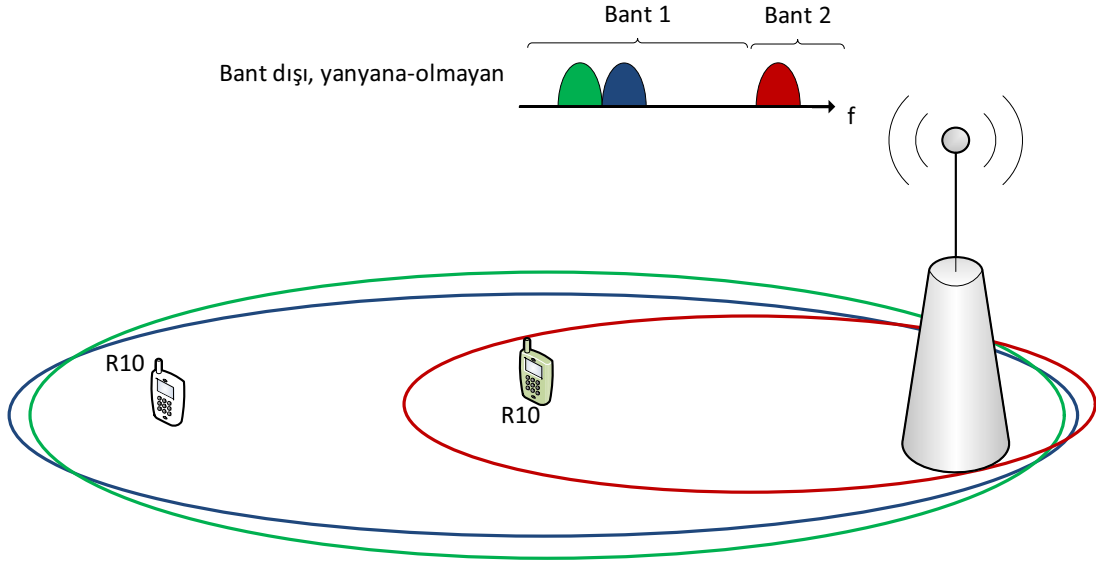
Şekil A.10. Taşıyıcı birleştirme şeması

lay yolu denilebilecek aynı bant içinde yanyana olan taşıyıcıları birleştirmektir. Buna bant-içi yanyana birleştirme denir. Fakat bu durum, sıklık ekseninde bazı bant tahsisi senaryolarında verimli olmayabilir. Bu yüzden bant-içi yanyana-olmayan birleştirme ve bant-dışı yanyana-olmayan birleştirme şeklinde iki farklı yapı kullanılmaktadır. Bant-içi yanyana-olmayan birleştirmede, 100 MHz'lik bant içindeki taşıyıcılardan yanyana olmayanlar seçilerek bir kullanıcıya tahsis edilirken, bant-dışı yanyana-olmayan birleştirmede farklı 100 MHz'lik bantlardan taşıyıcılar birleştirilerek kullanıcılara tahsis edilir [62]. Şekil A.11'de bu yöntemler resmedilmiştir.

Taşıyıcı birleştirme yöntemiyle farklı hücre bölgelerine farklı yayınlar yapılabilir. Örneğin, Şekil A.12'de mavi taşıyıcı, tüm hücredeki bağlantıyı sağlayan bilgileri taşıırken, yeşil taşıyıcı hem beyaz kullanıcıya hem de yeşil kullanıcıya ve kırmızı taşıyıcı da sadece yeşil kullanıcıya hizmet verir. Kırmızı taşıyıcıya tahsis edilen güç daha azdır. Dolayısıyla, hücrenin belli bölgesinde daha güçlü yayın yaptığı için bu taşıyıcıdaki bilgiler sadece siyah kullanıcıya iletilir. Böylece yeşil kullanıcı üç taşıyıcıdan da bilgi almış olur. Fakat beyaz kullanıcı kırmızı taşıyıcının taşıdığı bilgileri alamaz.



Şekil A.11. Taşıyıcı birleştirme yöntemleri

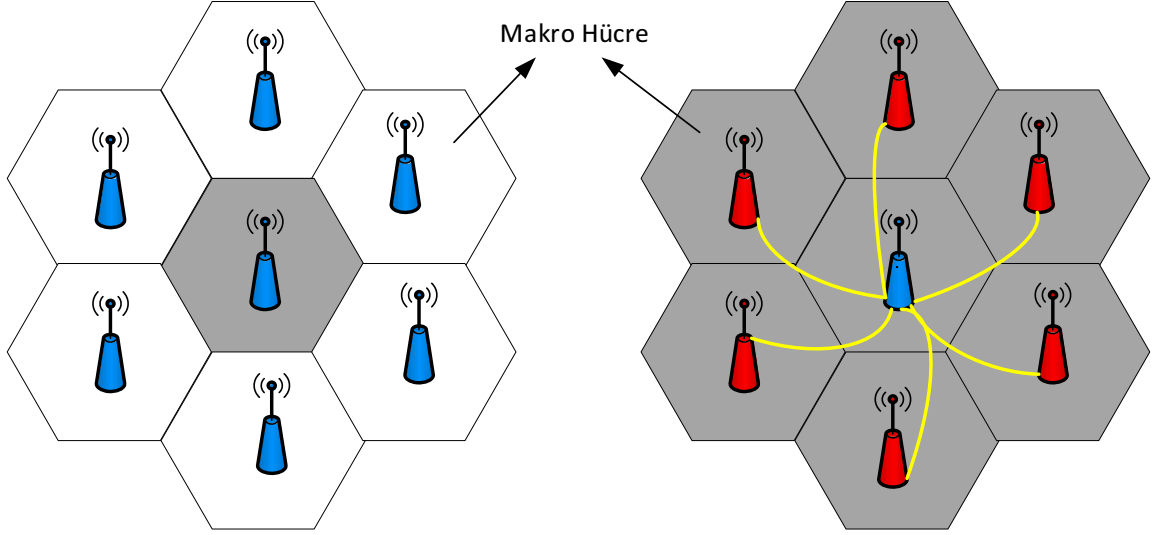


Birincil Hizmet Hücresi, Birincil Bileşken Taşıyıcı, bağlantı bilgileri

İkincil Hizmet Hücresi, İkincil Bileşken Taşıyıcı, kullanıcı verisi

İkincil Hizmet Hücresi, İkincil Bileşken Taşıyıcı, kullanıcı verisi

Şekil A.12. Taşıyıcı birleştirme sayesinde hücrenin farklı bölgelerine yapılan yayının resmedilmesi



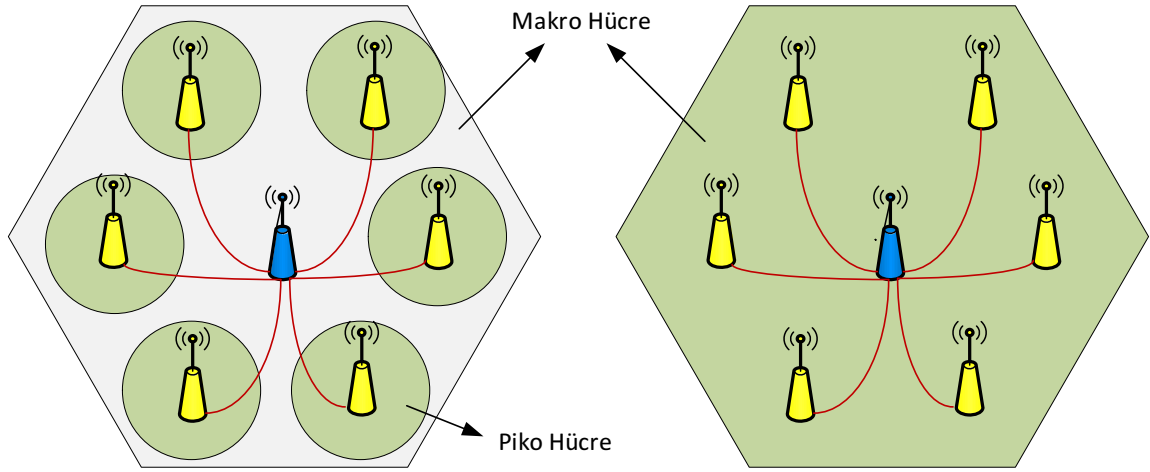
Şekil A.13. Solda senaryo 1, sağda senaryo 2 için hücrelerin geometrik gösterimi. (İçeride koyu renkte olan hücreler koordinasyonun olduğu hücre anlamına geliyor. Kırmızı istasyonlar yüksek-güçlü uzak radyo başlıklarıdır.)

A.2.2 Koordineli Çok-Noktalı İletim ve Alım (CoMP)

Taşıyıcı birleştirmeye yapılan hücre içerisinde farklı sinyal alım bölgeleri yapma işlemi, hücre içerisine yerleştirilecek dağıtılmış antenlerle ya da hücre içerisine konulacak başka küçük hücrelerle de sağlanabilir. Bu tarz iletişime CoMP denir. CoMP, kullanıcının sinyal kalitesini arttıran bir tekniktir. Bu sayede, ortak kanal girişiminin bu şekilde üstesinden gelinebilir ve yüksek veri hızlarına çıkmak daha kolaylaşır.

Bu sistemde coğrafik olarak farklı bölgelerde bulunan antenlerin birbiriyle dinamik bir şekilde koordine olması gerekmektedir. Dört tane CoMP senaryosu vardır [63].

- Senaryo 1: Tümüyle homojen dağılmış hücrelerden oluşan ve sadece bu hücrelerdeki baz istasyonunun buradaki iletişimden sorumlu olduğu iletişim senaryosudur. Günümüzdeki GSM hücrelerinin dağılımı bu şekildedir.
- Senaryo 2: Tümüyle homojen dağılmış hücrelerden oluşan ve hücreler arasında fiber kablo vs. ile iletişimin olduğu senaryodur. Burada ana hücredeki baz istasyonu, fiber kabloyla diğer hücrelerdeki yüksek-güçlü uzak radyo başlığına bağlıdır. Dolayısıyla yedi hücrenin hepsine koordineli olarak hizmet verilir.
- Senaryo 3: Makro-hücrenin içine dağılmış şekilde yerleştirilen piko veya femto-hücreler ile yapılan iletişimdir. Burada her düşük-güçlü uzak radyo başlığının bir hücre kimliği vardır ve kullanıcılar bu hücrenin kullanıcısı olurlar.



Şekil A.14. Solda senaryo 3, sağda senaryo 4 için hücrelerin geometrik gösterimi. (İçeride koyu renkte olan hücreler koordinasyonun olduğu hücre anlamına geliyor. Sarı istasyonlar düşük-güçlü uzak radyo başlıklarıdır.)

- Senaryo 4: Makro-hücresinin kapsama alanına yayılmış ve makro hücreyle aynı hücre kimliğine sahip düşük-güçlü uzak radyo başlıkları ile yapılan iletişimdir.

Senaryo 3 ve 4'te bahsi geçen yapılar, Heterojen Ağlar (Heterogenous Network, HetNets) olarak tanımlanmaktadır.

A.3 Heterojen Ağlar (HetNets)

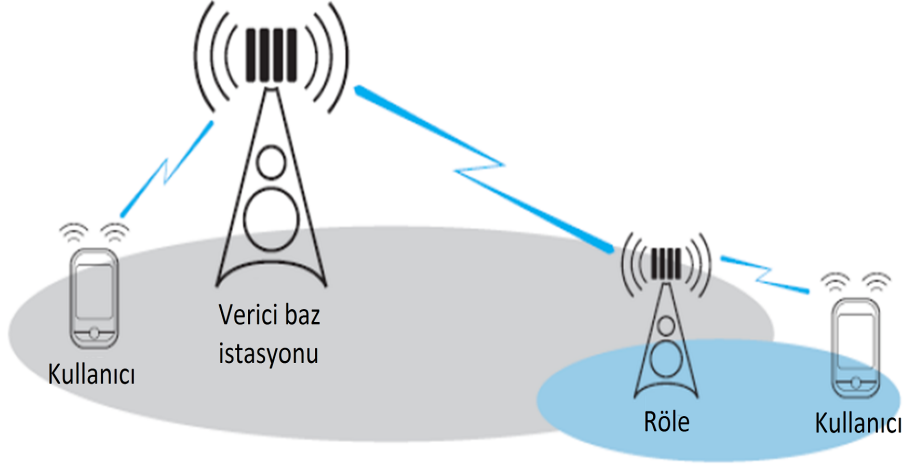
Şekil A.14'te görülen makro-hücre içine dağılmış olan düşük-güçlü uzak radyo başlıkları çeşitlilik gösterebilirler. Bunlar;

- Piko-hücre
- Femto-hücre (Ev baz istasyonu)
- Röle

olabilir. Bunlardan femto-hücreler ana baz istasyonuna fiber kabloyla bağlıdır.

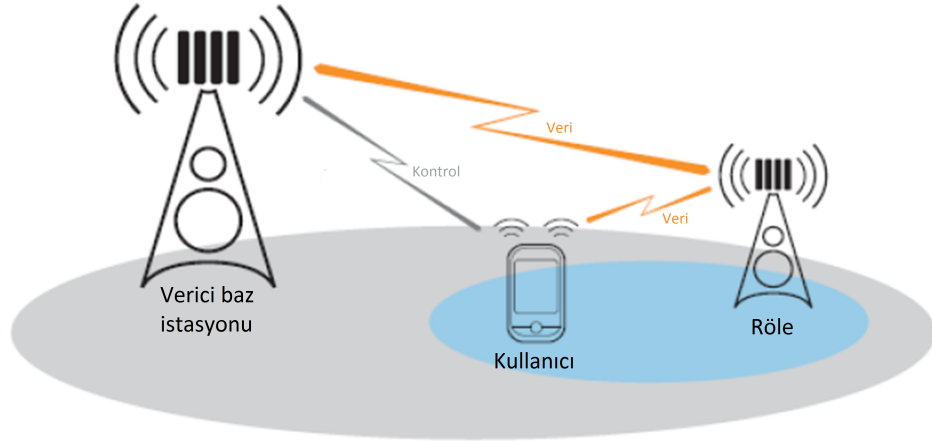
Röleler ise iki farklı şekilde bağlanabilir [64]. Bu da hangi tip röleme kullanılacağıyla ilintilidir. Tip 1 röleme şeklinde, her röle, kendi hücre kimliğine sahiptir. Röle baz istasyonundan gelen bilgiyi kullanıcıya aktarır. LTE versiyonu kullanıcılarına göre röle, aslında bir makro-hücre baz istasyonu gibidir. Böylece LTE ile tamamıyla uyumluluk sağlanmış durumdadır [64].

Tip 1 röleleme



Şekil A.15. Tip 1 röleleme şekli

Tip 2 röleleme



Şekil A.16. Tip 2 röleleme şekli

Tip 2 rölelemede, kullanıcı röleden veri alırken, baz istasyonundan hem kontrol verilerini hem de röleden gelen verinin aynısını alır. Rölenin hücre kimliği yoktur, dolayısıyla ayrıca bir hücre oluşturmaz. Bu yüzden de LTE uyumlu kullanıcılar, bu rölelerin farkına varamazlar [64]. Şekil A.16'da Tip 2 röleleme resmedilmiştir. HetNet'lerde kullanılan baz istasyonları ile bilgiler Çizelge A.3'te verilmiştir [65]. HetNet'lerde kullanılan bu istasyonların makro-hücre içine konuşlandırılması tahmin edileceği gibi çok fazla girişim yaratmaktadır. Fakat, bu ağın performansında eniyileştirilme yapılmasının maliyeti nispeten daha düşüktür. Buna ek olarak, hücreler-arası girişim düzenlemesi (intercell interference coordination, ICIC) teknikleri heterojen konuşlandırmada iyi performans elde edebilmek için kritik bir rol oynamaktadır [63], [65],

Baz istasyon tipi	İletim gücü	Kapsama
Makro-hücre	46 dBm	Birkaç km
Piko-hücre	23 – 30 dBm	< 300 m
Femto-hücre	< 23 dBm	< 50 m
Röle	30 dBm	300 m

Çizelge A.3. HetNet'lerde bulunan elemanların özellikleri

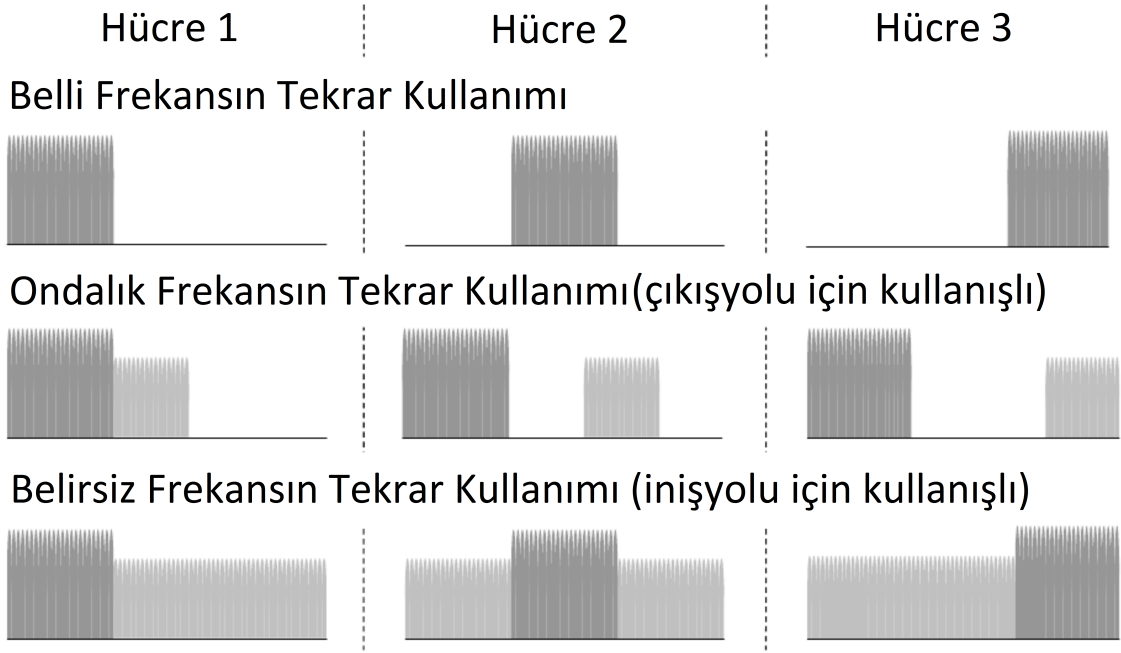
[66].

A.4 Hücreler-arası Girişim Düzenlemesi (ICIC) Yöntemleri

Girişim konusu eski nesil iletişim sistemlerinden beri süregelen bir tartışmadır. Girişimi giderebilmek için her nesilde belli yöntemler kullanılmıştır. LTE'de ve LTE-A'da hücrelerin kapsama alanlarının azalmasıyla birlikte hücre sayısının artması bu yöntemlerin bazılarının kullanılmasını zorunlu kılmıştır.

LTE'de ICIC, spektrumun ve güç dağılımlarının paylaşılması ve piko-hücrelerde kullanılan ICIC'i destekleyen X2 sinyalleşmesi yapılmaktadır [67].

- **Tüm Frekansın Tekrar Kullanımı (Full Frequency Reuse):** Bu kullanım şekli, LTE'nin temel prensiplerindedir. Tüm hücreler, tüm frekans bandını kullanabilir. Her verici antenin tekdüze gücü vardır. Bu durumda hücre-kenar kullanıcılarına iniş yolunda çok fazla girişim olur. Bunun yanında bu kullanıcılar, çıkış yolunda komşu hücreye de çok fazla girişim yaratırlar.
- **Belli Frekansın Tekrar Kullanımı (Hard Frequency Reuse, HFR):** Frekans eksenini, GSM'deki gibi her hücre kümesi için ayırılır.
- **Ondalık Frekansın Tekrar Kullanımı (Fractional Frequency Reuse, FFR):** Önceki iki yöntemin melezidir. Bant genişliği iki parçaya ayrılır. Birinci parçayı her hücre enbüyük güçle kullanırken, ikinci parça ise hücrelere özel tanımlanır ve hücreler spektrumun bu kısmında ondalık güçle iletişim yaparlar. Burada birinci parça hücre ortası kullanıcıları için, ikinci parça hücre-kenar kullanıcıları için ayrılır. Dolayısıyla, bu yöntem çıkış yolu için kullanışlıdır.
- **Belirsiz Frekansın Tekrar Kullanımı (Soft Frequency Reuse, SFR):** Bu yöntem de FFR yöntemine benzer bir stratejiye sahiptir. FFR gibi tüm bant geniş-



Şekil A.17. Üç hücreli senaryo için ICIC yöntemleri

liği iki parçaya ayrılır fakat, bu sefer her hücre tüm bandı kullanır durumdadır. Yüksek-güç bölgeleri hücre-kenar kullanıcıları için ayrılmışken, düşük-güç bölgeleri hücre-ortası kullanıcılarına tahsis edilmiştir. Bu yöntem de iniş yolunda kullanışlıdır.

Bu yaklaşımlara göre HetNet'lerde tüm spektrumu makro-hücre kullanırken, piko ya da femto-hücrelerinin spektrumun belli bir bölgesini kullanmaları iyi bir çözüm olabilir. Belirtilen yöntemler Şekil A.17'de üç hücreli senaryo için görselleştirilmiştir.

A.4.1 ICIC'in X2 sinyalleşmesiyle desteklenmesi

ICIC yöntemleri, pratik olarak kolayca uygulanabilecek kaynak tahsisi yöntemleridir. Farklı baz istasyonları arasında herhangi bir iletişim olmadan istatistiksel yöntemlerle uygulanabilir. Fakat daha iyi performanslara ulaşabilmek için bu yöntemlerin dinamik olarak kullanılması gerekir. Bu da baz istasyonları arasında bir bilgi alışverişinin sağlanmasıyla olur. İşte bu tartışmada, X2 sinyalleşmesi ortaya çıkmaktadır. Baz istasyonlarının birbiriyle haberleşmesini sağlayan bu yapı ICIC'ı desteklemektedir.

X2 sinyalleşmesinde üç tane göstergeç vardır.

İzafi Darbant İletim Gücü Göstergesi (Relative Narrowband Transmit Power Indicator, RNTP):

Bu bilgi komşu baz istasyonuna iniş yolunda gönderilir. Kaynak bloğu başına 1 bitten oluşur ve aynı kaynak bloğunu kullanan komşu baz istasyonunu, o kaynak bloğunda belirlenen eşik değerden fazla güçle iletim yapacağı konusunda uyarır. Böylece, komşu hücredeki baz istasyonu o kaynak bloğunu kullanan kullanıcılarının fazla girişime maruz kalacağını bilir ve onlara, kullanıcıların CQI raporlarına göre, başka bir kaynak bloğu tahsis eder.

Yüksek Girişim Göstergesi (High Interference Indicator, HII):

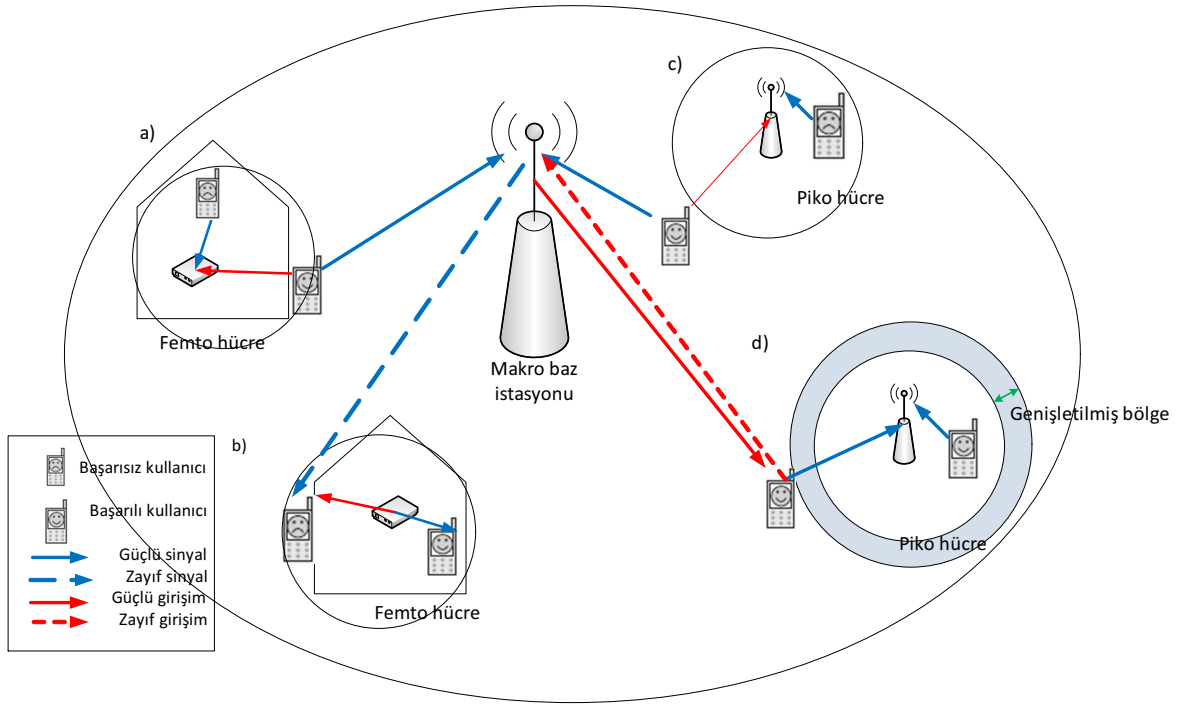
Bu göstergeç çıkış yolunda RTNP'nin benzeri biçimde çalışır. Eğer komşu hücreler yakın gelecekte yüksek girişime maruz kalacaklarsa, kaynak bloğu başına 1 bit gönderilerek bu durum komşu hücreye bildirilir. Genelde, hücre-kenar kullanıcılarının kullandığı kaynak blokları bu göstermeçten etkilenir.

Yüksek-doş Girişim Göstergesi (Interference Overload Indicator, IOI):

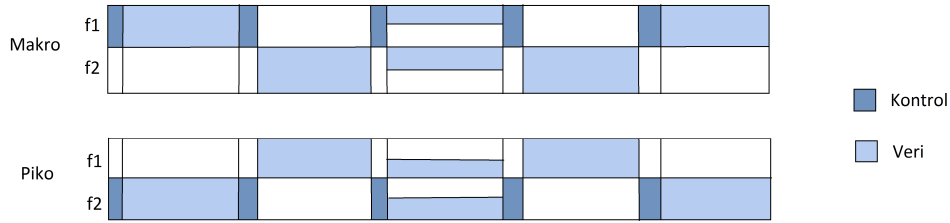
Diğer iki mesaj sinyali baz istasyonlarını önceden düzenli olarak uyarırken, bu göstergeç sadece baz istasyonu çıkış yolunda yüksek girişim sezdiğinde tetiklenir. IOI, kullanıcılarının muhtemel girişim kaynağı olan komşu baz istasyonuna yollanır. Bu mesaj kaynak bloğundaki girişimin seviyesini düşük, orta ve yüksek seviye olarak gösterir.

A.4.2 LTE-A'da ICIC yöntemleri

X2 sinyalleşmesindeki bu mesajların varlığı, makro-hücre, piko-hücre ve röle arasındaki çoğu girişim senaryosunda, girişimin kaldırılması konusunda yardımcı olur. Fakat, bu mesajlar, femto-hücreli senaryolar için uygun değildir. Şekil A.18'de olası girişim senaryoları resmedilmiştir. Bu sebepten, yeni girişim düzenleme tekniklerinin kullanılması gerekir. Bu teknikleri frekans-uzamı tabanlı, zaman-uzamı tabanlı, güç kontrolü teknikler olarak sıralayabiliriz [65].



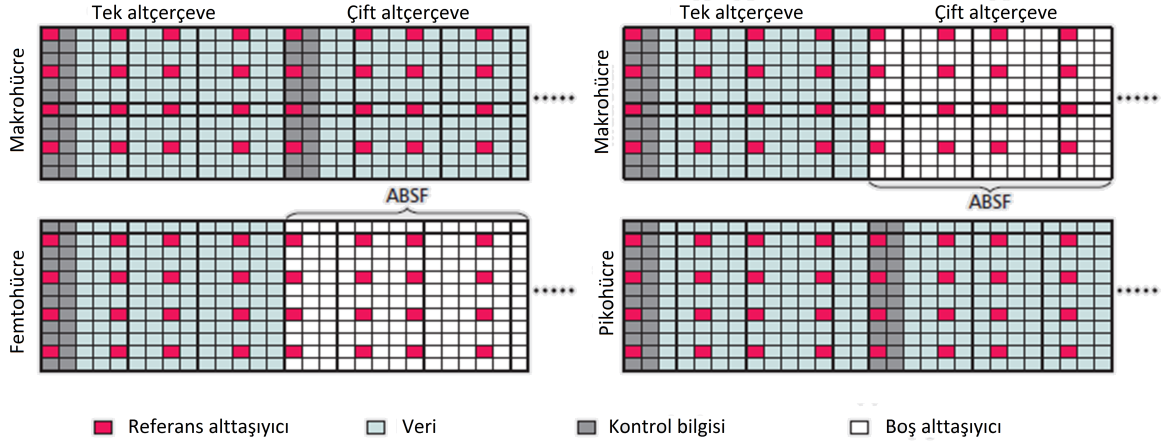
Şekil A.18. LTE-A'da olası girişim senaryoları



Şekil A.19. Taşıyıcı birleştirme yöntemiyle ICIC'in makro-hücre ve piko-hücre arasında sağlanması

Frekans-uzamı Tabanlı Teknikler

Frekans-uzamı ICIC çözümü olarak, taşıyıcı birleştirme yöntemi kullanılabilir. Daha önce bahsedildiği gibi taşıyıcı birleştirme yönteminde birincil hücrelerde sadece kontrol kanalı bilgisi olurken, ikincil hücrelerde kullanıcı verisi olabilir. Bu şekilde kontrol kanalı bilgilerini başka bileşken taşıyıcıyla ve kullanıcı verisini de başka bileşken taşıyıcılarla ileterek ICIC sağlanmış olur. Şekil A.19'da makro-hücre kullanıcısı kontrol kanalı bilgisini f_1 frekansında gönderirken, piko-hücre kullanıcısı f_2 frekansında gönderebilir. Ayrıca kullanıcı verisini de frekans-uzamından birbirine dik olacak şekilde gönderebilir ve girişimden kurtulur.



Şekil A.20. ABSF ile femto-hücre ve makro-hücre arasında ve piko-hücre ve makro-hücre arasındaki ICIC'in sağlanması

Zaman-uzamı Tabanlı Teknikler

Bu teknik çok fazla girişime maruz kalan kullanıcıların iletişim yapabilmesi için kullanılır. Bunun için girişime çok maruz kalan alt-çerçevelerde, girişim kaynağı baz istasyonu belirli periyotlarla o alt-çerçeveyi susturur. Böylelikle girişim yiyen baz istasyonları da iletişim yapabilirler. Bu alt-çerçeve, Neredeyse Boş Alt-çerçeve (Almost Blank Subframe, ABSF) diye adlandırılır. ABSF'lerin içinde, referans sinyalleri dışında ne veri ne de kontrol sinyalleri vardır. Şekil A.20'de görüldüğü gibi femto-hücre ve makro-hücre arasında ve piko-hücre ve makro-hücre arasında ABSF yöntemiyle ICIC sağlanabilir. Şekil A.20'deki makro-hücre ve femto-hücreye ait alt-çerçevelerde yapılan ABSF yöntemi, femto-hücre sahibi bir evin yakınından geçen kullanıcı için geçerli olabilir. Bu kullanıcı femto-hücreden dolayı fazla girişime maruz kalacaktır ve femto-hücre belli aralıklarla alt-çerçevesini susturmak zorunda kalmıştır. Makro-hücre ve piko-hücre alt-çerçevelerinde ise piko-hücrenin hücre-kenar kullanıcısının karşılaştığı yüksek girişim senaryosu düşünülebilir. Bu kullanıcı makro-hücreden çok fazla girişim yiyeceğinden makro-hücre alt-çerçevesini susturmuştur. İki senaryoda da alt-çerçevelerde sadece veri ve kontrol sinyallerinin (mavi ve gri olanlar) gönderilmediği, ama referans sinyallerinin (kırmızı olan) gönderildiği Şekil A.20'de açıkça görülmektedir.

Güç Kontrolü Teknikleri

Güç kontrolü teknikleri 3GPP tarafından hayli tartışılan konuların arasındadır. Burada olası güç kontrolü teknikleri aşağıdaki gibidir.

- Femto-hücre baz istasyonunun gücünü makro-hücreden alınan enbüyük güce eş değer yapmak.
- Makro-hücre ile femto-hücre arasındaki yol kaybı (path loss) göz önünde bulundurularak femto-hücrenin çıkış gücünü ayarlamak.
- Femto-hücre kullanıcıları için hedef SINR belirlemek.
- Femto-hücre yakınındaki makro-hücre kullanıcıları için hedef SINR belirlemek.

B. DIŞBÜKEYLERİN FARKI (DC) PROGRAMLAMA

B.1 Giriş

Bu bölümde günümüzde karşımıza sıkça çıkan dışbükey-olmayan problemlerin çözümü için geliştirilmiş "dışbükeylerin farkı" programlamadan bahsedilmiştir. DC işlevlerinin tanımı, DC'liğin korunduğu durumlar ve eniyilik durumu incelenmiştir. Şimdi DC işlevlerine göz atalım.

Tanım B.1 $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ tanımlı bir işlev olduğunu düşünelim. Eğer $g : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ ve $h : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ dışbükey işlevlerse ve f , g ve h 'nin farkından elde edilebiliyorsa, f dışbükeylerin farkı (DC) işlevi olarak tanımlanır:

$$f(\mathbf{x}) = g(\mathbf{x}) - h(\mathbf{x}) \quad \forall \mathbf{x} \in \mathbb{R}^n \quad (\text{B.1})$$

Bu işlevler, haberleşme, veri madenciliği, görüntü analizi ve ekonomiye kadar birçok alanda eniyileme problemlerinin konusu olmuştur [52].

Genel olarak ilgilenilen eniyileme problemi şöyle yazılabilir:

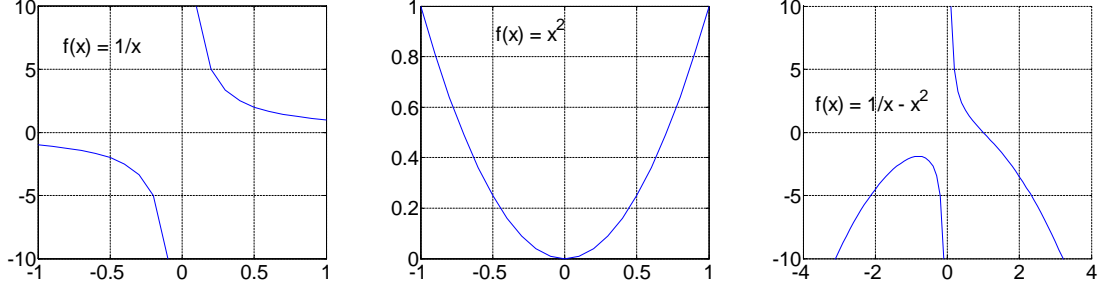
$$\begin{aligned} \text{enküçült} \quad & f_0(\mathbf{x}), \quad \mathbf{x} \in \mathbb{R}^n, \\ \text{kısıtlar} \quad & f_i(\mathbf{x}) \leq 0, \quad i = 1, \dots, m. \end{aligned} \quad (\text{B.2})$$

Burada, $f_i : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}, \forall i$ için tanımlanmış DC işlevlerdir [52].

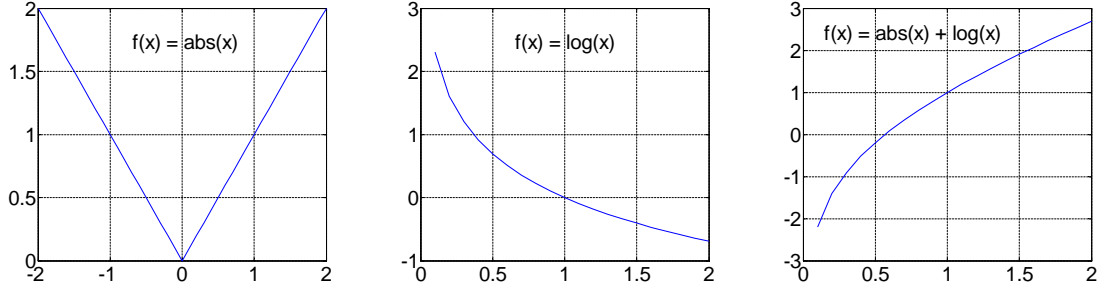
Bu problemin çözümü üzerine tartışmadan önce bazı gözlemler yapalım. $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ ile tanımlı f işlevi, $f(\alpha x_1 + (1-\alpha)x_2) \leq \alpha f(x_1) + (1-\alpha)f(x_2)$ eşitsizliğini $\forall x_1, x_2 \in \mathbb{R}^n$ için sağladığında dışbükeydir. Diğer bir deyişle, f iki kere türevlenebilirse, ancak ve ancak Hessian matrisi positif yarı-kesin ise dışbükeydir. Bazı bilinen dışbükey işlevlere göre DC işlevinin nasıl şekil aldığını gözlemleyelim.

Örnek B.1 $f_1(x) = 1/x$ ve $f_2(x) = x^2$ olsun. (Şekil B.1'e bakınız.)

Örnek B.2 $f_1(x) = \text{abs}(x)$ ve $f_2(x) = -\log(x)$ olsun. (Şekil B.2'ye bakınız.)



Şekil B.1. Soldaki $f_1(x) = 1/x$, ortadaki $f_2(x) = x^2$ ve $f(x) = x^{-1} - x^2$



Şekil B.2. Soldaki $f_1(x) = \text{abs}(x)$, ortadaki $f_2(x) = -\log(x)$ ve $f(x) = \text{abs}(x) + \log(x)$

İşlevler dışbükey olmalarına rağmen ikisinin farkı $f(x) = f_1(x) - f_2(x)$ şekilde görüldüğü gibi dışbükey olmayabilir. Dışbükey işlevlerde minimum nokta açıkça gözlemlenebilir iken, DC işlevlerde bu daha az belirgindir. Ayrıca, DC işlevi ilgilenilen eniyileme problemine belli bir karmaşıklık katmaktadır, fakat bu durum daha sonra değinileceği üzere aşılabilir bir durum değildir.

B.2 DC'liğin Korunduğu Durumlar

f_i 'lerin, $i = 1, 2, \dots, m$ için DC işlevleri olduğunu varsayalım. Bu durumda, aşağıdaki işlevler de DC işlevleridir [24].

1. $\sum_i \lambda_i f_i(x)$, her $\lambda_i \in \mathbb{R}$ için
2. enbüyült $f_i(x)$
3. enküçült $f_i(x)$
4. $\prod_i f_i(x)$
5. Eğer f DC işlev ve g dışbükey işlev ise, f ve g 'nin bileşimi ($f \circ g$) DC işlevdir.

B.3 Eniyilik Durumları

B.3.1 İkilik

Eniyilik durumlarını tartışmadan önce ikilik tanımında kullanılacak bazı tanımlara ihtiyacımız var. Bunun için öncelikle eşlenik işlev ve epigraf tanımlarına ve bunun ikilik ile ilişkisine bakalım.

Tanım B.2 g işlevi $g : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ tanımlı olsun. $g(x)$ 'in eşlenik işlevi

$$g^*(y) = \sup\{x^T y - g(x) : x \in \mathbb{R}^n\} \quad (\text{B.3})$$

olarak tanımlanır.

Tanım B.3 $g : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ tanımlı g işlevinin epigrafı, işlevin üzerinde veya grafiğinin üstünde kalan noktalar kümesidir. Şu şekilde tanımlanır:

$$\text{epi}(g) = \{(x, l) \in \mathbb{R}^n \times \mathbb{R} : g(x) \leq l\} \quad (\text{B.4})$$

Buradan $\text{epi}(g)$ kümesi dışbükey olduğu sürece, g işlevinin dışbükey olduğu da görülür.

Epigrafı tanımlarken, eşlenik işlevin geometrik gösteriminden de faydalabiliriz. Eşlenik işlev g^* , g 'nin sağladığı hiperdüzlemlerle $\text{epi}(g)$ 'in dışbükey zarfını kapsar. Bu durumda g 'nin eşleniğinin eşleniği kendisi olur ve $g^{**} = g$ yazılır. Bu durumu matematiksel olarak şu şekilde ifade edebiliriz.

$$g(x) = \sup\{x^T y - g^*(y) : y \in \mathbb{R}^n\} \quad (\text{B.5})$$

Buradan görülmektedir ki, g ve g^* tanımları gereği birbirinin simetrikleridir.

Şimdi DC programlama ve onun ikili arasındaki bağı yazalım. Elimizdeki problem;

$$\inf\{f(x) = g(x) - h(x) : x \in \mathbb{R}^n\} \quad (\text{B.6})$$

yazılır. Eşlenik tanımından $f^*(0) = \sup\{-f(x) : x \in \mathbb{R}^n\}$ yazılır. Başka bir deyişle, $\inf\{f(x) : x \in \mathbb{R}^n\} = -f^*(0)$ 'dir. Yine eşlenik tanımından $-f^*(0)$ 'i açarsak,

$$\begin{aligned} -f^*(0) &= -\sup\{g^*(y) - h^*(y) : y \in \mathbb{R}^n\}, \\ &= \inf\{h^*(y) - g^*(y) : y \in \mathbb{R}^n\} \end{aligned} \quad (\text{B.7})$$

yazılır ve buradan problemin kendisinin ve ikilinin çözümünün eşit olacağı görülmektedir [51], [68].

$$\inf\{f(x) = g(x) - h(x) : x \in \mathbb{R}^n\} = \inf\{f^*(y) = h^*(y) - g^*(y) : y \in \mathbb{R}^n\} \quad (\text{B.8})$$

Bu sonuçtan yola çıkarak, birincil ve ikincil problemi çözüp, ikilik aralığını enküçültmeye çalışan algoritmalar üretilmiştir. Ancak bu çok maliyetli olmaktadır.

ÖZGEÇMİŞ

Kimlik Bilgileri

Adı Soyadı: UYGAR DEMİR

Doğum Yeri: İzmir

Medeni Hali: Bekar

E-posta: demir@ee.hacettepe.edu.tr

Adresi: G.O.P Mahallesi John F. Kennedy Caddesi No: 105A/7 Çankaya / ANKARA

Eğitim

Lise: Muğla Anadolu Lisesi, MUĞLA

Lisans: Hacettepe Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, ANKARA

Yüksek Lisans: Hacettepe Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, ANKARA

Yabancı Dil ve Düzeyi

İngilizce : İyi

Portekizce : Başlangıç

İş Deneyimi

Ağustos 2010-Eylül 2010: Araştırma-Geliştirme Mühendisi, ASELSAN MGEO, ANKARA

Ağustos 2013 - ... : Araştırma Görevlisi, Hacettepe Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, ANKARA

Deneyim Alanları

-

Tezden Üretilmiş Projeler ve Bütçesi

-

Tezden Üretilmiş Yayınlar

-

Tezden Üretilmiş Tebliğ ve/veya Poster Sunumu ile Katıldığı Toplantılar

İki-Katmanlı Ağlarda DF Programlama ile Eniyi Güç Kontrolü, *SIU 2014*, Sinyal İşleme Kurultayı, Trabzon, 2014.