

GELECEK NESİL HABERLEŞME SİSTEMLERİ İÇİN VERİ HIZI ARTTIRICI YÖNTEMLER VE KAYNAK TAHSİSİ

RESOURCE ALLOCATION AND DATA RATE INCREASING METHODS FOR NEXT GENERATION COMMUNICATION SYSTEMS

BARIŞ YÜKSEKKAYA

Doç. Dr. Cenk Toker

Tez Danışmanı

Doç Dr. Hazer İnaltekin

İkinci Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim - Öğretim ve Sınav Yönetmeliği'nin

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü

DOKTORA TEZİ olarak hazırlanmıştır.

2016

BARİŞ YÜKSEKKAYA'nın hazırladığı "Gelecek Nesil Haberleşme Sistemleri İçin Veri Hızı Arttırıcı Yöntemler ve Kaynak Tahsisi" adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından ELEKTRİK VE ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI'nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Ali Özgür Yılmaz

Başkan

.....

Doç. Dr. Cenk Toker

Danışman

.....

Doç. Dr. Emre Aktaş

Üye

.....

Doç. Dr. Umut Sezen

Üye

.....

Doç. Dr. Tolga Girici

Üye

.....

Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **DOKTORA TEZİ** olarak onaylanmıştır.

Prof. Dr. Fatma SEVİN DÜZ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

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

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...

Barış YÜKSEKKAYA

ÖZET

GELECEK NESİL HABERLEŞME SİSTEMLERİ İÇİN VERİ HIZI ARTTIRICI YÖNTEMLER VE KAYNAK TAHSİSİ

BARIŞ YÜKSEKKAYA

Doktora, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Cenk Toker

İkinci Tez Danışmanı: Doç. Dr. Hazer İnaltekin

Ocak 2016, 171 sayfa

Tez kapsamında, iki katmanlı heterojen ağ yapıları incelenmiştir. İlk katman, R_c yarıçaplı bir servis alanını kapsayan merkezi bir ağ ve bu katmanın kullanıcılarından, ikinci katman da bu merkezi ağın içerisindeki R_f yarıçaplı servis alanına sahip bir ağ ve bu katmanın kullanıcılarından oluşmaktadır. Önerilen sistem yapısı hem heterojen ağ (HetNet) yapılarını hem de bilişsel radyo (CR) ağ yapılarını kapsayan bir genel çerçeve niteliğindedir. Bu genel çerçevede birinci katman kullanıcıları (BKK) HetNet’lerdeki makro-ağ kullanıcılarıyla, ikinci katman kullanıcıları (İKK) da femto veya piko-ağ kullanıcılarıyla örtüşmektedir. Benzer şekilde BKK’ler bir bilişsel radyo ağındaki birincil kullanıcılara, İKK’ler ise ikincil kullanıcılara denk gelmektedir.

Sistemdeki tüm kullanıcıların aynı kanal kaynaklarını kullandığı varsayılan çalışmadaki amaç, belirli kısıtlar altında ikinci katman veri hızının enbüyütülmesidir. Geleneksel güç kısıt gereksinimlerinin karşılanması yanı sıra, farklı iletişim ağlarının aynı ortamda belirli servis kalitesini (QoS) sağlayacak şekilde çalışabilmesinin de temini hedefler arasında gösterilmektedir.

İlgili gereksinimler ve kısıtlar kapsamında birbirinden farklı dört senaryo ince-

lenmiştir. İlk olarak, problem en basit haliyle ele alınarak çok kullanıcı, tek-taşıyıcılı, tek-girdili tek-çıkıtlı (SISO) kanallardaki veri hızı enbüyültme problemi incelenmiştir. Amaç, İKK'lerin veri hızını, İKK'lerin azami ve asgari güç kısıtları ve BKK'lere yapılan toplam girişim güç kısıtı altında enbüyültmektir. Bu yapı için eniyi güç dağılımına analitik bir çözüm bulunmuştur. Özel bir durum olarak, toplam girişim güç kısıtı yerine, BKK'lerin *bireysel girişim gücü eşik değerlerine* sahip oldukları durum incelenmiştir. Bu özel durum için problem eniyileme araçları kullanılarak çözülmüştür. Bu senaryo için ayrıca analitik olarak hesaplanabilen çok yakın üst ve alt veri hızı sınırları hesaplanmıştır.

İkinci olarak, İKK'lerdeki ve ikinci katman baz istasyonundaki (İKB) anten sayıları artırılarak çok kullanıcı, tek-taşıyıcılı, tek-girdili çok-çıkıtlı (SIMO) ve çok-girdili çok-çıkıtlı (MIMO) kanallarda veri hızını enbüyültecek güç dağılımı bulunmaya çalışılmıştır. Çözümün alıcıda sıralı girişim giderimi (SGG) olduğu durumda *özyineli* bir girişimle düzenlenmiş su doldurma çözümü olduğu görülmüştür. Alıcıda SGG olmadığı durumda İKB'deki girişimin tamamen ortadan kaldırılması için İKB'de doğrusal bir alıcı filtresi kullanılarak kanallar ayrışık kanallara ayrılmıştır. Yeni problem formülasyonu incelendiğinde girişimle düzenlenmiş bir su doldurma problemi olduğu ortaya çıkmıştır.

Sonrasında, anten sayıları tekrar tek antene düşürülmüştür ve birbirine dik frekans bantları kullanılarak çok-taşıyıcılı sistemlerin incelenmesi adına çok kullanıcı, *çok-taşıyıcılı*, SISO kanallardaki veri hızı enbüyültülmeye çalışılmıştır. İKK'lerin veri hızını, BKK'lere uygulanan girişim kısıtı altında enbüyültecek bir problem oluşturulmuştur. Eniyi güç dağılımı incelendiğinde, çözümün özyineli su doldurma ve özyineli girişimle düzenlenmiş su doldurma çözümlerinin bir karışımı olduğu görülmektedir. Sonrasında, analitik sonuçlar bulmak adına, eniyi çözüme yakın üst ve alt sınırlar hesaplanmıştır.

İncelenen senaryolarda İKB'nin, İKK-İKB arasındaki kanalların (direkt kanallar) ve İKK-BKK arasındaki kanalların (girişim kanalları) durum bilgilerini tam olarak bildiği varsayılmaktadır. Ancak, girişim kanal bilgilerinin İKB'de tam olarak bilinmesi, İKK kullanıcı sayısı arttıkça, pratikliğini kaybetmektedir. Bu du-

rumun önüne geçilebilmesi için, son olarak, çok kullanıcı, tek-taşıyıcı, SISO kanallardaki *geri besleme kısıtları altında* veri hızı enbüyültme problemi incelenmiştir. Amaç, İKK'lerin veri hızını, azami ve asgari güç kısıtları, BKK'lere yapılan toplam girişim güç kısıtı ve çeşitli *geri besleme kısıtları* altında enbüyültmektir. Problem yapıları incelendiğinde eniyi dağılımın önceki çözümlerden farkı olmadığı görülmüştür. Sadece geri besleme kısıtı sebebiyle performans düşüklüğü yaşanmaktadır. İlgili performans düşüklüklerinin incelenmesi ve düşürülebilmesi adına değişik geri besleme yöntemleri çalışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kablosuz Haberleşme, Heterojen Ağlar, Bilişsel Ağlar, Güç Kontrolü, Çoklu Erişim, Dışbükey Eniyileme.

ABSTRACT

RESOURCE ALLOCATION AND DATA RATE INCREASING METHODS FOR NEXT GENERATION COMMUNICATION SYSTEMS

BARIŞ YÜKSEKKAYA

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

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Cenk Toker

Co-Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Hazer İnaltekin

January 2016, 171 pages

In the thesis, two-tier network architectures are investigated. The first tier consists of a central network covering a service area of radius R_c along with its users, the second tier consists of a smaller network covering a service area of R_f that is in the range of the central network. The proposed system structure qualifies as a general framework that covers both heterogeneous network (HetNet) structures and cognitive radio (CR) network structures. The first tier users coincide with macro-cell users and the second tier users coincide with femto-cell or pico-cell users in a HetNet. Similarly, the first tier users and the second tier users correspond to the primary users and secondary users in a CR network, respectively.

It is assumed that all of the users in the system use the same resources. The main objective of the study is maximizing the total data rate of the second tier under certain constraints. In addition to the traditional power requirements, ensuring that different communication networks, operating in the same environment, to achieve certain quality of service (QoS) requirements, is among the targets of the thesis.

Four scenarios with different constraints are examined. First, the data rate maximization problem for multi-user, single-carrier, single input single output (SISO) channels, is investigated. It is intended to maximize the total data rate of the second tier users under a total interference power constraint at the first tier and also under individual transmitting power constraints of second tier users. An analytical solution for the optimal power distribution is found. As a special case, individual interference power constraints for the first tier users are considered. For this special case, the problem is solved numerically using optimization tools. Moreover, analytically calculated upper and lower bounds for total data rate of second tier users is found.

Second, the antennas at the second tier users and second tier base station are increased. The data rate maximization problem for multi-user, single-carrier, single input multiple output (SIMO) and multiple input multiple output (MIMO) channels, is investigated. It is seen that the optimum solution is an interference regulated iterative water-filling solution for the case where the receiver is capable of performing perfect successive interference cancellation (SIC). For the second case, where SIC is not allowed, a linear receive filter is proposed to be used in the second tier base station that eliminates the interference of the uplink of second tier users. After the receive filter, it is shown that the optimal allocation is found using an interference regulated water-filling solution.

Third, the data rate maximization problem for multi-user, *multi-carrier*, SISO channels, is investigated using orthogonal frequency bands. Again, a problem that maximizes the data rate of second tier users under a total interference power constraint at the first tier is formed. The optimum solution is a combination of power and interference regulated water-filling solutions. Afterwards, the problem is relaxed and near-optimum upper and lower bounds are found analytically.

In the considered scenarios, it is assumed that the channel state information (CSI) of all users is perfectly available at the second tier base station. However, having perfect knowledge of interference channels (the channels between sec-

ond tier users and first tier users) becomes impractical with increased number of users. Therefore, the data rate maximization problem for multi-user, single-carrier, SISO channels, is investigated under *feedback constraints*. It is intended to maximize the total data rate of the second tier users under a total interference power constraint at the first tier and also under various feedback constraints. Despite the fact that the feedback constraints cause a decrease on the overall system performance, it is seen that the optimum allocation is the same as the previous solutions. Different feedback scenarios are investigated in order to examine and remedy the reduction on the performance.

Keywords: Wireless Communication, Heterogeneous Networks, Cognitive Networks, Power Control, Multiple Access, Convex Optimization.

TEŞEKKÜR

Akademik hayatım boyunca bilgi ve deneyimleriyle bana yol gösteren, en sıkıntılı zamanlarımda bile motivasyonumu kaybetmememi sağlayan tez danışmanım Doç. Dr. Cenk Toker'e ne kadar teşekkür etsem azdır. Aynı zamanda yüksek lisans tez danışmanım da olan Doç. Dr. Cenk Toker ile dokuz yıldır birlikte çalışabildiğim için kendimi çok şanslı hissediyorum.

Tez çalışmalarımın her aşamasında ilgisi, yardımları ve yol göstericiliği ile yanımda olan ikinci tez danışmanım Doç. Dr. Hazer İnaltekin'e, tezimin son bölümlerinde birlikte çalışma fırsatı bulduğum ancak tez çalışmama büyük katkıları olan ve her konuda yardımını esirgemeyen Prof. Dr. Halim Yanıkömeroğlu'na teşekkür ederim.

Tezimin hazırlanış süresi boyunca yakınlıkları ve yardımları ile destekleri hiç eksik olmayan çalışma arkadaşlarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Sevgi ve destekleriyle bana daima güç veren anne ve babama çok teşekkür ediyorum. Bir evladı, anne ve babası ne kadar sevebilirse daha fazla sevdiler, bir evlada anne ve babası ne kadar yardımcı olabilirse çok daha fazlasını yaptılar. Yine dünyaya gelsem yine onların evladı olmak isterim ve hayatım boyunca onlara layık olmaya çalışıyorum. Akademik ve sosyal her konuda bana yardımcı olan ağabeyim ve ablama çok teşekkür ederim. Ağabeyim benim her konuda idolüm. Basketbola yönelmem, mühendis olmam ve akademik çalışmaları tercih etmem gibi birçok konuda hep ağabeyimin yolunu izledim. Ablam benim için sadece bir kardeş değil aynı zamanda ikinci bir anne olmuştur. Onun yakınlığı, sevgisi, ilgisi hep ihtiyaç duyduğumda yanımda olmuştur. Tez çalışmalarım boyunca sabırla yanımda olan sevgili eşim benim hem sevgilim, hem en yakın arkadaşım hem de hayat arkadaşım. Eşime, sabrı ve yardımları için içtenlikle teşekkür ediyorum.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	iv
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
ŞEKİLLER	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xv
SÖZLÜK DİZİNİ	xvii
1. GİRİŞ	1
1.1. Hücresel Kablosuz Ağlar	2
1.2. Kaynak Tahsisi ve Güç Kontrolü	4
1.3. Kablosuz Kanal Kapasitesi	7
1.3.1. Tek Kullanıcı - Tek Girdili Tek Çıktılı Kanallar	7
1.3.2. Tek Kullanıcı - Çok Girdili Çok Çıktılı Kanallar	9
1.3.3. Çok Kullanıcı Çoklu Erişim Kanalı - Tek Girdili Tek Çıktılı Kanallar .	10
1.3.4. Çok Kullanıcı Çoklu Erişim Kanalı - Çok Girdili Çok Çıktılı Kanallar	13
1.4. Gelecek Nesil Çok Katmanlı Ağ Yapıları	14
1.5. Dışbükey Eniyileme	16
1.5.1. Dışbükey Eniyileme Problemi	16
1.5.2. Lagrange Çifteşliği ve KKT Koşulları ile Dışbükey Eniyileme Problemlerinin Çözümü	17
1.6. Tez Kapsamı - Gelecek Nesil Haberleşme Sistemleri için Veri Hızı Arttırıcı Yöntemler ve Kaynak Tahsisi	18
1.6.1. Sistem Modeli	21
1.6.2. Problem Formülasyonları	23
1.7. Tezin Literatüre Katkıları	24
2. LİTERATÜRDE GÜÇ KONTROLÜ	26

2.1. Toplam Verici Gücünü Enküçülten Çalışmalar	26
2.2. Toplam Veri Hızını Enbüyüten Çalışmalar	29
2.2.1. Girişim Kısıtlı Eniyileme Hakkında Önceki Çalışmalar	34
2.2.2. Çoklu Antenli Sistemler Hakkında Önceki Çalışmalar	36
2.2.3. Çok-Taşıyıcılı Sistemler Hakkında Önceki Çalışmalar	38
2.3. Farklı Maliyet İşlevlerine Sahip Diğer Çalışmalar	39
3. İKİ KATMANLI AĞ YAPILARI - SISO TEK-TAŞIYICILI KANALLARDA ENİYİ GÜÇ DAĞILIMI	44
3.1. İlgili Çalışmalar ve Katkıları	45
3.2. Sistem Modeli	45
3.3. Özel Durum - Tek BKK	51
3.4. Özel Durum - Birden Çok BKK - Bireysel Girişim Gücü Eşik Değerleri	55
3.4.1. Üst Sınır	61
3.4.2. Alt Sınır	61
3.5. Benzetim Çalışmaları	62
3.5.1. Birden Çok BKK - Toplam Girişim Gücü Eşik Değeri Kısıtı	63
3.5.2. Özel Durum - Tek BKK	66
3.5.3. Özel Durum - Birden Çok BKK - Bireysel Girişim Gücü Eşik Değerleri Kısıtları	67
3.5.4. Senaryolar Arası Karşılaştırmalar	71
4. İKİ KATMANLI AĞ YAPILARI - SIMO/MIMO TEK-TAŞIYICILI KANALLARDA ENİYİ GÜÇ DAĞILIMI	73
4.1. İlgili Çalışmalar ve Katkıları	73
4.2. Alıcıda Sıralı Girişim Giderimi Olduğu Durumda Güç Dağılımı	74
4.2.1. SIMO Kanallar	74
4.2.1.1. Sistem Modeli	74
4.2.1.2. Güç Dağılımı Algoritması	76
4.2.2. MIMO Kanallar	87

4.3. Alıcıda Sıralı Girişim Giderimi Olmadığı Durumda Güç Dağılımı	90
4.3.1. SIMO Kanallar	90
4.3.1.1. Sistem Modeli	90
4.3.1.2. Alıcı Filtresi Tasarımı	92
4.3.1.3. Güç Dağılımı Algoritması	94
4.3.2. MIMO Kanallar	97
4.4. Benzetim Çalışmaları	100
4.4.1. Alıcıda Sıralı Girişim Giderimi Olduğu Durumda Güç Dağılımı	100
4.4.2. Alıcıda Sıralı Girişim Giderimi Olmadığı Durumda Güç Dağılımı - Büyükölçek SIMO/MIMO	104
4.4.3. Senaryolar Arası Karşılaştırmalar	107
5. İKİ KATMANLI AĞ YAPILARI - SISO ÇOK-TAŞIYICILI KANALLARDA ENİYİ GÜÇ DAĞILIMI	109
5.1. İlgili Çalışmalar ve Katkıları	109
5.2. Sistem Modeli	110
5.2.1. Güç Dağılımı Algoritması	112
5.3. Analitik Hesaplanabilen Eniyiye Yakın Üst ve Alt Sınırlar	115
5.3.1. Üst Sınır	115
5.3.1.1. Güç Dağılımı Algoritması	116
5.3.2. Alt Sınır	122
5.4. Benzetim Çalışmaları	122
6. İKİ KATMANLI AĞ YAPILARI - SISO TEK-TAŞIYICILI KANALLARDA GERİ BESLEME KISITLARI ALTINDA ENİYİ GÜÇ DAĞILIMI	130
6.1. İlgili Çalışmalar ve Katkıları	131
6.2. Kısıtlı Sayıda İKK'nin Girişim Kanal Bilgisinin Tam Geri Beslemesi . .	131
6.3. Tüm İKK'lerin Nicemlendirilmiş Girişim Kanal Bilgilerinin Geri Beslemesi	135
6.3.1. Birbiçimli Nicemleme	136

6.3.2. Birbiçimli Olmayan Nicemleme	138
6.3.3. Eniyi Nicemleme - Lloyd-Max Algoritması	140
6.4. Benzetim Çalışmaları	142
6.4.1. Kısıtlı Sayıda İKK'nin Girişim Kanal Bilgisinin Tam Geri Beslemesi	144
6.4.2. Tüm İKK'lerin Nicemlendirilmiş Girişim Kanal Bilgilerinin Geri Beslemesi	148
7. SONUÇ VE TARTIŞMA	152
KAYNAKLAR	159
ÖZGEÇMİŞ	170

ŞEKİLLER

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1. Temel İki Katmanlı İletişim Ağı Modeli.	22
Şekil 3.1. SISO Tek-Taşıyıcılı Sistem Modeli.	46
Şekil 3.2. SISO Tek-Taşıyıcılı Sistem Modeli - Tek BKK	51
Şekil 3.3. Toplam Girişim Gücü Eşik Değeri - Rayleigh Direkt ve Girişim Kanalları - İKK Sayısına Karşılık Veri Hızı Değişimi ...	63
Şekil 3.4. Toplam Girişim Gücü Eşik Değeri - Rayleigh Direkt ve Girişim Kanalları - İKK Sayısına Karşılık İletime Katılan İKK Sayısı ...	64
Şekil 3.5. Toplam Girişim Gücü Eşik Değeri - Rayleigh Direkt ve Girişim Kanalları - Girişim Eşik Değerine Karşılık Veri Hızı Değişimi ..	65
Şekil 3.6. Toplam Girişim Gücü Eşik Değeri - Rayleigh Direkt ve Girişim Kanalları - BKK Sayısına Karşılık Veri Hızı Değişimi ..	65
Şekil 3.7. Tek BKK - Rayleigh Direkt ve Girişim Kanalları - İKK Sayısına Karşılık Veri Hızı Değişimi	66
Şekil 3.8. Tek BKK - Rayleigh Direkt ve Girişim Kanalları - Girişim Eşik Değerine Karşılık Veri Hızı Değişimi	67
Şekil 3.9. Bireysel Girişim Gücü Eşik Değeri - Rayleigh Direkt ve Girişim Kanalları - İKK Sayısına Karşılık Veri Hızı Değişimi ...	68
Şekil 3.10. Bireysel Girişim Gücü Eşik Değeri - Rayleigh Direkt ve Girişim Kanalları - Girişim Eşik Değerine Karşılık Veri Hızı Değişimi	69
Şekil 3.11. Bireysel Girişim Gücü Eşik Değeri - Rayleigh Direkt ve Girişim Kanalları - BKK Sayısına Karşılık Veri Hızı Değişimi ..	69
Şekil 3.12. Bireysel Girişim Gücü Eşik Değeri - İki Adet BKK - Eniyi Çözüme karşı Üst ve Alt Sınır Değerleri	70
Şekil 3.13. Senaryolar Arası Karşılaştırmalar - Rayleigh Direkt ve Girişim Kanalları - İKK Sayısına Karşılık Veri Hızı Değişimi ...	71
Şekil 3.14. Senaryolar Arası Karşılaştırmalar - Rayleigh Direkt ve Girişim Kanalları - BKK Sayısına Karşılık Veri Hızı Değişimi ..	72
Şekil 4.1. SIMO sistem modeli.	74

Şekil 4.2. MIMO sistem modeli.	87
Şekil 4.3. Alıcıda SGG Olduğu Durum - SIMO Kanallar - İKK Sayısına Karşılık Veri Hızı Değişimi.	101
Şekil 4.4. Alıcıda SGG Olduğu Durum - SIMO Kanallar - Girişim Eşik Değerine Karşılık Veri Hızı Değişimi	102
Şekil 4.5. Alıcıda SGG Olduğu Durum - MIMO Kanallar - İKK Sayısına Karşılık Veri Hızı Değişimi.	102
Şekil 4.6. Alıcıda SGG Olduğu Durum - MIMO Kanallar - Girişim Eşik Değerine Karşılık Veri Hızı Değişimi	103
Şekil 4.7. Alıcıda SGG Olmadığı Durum - SIMO Kanallar - İKK Sayısına Karşılık Veri Hızı Değişimi	104
Şekil 4.8. Alıcıda SGG Olmadığı Durum - SIMO Kanallar - Girişim Eşik Değerine Karşılık Veri Hızı Değişimi	105
Şekil 4.9. Alıcıda SGG Olmadığı Durum - MIMO Kanallar - İKK Sayısına Karşılık Veri Hızı Değişimi	106
Şekil 4.10. Alıcıda SGG Olmadığı Durum - MIMO Kanallar - Girişim Eşik Değerine Karşılık Veri Hızı Değişimi	107
Şekil 4.11. İncelenen Çok Antenli Senaryoların Karşılaştırılması	108
Şekil 5.1. SISO Çok-Taşıyıcı Kanal Modeli.	110
Şekil 5.2. Tek ve Çok-Taşıyıcı Senaryolar - SISO Kanallar - İKK Sayısına Karşılık Veri Hızı Değişimi	123
Şekil 5.3. Çok-Taşıyıcı Senaryo - Eniyi Dağılım ve Sınır Eğrileri - İKK Sayısına Karşılık Veri Hızı Değişimi	124
Şekil 5.4. Tek ve Çok-Taşıyıcı Senaryolar - SISO Kanallar - Girişim Eşik Değerine Karşılık Veri Hızı Değişimi.	125
Şekil 5.5. Çok-Taşıyıcı Senaryo - Eniyi Dağılım ve Sınır Eğrileri - Girişim Eşik Değerine Karşılık Veri Hızı Değişimi	126
Şekil 5.6. Tek ve Çok-Taşıyıcı Senaryolar - SISO Kanallar - Frekans Bant Sayısına Karşılık Veri Hızı Değişimi.	127
Şekil 5.7. Çok-Taşıyıcı Senaryo - Eniyi Dağılım ve Sınır Eğrileri - Girişim Eşik Değerine Karşılık Veri Hızı Değişimi	127

Şekil 5.8. Frekans-Seçici Senaryo - Güç-Su Doldurma Örneği	128
Şekil 5.9. Frekans-Seçici Senaryo - Girişim-Su Doldurma Örneği	129
Şekil 6.1. SISO Kanal Modeli	132
Şekil 6.2. Birbiçimli Nicemleyici Giriş-Çıkış Karakteristiği	137
Şekil 6.3. Birbiçimli Olmayan Nicemleyici Giriş-Çıkış Karakteristiği	139
Şekil 6.4. Tek ve Çok-Taşıyıcılı Senaryolar - SISO Kanallar - İKK Sayısına Karşılık Veri Hızı Değişimi	145
Şekil 6.5. Tek ve Çok-Taşıyıcılı Senaryolar - SISO Kanallar - Girişim Gücü Eşik Değerine Karşılık Veri Hızı Değişimi	146
Şekil 6.6. Tek ve Çok-Taşıyıcılı Senaryolar - SISO Kanallar - Geri Beslenen Kullanıcı Sayısına Karşılık Veri Hızı Değişimi	147
Şekil 6.7. Tam ve Kısıtlı Geri Beslemeli Senaryolar - İKK Sayısına Karşılık Veri Hızı Değişimi	149
Şekil 6.8. Tam ve Kısıtlı Geri Beslemeli Senaryolar - Girişim Gücü Eşik Değerine Karşılık Veri Hızı Değişimi	150
Şekil 6.9. Tam ve Kısıtlı Geri Beslemeli Senaryolar - Nicemleme Bit Sayısına Karşılık Veri Hızı Değişimi	150

SİMGELER VE KISALTMALAR

HetNet	Heterojen Ağlar (Heterogeneous Network)
CR	Bilişsel Radyo (Cognitive Radio)
BKK	Birinci Katman Kullanıcıları
İKK	İkinci Katman Kullanıcıları
İKB	İkinci Katman Baz İstasyonu
QoS	Servis Kalitesi (Quality of Service)
SISO	Tek-Girdili Tek-Çıktılı (Single Input Single Output)
SIMO	Tek-Girdili Çok-Çıktılı (Single Input Multiple Output)
MISO	Çok-Girdili Tek-Çıktılı (Multiple Input Single Output)
MIMO	Çok-Girdili Çok-Çıktılı (Multiple Input Multiple Output)
CSI	Kanal Durum Bilgisi (Channel State Information)
WLAN	Kablosuz Yerel Alan Ağı (Wireless Local Area Network)
2G	İkinci Nesil (Second Generation)
3G	Üçüncü Nesil (Third Generation)
4G	Dördüncü Nesil (Fourth Generation)
BS	Baz İstasyonu (Base Station)
ICI	Ağlar Arası Girişim (Inter Cell Interference)
IntraCI	Ağ İçi Girişim (Intra Cell Interference)
SNR	Sinyal Gürültü Oranı (Signal to Noise Ratio)
SIR	Sinyal Girişim Oranı (Signal to Interference Ratio)
SINR	Sinyal Girişim ve Gürültü Oranı (Signal to Interference plus Noise Ratio)
TDM	Zaman Bölüşümlü Çoğullama (Time Division Multiplexing)
TDMA	Zaman Bölüşümlü Çoklu Erişim (Time Division Multiple Access)

FDM	Frekans Bölüşümlü Çoğullama (Frequency Division Multiplexing)
FDMA	Frekans Bölüşümlü Çoklu Erişim (Frequency Division Multiple Access)
OFDM	Dikgen Frekans Bölüşümlü Çoğullama (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)
OFDMA	Dikgen Frekans Bölüşümlü Çoklu Erişim (Orthogonal Frequency Division Multiple Access)
CDM	Kod Bölüşümlü Çoğullama (Code Division Multiplexing)
CDMA	Kod Bölüşümlü Çoklu Erişim (Code Division Multiple Access)
ITU	Uluslararası Telekomünikasyon Birliği (International Telecommunication Union)
IP	İnternet Protokolü (Internet Protocol)
MAC	Çoklu Erişim Kanalı (Multiple Access Channel)
BC	Yayın Kanalı (Broadcast Channel)
AWGN	Toplanır Beyaz Gauss Gürültü (Additive White Gaussian Noise)
dom	Tanım Kümesi (Domain)
KKT	Karush Kuhn Tucker
DSL	Sayısal Abone Hattı (Digital Subscriber Line)
MANET	Mobil Tasarsız Ağ (Mobile Ad-Hoc Network)
DMT	Ayrık Çoklu-Ton (Discrete Multitone)
H-ARQ	Melez Hata Durumunda Otomatik Yineleme (Hybrid Automatic Repeat Request)
KSGO	Kanal Sinyal Girişim Oranı
SGG	Sıralı Girişim Giderimi
MSQE	Ortalama Karesel Nicemleme Hatası (Mean Square Quantization Error)

SÖZLÜK DİZİNİ

Katman	: Tier
İki Katman	: Two Tier
Heterojen Ağ	: Heterogeneous Network
Bilişsel Ağ	: Cognitive Network
Servis Kalitesi	: Quality of Service
Tek-Girdili Tek-Çıktılı	: Single Input Single Output
Tek-Girdili Çok-Çıktılı	: Single Input Multiple Output
Çok-Girdili Tek-Çıktılı	: Multiple Input Single Output
Çok-Girdili Çok-Çıktılı	: Multiple Input Multiple Output
Girişimle Düzenlenmiş Su Doldurma	: Interference Regulated Water-Filling
Büyükölçek	: Massive
Kanal Durum Bilgisi	: Channel State Information
Nicemleme	: Quantize
Nicemleme Hatası	: Quantization Error
Kablosuz Yerel Alan Ağı	: Wireless Local Area Network
Nesil	: Generation
Baz İstasyonu	: Base Station
Yol Kaybı	: Path Loss
Hücreler Arası Girişim	: Inter Cell Interference
Hücre İçi Girişim	: Intra Cell Interference
Sinyal Gürültü Oranı	: Signal to Noise Ration
Sinyal Girişim Oranı	: Signal to Interference Ration
Sinyal Girişim ve Gürültü Oranı	: Signal to Interference plus Noise Ratio
Zaman Bölüşümlü Çoğullama	: Time Division Multiplexing
Zaman Bölüşümlü Çoklu Erişim	: Time Division Multiple Access
Dikgen	: Orthogonal
Frekans Bölüşümlü Çoğullama	: Frequency Division Multiplexing
Frekans Bölüşümlü Çoklu Erişim	: Frequency Division Multiple Access

Kod Bölüşümlü Çoğullama	: Code Division Multiplexing
Kod Bölüşümlü Çoklu Erişim	: Code Division Multiple Access
Adillik	: Fairness
İnternet Protokolü	: Internet Protocol
Çizelgeleme	: Schedule
Katman	: Layer
Fiziksel Katman	: Physical Layer
Çoklu Erişim Kanalı	: Multiple Access Channel
Yayın Kanalı	: Broadcast Channel
Yukarı Yönlü Bağ	: Uplink
Aşağı Yönlü Bağ	: Downlink
Birincil Kullanıcı	: Primary User
İkincil Kullanıcı	: Secondary User
Karşılıklı Bilgi	: Mutual Information
Noktadan-Noktaya	: Point-to-Point
Toplanır Beyaz Gauss Gürültü	: Additive White Gaussian Noise
Sıralı Girişim Giderimi	: Successive Interference Cancellation
Tanım Kümesi	: Domain
İç Nokta Yöntemi	: Interior Point Method
Hüzme Biçimlendirme	: Beamforming
Olurlu	: Feasible
Tasarsız	: Ad-Hoc
Buluşsal	: Heuristic
Servis Kesintisi	: Outage
Rasgele Girdi Dağılımı	: Arbitrary Input Distribution
Su Doldurma	: Water-Filling
Civa/Su Doldurma	: Mercury/Water-Filling
Hemen Hemen Dışbükey	: Quasiconvex
Ödünleşme	: Trade-Off
Bağlaşım	: Coupling

Ortak Değişinti	: Covariance
Eniyi	: Optimum
Eniyileştirme	: Optimization
Evrensel Eniyi	: Global Optimum
Enküçük	: Minimum
Enküçültme	: Minimization
Enbüyük	: Maximum
Enbüyültme	: Maximization
Sayısal Abone Hattı	: Digital Subscriber Line
İzge, Spektrum	: Spectrum
Güç İzgesel Yoğunluğu	: Power Spectral Density
Üretilen İş	: Throughput
Mobil Tasarsız Ağ	: Mobile Ad-Hoc Network
Ayrık Çoklu Ton	: Discrete Multitone
Belitsel	: Axiomatic
Onanırılık, Kabul Edilebilirlik	: Admissibility
Hata Durumunda Otomatik Yineleme	: Automatic Repeat Request
Dışbükey	: Convex
Dışbükey Olmayan	: Non-Convex
İkili	: Binary
Kaynak Tahsisi	: Resource Allocation
Güç	: Power
Veri Hızı	: Data Rate
Rasgele Değişken	: Random Variable
Sürekli	: Continuous
Küme	: Set
Kesik	: Cut
Yapay Değişken	: Slack Variable
Sonuç	: Solution
Köşe Noktası	: Corner Point, Vertex

Matris Evirme Teorisi	: Matrix Inversion Lemma
Yinelemeli	: Iterative
Tekdüze	: Monotonic
Sanal Sabit Nokta	: Artificial Fixed Point
Kararsız	: Unstable
Sıfır Uzayı	: Null Space
Tekil Değer Ayrıştırması	: Singular Value Decomposition
Birim Matris	: Unitary Matrix
Birbiçimli	: Uniform
Karar Sınırları	: Decision Boundaries
Karar Aralıkları	: Decision Intervals
Üstel	: Exponential
Sönümlleme	: Fading
İkili	: Binary
Kaynak Tahsisi	: Resource Allocation
Tekil Olmayan	: Nonsingular
Nesnelerin İnterneti	: Internet of Things
Makineden Makineye	: Machine to Machine

1. GİRİŞ

İletişim endüstrisinin en hızlı büyüyen parçası kablosuz iletişim teknolojileri olarak düşünülmektedir. Özellikle hücresel ağlar son on yıl içerisinde üssel büyüme yaşamıştır [1]. Hücresel telefonlar, özellikle gelişmiş ülkelerde, hem günlük hayatta hem de iş hayatında sıklıkla kullanılan araçlar haline gelmişlerdir ve gelişmekte olan ülkelerde de hızla kablolu sistemlerin yerlerini almaktadırlar. Ayrıca, kablosuz yerel alan ağları (WLAN) hem evlerde hem de işyerleri ve kampüslerde kablolu ağların yerini almaktadırlar. Artık bahsedilen teknolojiler de yavaş yavaş eskimeye başlamakta ve yeni nesil haberleşme teknolojileri ilgi odağı haline gelmektedir.

Yakın gelecekte, toplumun ve bütün endüstri ve hizmet sektörlerinin artan bir eğilimle yeni nesil haberleşme teknolojilerine daha bağımlı hale gelecekleri açıktır. Bu değişimin işaretleri de şimdiden karşımızda durmaktadır. Örneğin, üçüncü nesil (3G) kablosuz haberleşme ağları gezgin telefonlarımızı, konum izleme, yüksek çözünürlükte video aktarımı ve portfolyo takibi gibi her türlü bilgiye ve servise her-zaman-her-yerde ulaşmamızı sağlayan akıllı birer uçbirime dönüştürmüştür. Geleneksel kablosuz hücresel ağ yapısının üstüne kurulmaya başlanan femto ve piko-hücrelerin, evlerimizi ve ofislerimizi kapsama alanı genişletilmiş minyatür hücresel ağlara dönüştürecekleri hayal edilmektedir. Bilişsel radyo teknolojisinin radyo spektrum kıtlığını çözmesi, ve yararlı ürün ve fikri mülkiyet geliştirilmesine yardımcı olacağı düşünülmektedir.

İletişim sistemlerindeki süregelen genişbant ve multimedya hizmetleri talebi gelecek nesil iletişim sistemlerinde de artarak devam edecektir. Son yıllarda, kablosuz veri trafiğinde büyük bir büyüme gerçekleşmiştir. Cisco'nun yaptığı istatistiksel analizlere göre [1], dünya mobil veri trafiğinin 2019 yılında şu ankinin 10 katı olması beklenmektedir, şu anda mobil cihaz sayısının dünya nüfusundan daha fazla olduğu bilinmektedir ve 2019 yılında kişi başına 1.5 adet mobil cihaz düşeceği beklenmektedir. Hızlı talep artışının desteklenebilmesi için, gelecekte, yüksek hızlı veri bağlantısı mobil ağlarda temel teşkil edecek-

tir. Yıllar içinde bu aktif gelişen alanda çok sayıda araştırma yapılmıştır ve artan kullanım trendlerini destekleyecek önemli teknolojiler geliştirilmiştir.

Radyo kaynaklarının (bant genişliği, güç vb.) kısıtlı olması yüksek hızlı kablosuz iletişim sistemlerinin geliştirilmesinde büyük bir zorluk olmuştur. Özellikle, mobil kullanıcı sayısı fazla olan sistemlerde sınırlı sistem kaynakları ile kullanıcı taleplerinin sağlanması büyük bir zorluktur. Ayrıca, radyo kaynaklarının verimli kullanımı da gelecek kablosuz sistemler için kritik önem taşımaktadır. Kablosuz ortamların (kanal koşulları, kullanıcı konumları gibi) hızlı değişimi de sistem tasarımlarında zorluklar yaratmakta, ileri seviyede uyarlanabilir senaryolar oluşturulmasını zorunlu kılmaktadır. Uyarlanabilir kaynak tahsisi de yüksek karmaşıklıkta uygulamaların kullanılmasına ihtiyaçla sonuçlanmaktadır.

Bu tezde gelecek nesil haberleşme sistemleri için veri hızı artırıcı yöntemler ve kaynak tahsisi problemleri incelenmektedir. Bir kablosuz ağdaki kullanıcıların kendi sistem performansı gereklilikleri ile aynı kaynakları kullanan farklı kullanıcıların da sistem performansı gerekliliklerini göz ardı etmeden yapılabilecek güç kontrolü tekniklerine odaklanılmıştır. Bu bölümde çalışılan sistem ve metotların daha iyi anlaşılabilmesi için gerekli ön bilgiler verilmektedir.

1.1 Hücresel Kablosuz Ağlar

Hücresel kablosuz ağlar kablosuz haberleşme sistemlerindeki gelişmenin sebebi ve öncüsü olmuştur. Kablosuz hücresel ağlar konsepti ilk olarak Bell laboratuvarları tarafından geniş alan uzak kablosuz bağlantıları sağlanması amacıyla geliştirilmiştir [2]. Hücresel ağlar sesli iletişim için uygun bir araç olmaları nedeniyle 90'lı yıllarda gelişme açısından ticari ivme kazanmıştır. Ancak, son yıllarda, bu ağların birincil kullanımı veri iletişimine doğru kaymıştır [3] ve gelecekteki hücresel ağ kaynaklarının önemli bir kısmının yoğun veri iletişimine ihtiyaç duyan uygulamalar (mobil internet, çoklu medya hizmetleri, nesnelerin interneti, makineden makineye iletişim gibi) tarafından kullanılması beklenmektedir.

Hücresel ağ sistemlerinde, bir coğrafi bölge, hücre adı verilen daha küçük alanlara ayrıştırılır [4]. Her hücrede bir baz istasyonu (BS) bulunmakta ve kendi kapsama alanı içerisindeki mobil kullanıcı terminallerine kablosuz hizmet sağlamaktadır. Ağ bölgesindeki tüm baz istasyonları, birbirlerine bir omurga ağı ile bağlıdırlar. Bir mobil kullanıcı, bir hücreden başka bir hücreye geçiş yaptığı durumda, ilgili kullanıcıya hizmet eden baz istasyonu sorumluluklarını yeni hücredeki baz istasyonuna devreder. İlk geliştirilen sistemlerde baz istasyonlarının yüksek maliyetli olmaları sebebiyle belirli bir şehir veya bölgeyi en az sayıda hücre ile kapsayacak şekilde hücre tasarımları yapılmaktaydı. Yüksek binalara veya tepelere konulan baz istasyonları uzak mesafelere servis sağlayabilmeleri amacıyla çok yüksek güçlerle iletim yapmak durumundaydı. Güncel sistemlerde ise daha küçük servis erişim alanına sahip ve düşük güçle çalışan baz istasyonları kullanılmaktadır.

Karasal kablosuz kanal karakteristiği olarak, baz istasyonundan uzak olan kullanıcılar yüksek ihtimalle zayıflamış sinyaller almaktadırlar. Bu olay yol kaybı olarak adlandırılır [3, 4]. Yol kaybına ek olarak, hücre kenarlarına yakın bulunan kullanıcılar hücreler arası girişimden (ICI) etkilenirler, yani, diğer hücrelerdeki baz istasyonlarından gelen sinyaller girişim olarak çevre yakınındaki kullanıcıları etkiler. Hem yol kaybı hem de ICI sebebiyle, özellikle hücre çevresine yakın kullanıcıların sinyal girişim ve gürültü oranı (SINR) azalmaktadır ve bu da kullanıcıların veri hızının düşmesine sebep olmaktadır. Bu nedenle, gelecekteki hücresel ağlarda ön görülen tüketici taleplerinin karşılanması için, bahsedilen kayıplarla mücadele edebilecek yöntemlere ihtiyaç vardır.

Yaygınlaşarak kullanılan heterojen ağ yapıları ile aynı hücre içerisinde birden çok küçük hücre yapıları (femto-ağ, piko-ağ gibi) bulunabilmektedir. Aynı hücre içerisindeki farklı küçük hücrelerin de farklı baz istasyonları olmak durumundadır. Aynı hücre içerisindeki bir küçük hücre baz istasyonunun diğer küçük hücrelerdeki kullanıcıları etkilemesi de hücre içi girişim (IntraCI) olarak adlandırılmaktadır [5, 6]. Yol kaybı ve ICI'da olduğu gibi IntraCI'da hücre içerisindeki

kullanıcıların SINR değerinde düşüşe sebep olmaktadır. Bu nedenler gelecek nesil heterojen hücreli ağ yapılarında SINR kayıplarıyla mücadele yöntemlerinde IntraCI'nın da gözönüne alınması gerektiğini göstermektedir.

1.2 Kaynak Tahsisi ve Güç Kontrolü

Hücre içinde baz istasyonu ile kullanıcılar arası iletişimde toplam iletim gücü ve bantgenişliği sınırlı kaynaklardır. Dolayısıyla bu kaynakların eniyi dağıtımı kritik bir önem taşımaktadır.

Önceleri kaynak tahsisi statik olarak yapılmaktaydı [7]. Statik kaynak tahsisinde kullanıcıların sisteme erişimleri için zaman bölüşümlü çoklu erişim (TDMA) veya frekans bölüşümlü çoklu erişim (FDMA) kullanılmaktadır. Statik kaynak tahsisinde kullanıcıların kanal durumu gözetilmeden, önceden belirlenmiş zaman aralıklarında veya frekans bantlarında iletişim yapılmaktadır.

Uyarlamalı kaynak tahsisinde ise kaynaklar kullanıcılara kanal durumlarına göre dağıtılmaktadır [8–10]. Coğrafik olarak farklı yerlerde bulunan kullanıcılardan birisi için kötü olan bir alt kanal bir diğer kullanıcı için iyi olabilmektedir. Dolayısıyla bu ön bilgi ile yapılan kaynak tahsisinin statik oranla daha iyi bir başarıma sahip olması beklenmektedir.

Farklı maliyet işlevleri kullanılarak farklı kaynak tahsisi problemleri geliştirilmektedir ve literatürde servis kesintisi olasılığı, toplam veri hızı, toplam verici gücü veya bu gibi performans kriterlerinin bir kombinasyonu şeklindeki parametreleri eniyileyen çalışmalar mevcuttur [11–14]. Ancak, temel olarak kaynak tahsisi problemi hangi kaynağın eniyileştirileceğine göre ikiye ayrılmaktadır:

1. Güç enküçültülmesi tabanlı kaynak tahsisi: Sistem tasarımında amaç her kullanıcı için önceden belirlenmiş bir veri hızına göre vericiden gönderilen toplam gücü enküçültmektir.
2. Kapasite enbüyültülmesi tabanlı kaynak tahsisi: Burada ise kaynak tah-

sisi probleminde amaç önceden belirlenmiş güç kısıtına göre sistemin toplam kapasitesini enbüyütmektir.

Kaynak tahsisinde önemli bir başka parametre de servis kalitesidir (QoS). QoS, tasarlanan sistemden her kullanıcıya sunulması gereken en düşük başarıımı belirten göstergedir. En düşük bit hata oranı, servisin kullanılabilirliği, en küçük kesinti olasılığı servis kalitesine verilebilecek birkaç örnektir [15, 16].

Servis kalitesi beraberinde adil olma kavramını doğurmaktadır. Adil bir sistemde, sistemin toplam gücünün enküçültülmesi veya toplam kapasitenin enbüyütülmesinden ödün vermek uğruna sistemin bir servisini talep eden her kullanıcıya kaynak tahsis edilmektedir. Adil olmayan sistemler ise, kanal kazançları çok düşük olduğu için sistem başarımını olumsuz etkileyen kullanıcılara kaynak tahsis etmeyerek toplam sistem başarımında adil sistemlere göre toplamda daha başarılı sonuçlar doğurmaktadır [17, 18].

Kablosuz haberleşme teknolojisi son yıllarda gözle görülür ilerleme katetmiştir ve bu ilerlemenin devam edeceği öngörülmektedir. Uluslararası Telekomünikasyon Birliği (ITU) gibi gelecek nesil haberleşme sistemlerinin standardizasyonuna öncelik eden kuruluşlar, birbiri ile girişen çok sayıda haberleşme kanalı (hatta haberleşme ağı) içeren 4G ve ilerisi ağlar için haberleşme teknolojilerinin sağlamaları gereken şartnameleri belirlemeye devam etmektedir.

3G sistemlerin başlangıcındaki hücrese radyo link hızları saniyede 2 megabit iken 4G sistemleri için yapılan Mobile WiMAX (IEEE 802.16e) ve LTE Advanced gibi öne çıkan önerilerde bu hız saniyede 100 megabit'e çıkmaktadır ve çoklu erişim yöntemi olarak OFDMA'in (Dikey Frekans Çoklu Erişimi) ve anten teknolojisi olarak MIMO (Çok-Girişli Çok-Çıkışlı) teknolojisinin kullanılması öngörülmektedir. Benzer şekilde kısa menzilli WiFi hızları da 802.11b standardında saniyede 11 megabit iken 802.11n'de 300 megabit'e çıkmıştır. Gelecekte, hedef hızların hücrese ağlarda saniyede 200 megabit, kısa menzilli ağlarda da 1 gigabit'e çıkmasıdır. Zamanla değişen kanal durumlarından

en iyi şekilde yararlanmak için, kanal-bağımlı çizelgeleme ve güç kontrolü algoritmalarının da kullanılması düşünülmektedir. Fakat, elimizde girişen skalar kanallar için bile teorik olarak başarılabilecek eniyi veri hızı değerleri olmadan, daha karmaşık fiziksel katmanı ve çoklu erişim katmanı üzerinde çalışması beklenen 4G ve sonrası ağlar için önerilen iletişim kurallarının eniyiye ne kadar yakın olduğunu yargılamak mümkün değildir.

Bu gelişmeleri sağlamak için önerilen yöntemler olarak MIMO, işbirlikçi iletişim, bilişsel radyo teknolojileri, dinamik spektrum erişimi, yeni ağ kodlama teknikleri gösterilebilir. Gelecek nesil haberleşme teknolojileri arasında gösterilen bilişsel radyo teknolojisinin, önümüzdeki yıllarda etkisi güçlü hissedilecek olan spektrum kıtlığı problemini çözmesi beklenmektedir [19]. Temel mantık, ikincil kullanıcıların, spektrum kullanma ruhsatına sahip birincil kullanıcıların belirli QoS kriterlerini ihlal etmeden, aynı spektruma erişmelerine izin verme üzerine kuruludur. Burada, ikincil kullanıcıların birincil kullanıcılarda neden oldukları girişim seviyelerinin farkında olmaları, ve ikincil-birincil sinyal girişimini belli değerlerin altında tutup ikincil haberleşme ağının veri hızını eniyilemeleri önem kazanmaktadır. Benzer şekilde, femto-hücrelerin hızlı bir şekilde yaygınlaşması sonucu, dikkatlice dizayn edilmiş makro-hücre ile aynı spektrumu paylaşan, ve dolayısıyla makro-hücre sinyal iletişimi ile girişecek, milyonlarca femto-hücre kullanıcısının yakın zamanda ortaya çıkacağı düşünülmektedir. Bu durumda da, sinyal girişim yönetimi önem kazanmaktadır. Fakat, sinyal girişim kısıtlarının olduğu heterojen ve iki-kademeli (veya daha çok) haberleşme ağları için, veri hızlarını girişim kısıtları altında enbüyülden güç kontrol yöntemleri üzerine yapılan araştırma sayısı oldukça sınırlıdır [20,21].

Sonuç olarak yeni nesil iletişim sistemlerinde de amaç eldeki kaynakları eniyi şekilde kullanmaktır. Buradaki kaynaklar spektrum ve güç olarak gösterilebilir ve güç tahsisi spektrumun nasıl şekillendirileceğini de göstermektedir. Bu sebeple bu çalışmada önerilen tezde güç tahsisine odaklanılacaktır ve bu tez yeni nesil iletişim sistemlerindeki güç ve spektrum tahsisine ışık tutacaktır.

1.3 Kablosuz Kanal Kapasitesi

Kablosuz iletişimdeki artan talepler ilgili kanalların kapasitesine karar verilmesinin önemini doğurmuştur. Kanal kapasitesi, kanallardan asimptotik olarak düşük hata olasılığıyla erişilebilen enbüyük veri hızlarını tanımlamada kullanılır. Hiç şüphesiz, günümüzde kullanılan modern haberleşme tekniklerinin gelişimine yol gösterici olan ve kanal kapasitesinin tanımında en önemli çalışma, Claude E. Shannon'ın 1948 yılında yazdığı "A Mathematical Theory of Communications" isimli makalesidir [22]. Shannon, karşılıklı bilgi teriminin tüm olası girdi dağılımları üzerinden enbüyüklümesiyle kanal kapasitesinin bulunacağını ortaya koymuştur. En yüksek veri hızlarını başaran noktadan-noktaya haberleşme sistemlerinin dizayn prensiplerini ortaya koymasının yanında, Shannon verilen herhangi bir noktadan-noktaya haberleşme kanalı vasıtası ile elde edilebilecek en yüksek veri hızlarını, C , işaret-gürültü-oranının (SNR) basit bir fonksiyonu olarak ifade etmeyi başarmıştır.

Bu kısımda tek ve çok kullanıcıli sistemlerde tek girdili tek çıktılı (SISO) ve çok girdili çok çıktılı (MIMO) kanallarda kanal kapasitesinin ön bilgi olarak tanımı yapılacaktır. Tez kapsamında kanal kazanç değerlerinin her kaynak diliminde sabit olduğu varsayılmaktadır, yani, tüm kanalların sürekli güç kazanç dağılımlarına sahip ergodik blok-sönümlmeli kanallardan seçildiği varsayılmaktadır.

1.3.1 Tek Kullanıcı - Tek Girdili Tek Çıktılı Kanallar

Tek antenli bir kullanıcının tek antenli bir baz istasyonu, t zaman dilimindeki yukarı yönlü bağ iletişiminde alınan sinyal

$$y(t) = h(t) * x(t) + n(t), \quad (1.1)$$

şeklinde gösterilmektedir. Burada $y(t)$ baz istasyonundan alınan sinyali, $x(t)$ kullanıcı tarafından gönderilen P gücündeki sinyali, $n(t)$ 'de alıcı tarafındaki N_0 güçlü toplanır beyaz Gauss gürültü (AWGN) sinyalini göstermektedir ve

* işlevi de evrişim işlevini göstermektedir. $h(t)$ kanal sönümleme katsayısını göstermektedir ve bu katsayı sıfır ortalamaya ve birim varyansa sahip kompleks Gauss bağımsız dağılımlıdır. Önceden bahsedildiği gibi tez kapsamında kanal kazanç değerlerinin her kaynak diliminde sabit olduğu varsayılmaktadır. Bu sebeple zaman dizinleri değişkenlerden kaldırılarak alınan sinyal

$$y = h * x + n,$$

şeklinde yazılabilecektir.

Shannon'ın [22] belirttiği gibi, karşılıklı bilgi teriminin tüm olası girdi dağılımları üzerinden enbüyütülmesiyle kanal kapasitesi bulunabilecektir. AWGN kanalında karşılıklı bilgi terimini enbüyüten dağılım Gauss dağılımıdır bu sebeple yukarıda seçilen değişkenler için hesaplanacak karşılıklı bilgi terimi

$$\begin{aligned} C_W &= I(X; Y) = H(Y) - H(Y | X) \\ &= \log_2 (2\pi e \cdot R_y) - \log_2 (2\pi e \cdot R_n) \\ &= \log_2 \left(\frac{R_y}{R_n} \right) \\ &= \log_2 \left(\frac{|h|^2 P + N_0 W}{N_0 W} \right) \\ &= \log_2 \left(1 + \frac{|h|^2 P}{N_0 W} \right), \end{aligned} \tag{1.2}$$

kanal kapasitesini verecektir. Burada C_W "bit/kompleks boyut" kapasite ifadesi, W kanal bantgenişiği, R_y alınan sinyalin kovaryansı ve R_n ise gürültü kovaryansıdır. Saniyede W kompleks örneklem alındığına göre sürekli AWGN kanal kapasitesi

$$C(W) = W \log_2 \left(1 + \frac{|h|^2 P}{N_0 W} \right), \tag{1.3}$$

formülüyle bulunacaktır.

1.3.2 Tek Kullanıcı - Çok Girdili Çok Çıktılı Kanallar

Tek kullanıcı MIMO kanalda baz istasyonundan alınan sinyal

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n}, \quad (1.4)$$

olarak gösterilmektedir. Burada $\mathbf{H}$, kullanıcının baz istasyonu ile arasındaki sıfır ortalamaya ve birim varyansa sahip kompleks Gauss bağımsız dağılımlı kanal katsayı matrisini, $\mathbf{x}$, kullanıcının gönderdiği sinyal vektörünü ve $\mathbf{n}$ 'de alıcıdaki N_0 güçlü AWGN vektörünü göstermektedir. Telatar [23]'deki çalışmasında, bu kanal için kanal kapasitesini $\mathbf{x}$ ile $\mathbf{y}$ 'nin karşılıklı bilgi terimini enbüyölterek bulmuştur. Yine ilgili terimi enbüyölten Gauss dağılımlar kullanılarak değişkenler seçildiği için karşılıklı bilgi terimini hesaplamak kapasitenin hesaplanması için yeterli olacaktır. Karşılıklı bilgi terimi, entropilerin farkı olarak

$$I(\mathbf{x}; \mathbf{y}) = H(\mathbf{y}) - H(\mathbf{y} | \mathbf{x}) = H(\mathbf{y}) - H(\mathbf{n}),$$

şeklinde yazılabilmektedir. Sırasıyla, alınan sinyal ve gürültü sinyalini gösteren $\mathbf{y}$ ve $\mathbf{n}$ vektörlerinin Gauss vektörler olması sebebiyle entropilerinin hesaplanması

$$H(\mathbf{y}) = N_R \log_2 (2\pi e) + \log_2 (\det(\mathbf{R}_y)),$$

$$H(\mathbf{n}) = N_R \log_2 (2\pi e) + \log_2 (\det(\mathbf{R}_n)),$$

ile gösterilmektedir. Burada $\mathbf{R}_y$, $\mathbf{y}$ vektörünün ve $\mathbf{R}_n$ de $\mathbf{n}$ vektörünün kovaryans matrisleridir, N_R alıcıdaki anten sayısıdır. Bu durumda karşılıklı bilgi

$$\begin{aligned}
I(\mathbf{x}; \mathbf{y}) &= H(\mathbf{y}) - H(\mathbf{n}) \\
&= N_R \log_2(2\pi e) + \log_2(\det(\mathbf{R}_y)) - N_R \log_2(2\pi e) - \log_2(\det(\mathbf{R}_n)) \\
&= \log_2\left(\frac{\det(\mathbf{R}_y)}{\det(\mathbf{R}_n)}\right),
\end{aligned}$$

şeklini alacaktır. "bit/komplex boyut" kapasite ifadesi

$$C_W = \log_2\left(\det\left[\mathbf{I} + \frac{\mathbf{H}\mathbf{P}\mathbf{H}^H}{N_0 W}\right]\right), \quad (1.5)$$

şeklinde kovaryans matrisleri hesaplanarak bulunacaktır. Burada $\mathbf{P}$ matrisi gösterilen sinyal vektörünün güç kovaryans matrisidir. SISO kanallardaki gibi sanide W kompleks örneklem alındığına göre MIMO kanallar için sürekli AWGN kanal kapasitesi

$$C(W) = W \log_2\left(\det\left[\mathbf{I} + \frac{\mathbf{H}\mathbf{P}\mathbf{H}^H}{N_0 W}\right]\right), \quad (1.6)$$

olarak gösterilecektir.

1.3.3 Çok Kullanıcı Çoklu Erişim Kanalı - Tek Girdili Tek Çıktılı Kanallar

Tek antenli bir baz istasyonuyla iletişimde bulunan N adet kullanıcıları bir çoklu erişim kanalında, alınan sinyal

$$y = \sum_{i=1}^N (h_i * x_i) + n, \quad (1.7)$$

şeklinde dir. Burada y baz istasyonundan alınan sinyaller toplamını, x_i i . kullanıcı tarafından gönderilen, P_i gücündeki sinyali ve n ise alıcı tarafındaki N_0 güçlü toplanır beyaz Gauss gürültü (AWGN) sinyalini göstermektedir. h_i 'de i .

kullanıcı ile baz istasyonu arasındaki kanal sönümleme katsayısını göstermektedir ve bu katsayılar sıfır ortalamaya ve birim varyansa sahip kompleks Gauss bağımsız dağılımlıdır.

Çoklu erişim kanalı kapasite bölgesi

$$C_i(W) = R_i \leq W \log_2 \left(1 + \frac{|h_i|^2 P_i}{N_0 W} \right), \quad i = 1, \dots, N, \quad (1.8)$$

$$C(W) = \sum_{i=1}^N R_i \leq W \log_2 \left(1 + \frac{\sum_{i=1}^N |h_i|^2 P_i}{N_0 W} \right), \quad (1.9)$$

ile gösterilen kısıtları sağlayan vektörler $([R_1 \dots R_N])$ kümesinden oluşan dışbükey yapıdır [24].

İlk kısıt ayrı ayrı her kanalın kapasitesi ile ilgili yazılabilecek üst sınır değerleridir ve (1.9) denklemindeki kısıt ise kullanıcıların toplam kapasitesi için yazılan bir üst sınırdır. Bu sınıra göre kullanıcıların toplam kapasitesi tüm kullanıcıların toplam gönderdiği güce eşit güçle iletim yapan bir süper kullanıcının veri hızından fazla olamayacaktır.

Yukarıdaki (1.9) denkleminde verilen kapasite üst sınırına sıralı girişim giderimi (SGG) yöntemi ile ulaşılabilmektedir. Sıralı girişim giderimi yönteminde baz istasyonu ilk olarak en güçlü sinyali çözer sonrasında çözdüğü sinyali toplam aldığı sinyallerden çıkartır ve kalan sinyal toplamından tekrar en güçlü sinyali çözmeye çalışır. Bu şekilde en son gücü en az sinyali çözerken geriye hiç girişim kalmamış olacaktır. $\pi(\cdot)$ işlevinin çözülen sinyal sıralamasını verdiği varsayıldığında veri hızları

$$\begin{aligned}
R_{\pi(1)} &= W \log_2 \left(1 + \frac{|h_{\pi(1)}|^2 P_{\pi(1)}}{N_0 W + \sum_{i, i \neq 1} |h_{\pi(i)}|^2 P_{\pi(i)}} \right), \\
R_{\pi(2)} &= W \log_2 \left(1 + \frac{|h_{\pi(2)}|^2 P_{\pi(2)}}{N_0 W + \sum_{i, i \neq 1, 2} |h_{\pi(i)}|^2 P_{\pi(i)}} \right), \\
&\vdots \\
R_{\pi(N)} &= W \log_2 \left(1 + \frac{|h_{\pi(N)}|^2 P_{\pi(N)}}{N_0 W} \right), \\
\sum_{i=1}^N R_{\pi(i)} &= W \log_2 \left(1 + \frac{\sum_{i=1}^N |h_{\pi(i)}|^2 P_{\pi(i)}}{N_0 W} \right), \tag{1.10}
\end{aligned}$$

şeklinde yazılabilecektir.

Yukarıdaki (1.10) denkleminin doğruluğunun 2 kullanıcılı bir sistemdeki ispatı

$$\begin{aligned}
R_{\pi(1)} &= W \log_2 \left(1 + \frac{|h_{\pi(1)}|^2 P_{\pi(1)}}{N_0 W + |h_{\pi(2)}|^2 P_{\pi(2)}} \right), \\
R_{\pi(2)} &= W \log_2 \left(1 + \frac{|h_{\pi(2)}|^2 P_{\pi(2)}}{N_0 W} \right), \\
\sum_{i=1}^N R_{\pi(i)} &= R_{\pi(1)} + R_{\pi(2)} \\
&= W \log_2 \left(1 + \frac{|h_{\pi(1)}|^2 P_{\pi(1)}}{N_0 W + |h_{\pi(2)}|^2 P_{\pi(2)}} \right) + W \log_2 \left(1 + \frac{|h_{\pi(2)}|^2 P_{\pi(2)}}{N_0 W} \right) \\
&= W \log_2 \left(\left(1 + \frac{|h_{\pi(1)}|^2 P_{\pi(1)}}{N_0 W + |h_{\pi(2)}|^2 P_{\pi(2)}} \right) \left(1 + \frac{|h_{\pi(2)}|^2 P_{\pi(2)}}{N_0 W} \right) \right)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\sum_{i=1}^N R_{\pi(i)} &= W \log_2 \left(1 + \frac{|h_{\pi(1)}|^2 P_{\pi(1)}}{N_0 W + |h_{\pi(2)}|^2 P_{\pi(2)}} + \frac{|h_{\pi(2)}|^2 P_{\pi(2)}}{N_0 W} \right. \\
&\quad \left. + \frac{|h_{\pi(1)}|^2 P_{\pi(1)} |h_{\pi(2)}|^2 P_{\pi(2)}}{N_0 W (N_0 W + |h_{\pi(2)}|^2 P_{\pi(2)})} \right) \\
&= W \log_2 \left(1 + \frac{N_0 W (|h_{\pi(1)}|^2 P_{\pi(1)} + |h_{\pi(2)}|^2 P_{\pi(2)})}{N_0 W (N_0 W + |h_{\pi(2)}|^2 P_{\pi(2)})} \right. \\
&\quad \left. + \frac{|h_{\pi(2)}|^2 P_{\pi(2)} (|h_{\pi(1)}|^2 P_{\pi(1)} + |h_{\pi(2)}|^2 P_{\pi(2)})}{N_0 W (N_0 W + |h_{\pi(2)}|^2 P_{\pi(2)})} \right) \\
&= W \log_2 \left(1 + \frac{|h_{\pi(1)}|^2 P_{\pi(1)} + |h_{\pi(2)}|^2 P_{\pi(2)}}{N_0 W} \right), \tag{1.11}
\end{aligned}$$

ile gösterilmektedir.

1.3.4 Çok Kullanıcı Çoklu Erişim Kanalı - Çok Girdili Çok Çıktılı Kanallar

Çok antenli bir baz istasyonu ile iletişimde bulunan N adet antene sahip kullanıcılar bir çoklu erişim kanalında, alınan sinyal

$$\mathbf{y} = \sum_{i=1}^N \mathbf{H}_i \mathbf{x}_i + \mathbf{n}, \tag{1.12}$$

olarak gösterilmektedir. Burada $\mathbf{H}_i$ matrisi i . kullanıcının baz istasyonu ile arasındaki sıfır ortalama ve birim varyansa sahip kompleks Gauss bağımsız dağılımlı kanal katsayılarını, $\mathbf{x}_i$ vektörü i . kullanıcının gönderdiği sinyali ve $\mathbf{n}$ vektörü de alıcıdaki N_0 güçlü AWGN gürültüyü temsil etmektedir. Tek antenli sistemde olduğu gibi çoklu erişim kanalı kapasite bölgesi

$$C_i(W) = R_i \leq W \log_2 \left(\det \left[\mathbf{I} + \frac{\mathbf{H}_i \mathbf{P}_i \mathbf{H}_i^H}{N_0 W} \right] \right), \quad i = 1, \dots, N, \tag{1.13}$$

$$C(W) = \sum_{i=1}^N R_i \leq W \log 2 \left(\det \left[\mathbf{I} + \frac{\sum_{i=1}^N \mathbf{H}_i \mathbf{P}_i \mathbf{H}_i^H}{N_0 W} \right] \right), \quad (1.14)$$

ile gösterilen kısıtları sağlayan vektörler $([R_1 \ \dots \ R_N])$ kümesinden oluşan dışbükey yapıdır [4].

Aynı şekilde, ilk kısıt ayrı ayrı her kanalın kapasitesi ile ilgili yazılabilecek üst sınır değerleridir ve (1.14) denklemindeki kısıt ise kullanıcıların toplam kapasitesi için yazılan bir üst sınırdır. Bu sınıra göre kullanıcıların toplam kapasitesi tüm kullanıcıların toplam gönderdiği güce eşit güçle iletim yapan bir süper kullanıcının veri hızından fazla olamayacaktır. Toplam kapasite üst sınırına sıralı girişim giderimi yöntemi ile ulaşılabilir.

1.4 Gelecek Nesil Çok Katmanlı Ağ Yapıları

Kablosuz hücresel ağ yapıları, yeni nesil iletişim sistemleriyle karmaşık ve homojen olmayan bir biçim almaktadır. Aynı hücre boyutlarının kullanılmadığı bu topoloji heterojen ağ (HetNet) olarak adlandırılmaktadır. Çok katmanlı ağlara bir başka örnek olarak, frekans spektrumu kullanım verimliliğini artırma amaçlı spektrumun değişik kullanıcı tiplerine paylaştırılmasını amaçlayan bilişsel radyo (CR) ağları gösterilebilmektedir.

Farklı katmanları örneklemek gerekirse, heterojen ağ yapıları için merkezi bir makro-hücre ve bu hücrenin içerisinde daha küçük boyutlu femto ve piko-hücre katmanları gösterilebilir. Bilişsel ağlarda ise birincil ve ikincil önceliğe sahip kullanıcıların (lisanslı ve lisanssız kullanıcılar olarak da adlandırılabilirler) oluşturduğu katmanlar birer örnek olarak düşünülebilir.

Aynı ortamda, aynı kanal kaynaklarını kullanan farklı katman ve kullanıcıların olduğu bir durumda en temel problem olarak girişim karşımıza çıkmaktadır. Kullanıcılar kendi iletişim kalitelerini eniyilemeye çalışırken aynı ortamda fakat farklı katmanda olmasına rağmen aynı kaynakları paylaştıkları kullanıcıları he-

saba katmaz ise ortamdaki tüm kullanıcıların servis kalitesi sekteye uğrayacak, hatta, bazı kullanıcılar iletişim servislerinden faydalanamaz hale gelebilecektir. Bu sebeple yeni nesil iletişim senaryolarındaki kaynak tahsisi problemlerinde diğer kullanıcıların sinyal girişim gürültü oranı (SINR) dikkate alınacak şekilde yeni stratejiler geliştirilmesi gerekmektedir.

Heterojen ağ yapıları ve daha küçük hücreler kullanmak, öncelikle verici gücünün azalması faydasını getirecektir. Belirli bir bölgede küçük alanları kapsayacak göreceli olarak küçük femto ve piko-hücre yapıları kullanılması makro-hücre yapılarının da daha seyrekleşmesini sağlayacaktır. Genel olarak 5 – 40 Watt güçle yayın yapan makro-hücre baz istasyonlarının yanında 0.25 – 2 Watt arası güçle yayın yapan piko-hücre baz istasyonları ve 100 mWatt'tan daha az güç harcayan femto-hücre baz istasyonları [25] maliyetlerindeki düşüklük ve daha fazla kullanıcıya servis sağlanabilmesi gibi birçok açıdan fayda sağlamaktadır. Ayrıca heterojen ağ yapılarının veri hızlarında da önemli artış göstermesi beklenmektedir. Gitgide artan kapalı ortam veri trafiği sebebiyle femto-hücrelerin kullanımının da artması beklenilmektedir [26].

Hali hazırdaki iletişim sistemlerinin spektrum kullanımı incelendiğinde %10'un altında kalan bir dolulukla kullanım olduğu bilinmektedir [27]. İletişim spektrumundaki lisanslı kullanıcılar bahsi geçen doluluğu oluşturmaktadır. Ancak bu verimsiz kullanım, verimi arttıracak yönde farklı yöntemlerin geliştirilmesine yol açmıştır. Örneğin, lisanssız kullanıcıların da lisanslı kullanıcıların iletişimini aksatmadığı sürece spektrumdan yararlanması gibi stratejiler geliştirilmeye başlanmıştır. Daha önce bahsedildiği gibi, daha kolay anlaşılması bakımından lisanslı kullanıcılar birincil önceliğe sahip, lisanssız kullanıcılar da ikincil önceliğe sahip kullanıcılar olarak literatürde geçmektedir. Bahsedilen strateji ve benzer dinamik spektrum erişimi teknikleri bilişsel radyo kapsamında değerlendirilmektedir [28,29]. İkincil kullanıcıların birincil kullanıcılarla aynı kaynakları kullandığı düşünüldüğünde, birincil kullanıcılar, lisans sahibi olmaları bakımından, servis kalitelerinde belirli eşik değerlerinin altında kalmamalıdır. Bilişsel

ağ stratejilerini belirlerken problemlerin kısıtları olarak da birincil kullanıcıların servis kaliteleri belirleyici olarak seçilmektedir.

Önerilen tezde hem heterojen ağları hem de bilişsel radyo ağları kapsayan genel bir çerçeve oluşturulmuştur. Çalışılan stratejiler ve elde edilen sonuçlar her iki senaryoda da kullanılabilecek niteliktedir.

1.5 Dışbükey Eniyileme

Uygun koşullar sağlandığında eniyileme problemleri dışbükey formda ifade edilebilmektedir. Bu durumda problemin eniyi çözümünün bulunmasını sağlayan yöntemler bulunmaktadır [30]. Tez kapsamındaki eniyileme problemleri de anlaşılabilir ve eniyi çözümü bulunabilir olmaları sebebiyle dışbükey problemler şeklinde yazılmaya çalışılmıştır. Bu sebeple dışbükey problemler ve bu problemlerin eniyilemesi üzerine ön bilgi verilmesi uygun olacaktır.

1.5.1 Dışbükey Eniyileme Problemi

Bir $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ fonksiyonu tanımlı olsun. Eğer f fonksiyonunun tanım kümesi (**dom**) dışbükey bir kümeysen ve ilgili f fonksiyonu

$$f(\theta \mathbf{x} + (1 - \theta) \mathbf{y}) \leq \theta f(\mathbf{x}) + (1 - \theta) f(\mathbf{y}), \quad (1.15)$$

eşitsizliğini $\theta \in [0, 1]$ ve tüm $\mathbf{x}, \mathbf{y} \in \mathbf{dom} f$ için sağlıyorsa f dışbükey bir fonksiyondur. Tanım kümesinin dışbükey olması da

$$\theta \mathbf{x} + (1 - \theta) \mathbf{y} \in \mathbf{dom} f, \quad \forall \mathbf{x}, \mathbf{y} \in \mathbf{dom} f, \quad (1.16)$$

denkleminin sağlanmasıyla gerçekleşir.

Bir eniyileme probleminin dışbükey bir problem olabilmesi için maliyet işlevinin ve kısıtlarının dışbükey olması gerekmektedir.

1.5.2 Lagrange Çifteşliği ve KKT Koşulları ile Dışbükey Eniyileme Problemlerinin Çözümü

Bir dışbükey eniyileme problemi

$$\begin{aligned} \mathbf{x}^* = \arg \min_{\mathbf{x}} \quad & f_0(\mathbf{x}) \\ \text{s.t.} \quad & f_i(\mathbf{x}) \leq 0, \quad i = 1, \dots, m \\ & h_i(\mathbf{x}) = 0, \quad i = 1, \dots, p, \end{aligned} \quad (1.17)$$

şeklinde tanımlı olsun. Burada $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$ 'dir ve problemin eniyi çözümü $\mathbf{x}^*$ ile gösterilmektedir. f_0 problemin maliyet işlevi, f_i 'ler eşitsizlik kısıtı fonksiyonları ve h_i 'ler de eşitlik kısıtı fonksiyonlarıdır.

Lagrange çifteşliğindeki temel düşünce (1.17)'teki kısıtların maliyet işlevine ağırlıklandırılarak eklenmesidir. Lagrangian fonksiyonu, $L : \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^m \times \mathbb{R}^p \rightarrow \mathbb{R}$

$$L(\mathbf{x}, \lambda, \nu) = f_0(\mathbf{x}) + \sum_{i=1}^m \lambda_i f_i(\mathbf{x}) + \sum_{i=1}^p \nu_i h_i(\mathbf{x}), \quad (1.18)$$

şeklinde tanımlanabilir.

Burada $\lambda_i, i = 1, \dots, m$, eşitsizlik kısıtları ile ilişkilendirilmiş Lagrange çarpanları ve $\nu_i, i = 1, \dots, p$ de eşitlik kısıtları ile ilişkili Lagrange çarpanları olarak adlandırılır.

Lagrange çifteş fonksiyonu, $g : \mathbb{R}^m \times \mathbb{R}^p \rightarrow \mathbb{R}$, Lagrangian fonksiyonunun $\mathbf{x}$ değişkeni üzerinden en küçük değeri olarak

$$g(\lambda, \nu) = \inf_{\mathbf{x}} L(\mathbf{x}, \lambda, \nu) = \inf_{\mathbf{x}} \left(f_0(\mathbf{x}) + \sum_{i=1}^m \lambda_i f_i(\mathbf{x}) + \sum_{i=1}^p \nu_i h_i(\mathbf{x}) \right), \quad (1.19)$$

şeklinde tanımlanmaktadır.

Lagrange çifteş fonksiyonun en önemli özelliklerinden biri orijinal problem dışbükey olmasa bile Lagrange çifteş fonksiyonu her zaman içbükeydir. Ayrıca

(1.19) probleminin eniyi çözümü $(\mathbf{x}^*, \bar{\lambda}^*, \nu^*)$ aynı zamanda (1.17)'teki orijinal problemin eniyi çözümü ile aynıdır. Lagrange çiftleş problemi

$$\begin{aligned}
f_i(\mathbf{x}^*) &\leq 0, \\
h_i(\mathbf{x}^*) &= 0, \\
\lambda_i^* &\geq 0, \\
\lambda_i^* f_i(\mathbf{x}^*) &= 0, \\
\nabla f_0(\mathbf{x}^*) + \sum_{i=1}^m \lambda_i^* \nabla f_i(\mathbf{x}^*) + \sum_{i=1}^p \nu_i^* \nabla h_i(\mathbf{x}^*) &= 0,
\end{aligned} \tag{1.20}$$

ile gösterilen Karush-Kuhn-Tucker (KKT) koşullarını sağlar [30]. Burada ∇ işlevi gradyan işlevidir ve yanındaki fonksiyonun $\mathbf{x}$ değişkenine göre vektörel türevini alır.

Analitik olarak çözülebilen dışbükey eniyileme problemleri için KKT koşulları eniyi çözümü bulmak için kullanışlı bir araç sunmaktadır. KKT koşullarının sağlanmasını sağlayacak $\mathbf{x}^*$, λ^* , ve ν^* değerleri bulunabilirse problemin eniyi çözümü elde edilmiş olacaktır.

Analitik olarak çözülemeyen problemlerde de nümerik olarak eniyi veya eniyiye yakın çözümü bulan çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Örneğin iç nokta yöntemi Newton yöntemini veya KKT koşullarını kullanarak eniyi sonucu arayan bir yöntemdir.

1.6 Tez Kapsamı - Gelecek Nesil Haberleşme Sistemleri için Veri Hızı Arttırıcı Yöntemler ve Kaynak Tahsisi

Yeni nesil haberleşme teknolojileri, artan bir ilgiyle toplumumuz tarafından kullanılmaktadır ve gelecekte de daha yoğun bir şekilde kullanılacağı öngörülmektedir. Her türlü sektörün mümkün olduğunca kullanmaya çalışacağı bu yeni nesil haberleşme sistemlerinin tüm beklentileri karşılayabilmesi için kısıtlı radyo

kaynaklarının eniyi şekilde kullanıcılara tahsisi önemlidir. Literatürde, hedef SINR (Sinyal Girişim ve Gürültü Oranı) değerlerini en az güç kullanarak elde etmeyi amaçlayan güç kontrolü teknikleri, 2G kablosuz ağlar için detaylı bir şekilde incelenmiştir [31–36]. Ancak, bu teknikler, amacın veri hızlarını QoS ve adaletlilik gözeterek enbüyütmek olduğu 4G ve sonrası haberleşme ağları için uygun değildir.

Yeni nesil ağlar için, en az güç kullanarak hedef SINR değerlerini elde eden çözümler yerine, uygun kısıtlar altında Shannon-teorik bit hızlarını enbüyülmekten güç kontrolü teknikleri bulunmalıdır. Literatürdeki bu çalışmaya temel teşkil edecek benzer çalışmalara bakılacak olursa ilk olarak Yu ve diğerlerinin [37] çalışmasını incelemek gerekir. Yu ve diğ. bir Gauss vektör çoklu erişim kanalı sisteminin toplam veri hızını enbüyülmek üzerinde çalışmışlardır. Bizim çalışmamızdan farklı olarak bir girişim kısıtları yoktur ve sadece sıralı girişim gidermenin yapılabildiği bir alıcı kullanmışlardır. Eniyi çözümün, girişimin gürültü olarak ele alındığı durumdaki tek kullanıcı su doldurma çözümüyle aynı olduğunu göstermişlerdir. Soysal ve Ulukuş [38], yukarıdakiyle benzer bir problemle ilgilenip enküçük ve enbüyük verici gücü kısıtları altında MIMO bir çoklu erişim kanalı senaryosunda ergodik kapasiteyi enbüyülmeye çalışmışlardır. Eniyi çözüme özyineli bir algoritmayla ulaşmışlardır ve bu özyineli algoritmada girdi kovaryans matrisinin özdeğerleri her iterasyonda yenilenmektedir. İnaltekin ve Hanly [39], sıralı girişim giderme varsayımını ortadan kaldırmıştır ve girişimi gürültü gibi ele alarak tek antenli çoklu erişim senaryosunun veri hızını enbüyülmek problemini incelemiştir. Bu senaryo için eniyi sonucun ikili güç dağılımı olduğu gösterilmiştir.

Shannon-teorik bit hızlarını enbüyülmekten güç kontrolü, girişimin olmadığı veya yok edilebildiği noktadan-noktaya kanallar veya çoklu erişim kanalları için de iyi düzeyde anlaşılmıştır. Fakat, sinyalleri girişen birçok kullanıcı barındıracak yeni nesil ağlar için girişimin tamamen yok edilebileceğini varsaymak gerçekçi değildir. Girişimin etkin olduğu senaryolarda ilgili problemin çözümü hala tam

olarak bilinmemektedir. Yukarıda incelenen makalelerde farklı tip kullanıcılar arası girişimin göz önüne alınması gereken heterojen ağ yapıları incelenmiştir ancak yeni nesil iletişim sistemlerinde heterojen yapılarının sıklıkla kullanılması beklenmektedir.

Ghasemi ve Sousa [20], bir bilişsel radyo ağını incelemişlerdir. Senaryolarında bir adet birincil ve bir adet ikincil kullanıcı bulunmaktadır. İkincil kullanıcı kendi baz istasyonu ile iletişim yaparken birincil kullanıcıya da girişim yapmaktadır ve eniyileme probleminde ikincil kullanıcının veri hızı enbüyüktürken bu girişim belirli bir limitle kısıtlanmaktadır. Bizim sistemimize benzeyen bu çalışmada bizden farklı olarak sadece bir adet ikincil kullanıcı vardır ve hem kullanıcılarda hem de baz istasyonunda tek anten vardır. Bu senaryodaki eniyi güç dağılımının modifiye bir su doldurma çözümü olduğunu göstermişlerdir. Nekouei ve diğ. [21]'de birden çok ikincil kullanıcı olan bir ağda ergodik veri hızını ortalama güç ve ortalama girişim kısıtları altında enbüyütmeye çalışmışlardır. Eniyi güç dağılımının yine modifiye bir su doldurma çözümü olduğunu belirtmişlerdir. [40]'deki çalışmada, yazarlar bizim senaryomuza çok benzer bir problemi ele almışlardır. Ancak problemi kolaylaştırmak için çalışacak ikincil kullanıcı sayısına bir kısıt eklemişlerdir ve ikincil kullanıcıların çalışabilecekleri güç değerlerini kuantize etmişlerdir. Eniyi sonucu bulamayan yazarlar iki farklı algoritma ortaya atmış ve sistem parametrelerine göre güç dağılımını hangi algoritma daha iyi sonuç verirse ona göre yapmışlardır.

Çalışma kapsamında, gelecek nesil haberleşme ağları için veri hızını enbüyüten güç kontrolü prensipleri elde edilmeye çalışılacaktır. Güncel literatürdeki teknikleri geliştirip, çeşitli girişim, güç ve adalet kısıtları altında, yeni nesil haberleşme sistemleri için eniyi güç dağılımları ortaya çıkarılacaktır, ikili güç kontrolü çözümlerinin 4G ve sonrası haberleşme sistemleri için eniyi veya eniyiye yakın olduğu durumlar araştırılacaktır. Bu çözümler bize aynı zamanda, mevcut radyo spektrumunu kullanıcılar arasında eniyi olarak nasıl paylaştırmamız gerektiğini gösterecektir. Elde edilecek basit ama eniyi veya eniyiye ispatla-

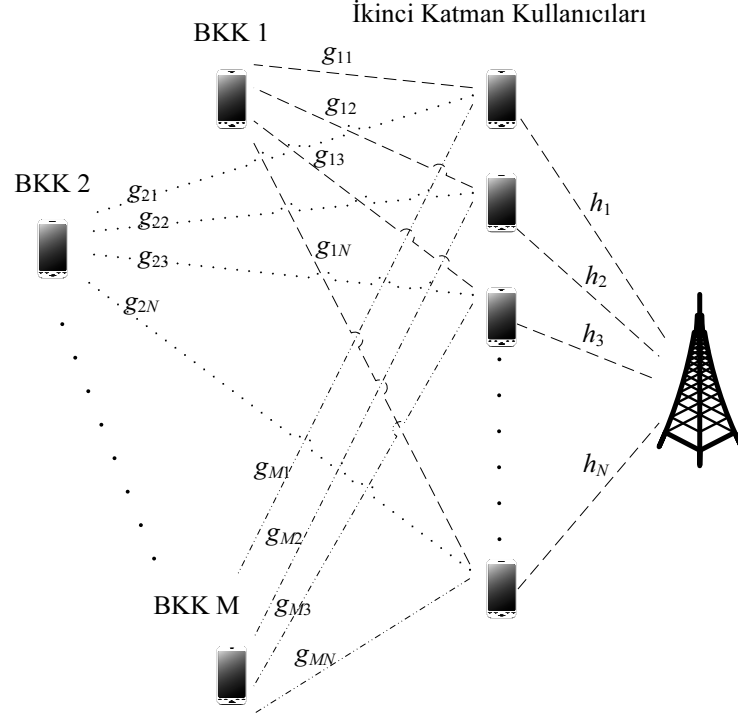
nabilir derecede yakın ağ kontrolü ve kaynak tahsisi prensipleri, günümüzde kullanılan haberleşme teknolojilerinin eniyiye ne kadar yakın olduklarını anlamamızı, ve gelecek nesil haberleşme sistemleri için pratik kontrol mekanizmaları geliştirmemizi sağlayacaklardır.

Bunun yanı sıra, tek hücreli sistemler için geliştirilen çözümlerin, heterojen topolojiye sahip çok sayıda mikro-ağ (alternatif olarak, mikro-hücre veya femto-hücre olarak da adlandırılabilir) içeren sistemlere [20,21] genellenmesi de hedeflenmektedir. Benzer şekilde, proje kapsamında bünyesinde birincil ve ikincil kullanıcıları barındıran iki-katmanlı heterojen ağ yapıları [41,42] da (örn., Bilişsel Radyo) incelenecektir. Bu sayede, çok hücreli ve iki-kademeli haberleşme yapıları için, sinyal girişim kısıtlarının elde edilen eniyi güç dağılımı çözümlerini nasıl etkilediğinin ortaya konulması planlanmaktadır.

1.6.1 Sistem Modeli

Bu çalışmada, iki katmanlı bir senaryo incelenmiştir. Şekil 1.1'de gösterilen senaryoda, çalışma boyunca incelenecek tüm senaryoların en temel yapısı gösterilmektedir. İlk katman, R_c yarıçaplı bir servis alanını kapsayan merkezi bir ağ ve bu katmanın kullanıcılarından, ikinci katman da bu merkezi ağın içerisindeki R_f yarıçaplı servis alanına sahip bir ağ ve bu katmanın kullanıcılarından oluşmaktadır. h_i ve g_{ji} , sırasıyla, i . İKK (İkinci Katman Kullanıcısı) ile İKB (İkinci Katman Baz İstasyonu) arasındaki direkt kanal katsayılarını ve i . İKK ile j . BKK (Birinci Katman Kullanıcısı) arasındaki girişim kanal katsayılarını göstermektedir. Bu ikili katman yapısı hem Heterojen Ağları hem de Bilişsel Radyo Ağlarını içeren bir genel çerçeve oluşturmaktadır. Bir HetNet senaryosunda birinci katman ve ikinci katman sırasıyla bir makro-ağ yapısına ve bir femto-ağ yapısına denk gelmekteyken, bir CR ağda ise birinci katman kullanıcıları (BKK) birincil önceliğe sahip kullanıcıları ve ikinci katman kullanıcıları (İKK) da ikincil önceliğe sahip kullanıcıları modellemektedir.

Sistemdeki tüm kullanıcıların aynı kanal kaynaklarını kullandığı varsayılan sis-



Şekil 1.1. Temel İki Katmanlı İletişim Ağı Modeli.

temde, İKK'ler kendi baz istasyonlarıyla bir çoklu erişim kanalı oluştururlar ve aşağı yönlü bağlantıda BKK'lere girişimde bulunurlar. Çalışmadaki amaç, İKK'lerin oluşturduğu çoklu erişim kanalı veri hızını enbüyülmektir. Ancak, geleneksel güç kısıt gereksinimlerinin yanısıra, farklı iletişim ağlarının aynı ortamda belirli bir hizmet niteliğini sağlayacak şekilde çalışabilmesini de temin etmek gerekmektedir. Gelecek nesil iletişim sistemlerinin en önemli amaçları arasında yer alan bu gereksinimi sağlamak için de İKK'lerin BKK'lere uyguladığı toplam girişim gücünün belirli bir eşik değerinin altında tutulması da sistem gereksinimlerine eklenmiştir. En temel haliyle bu çalışmada incelenecek problem

$$\begin{aligned}
 \text{İKK'lerin Eniyi Güç Dağılımı} = & \arg \max \quad \text{İKK'lerin Toplam Veri Hızı} \\
 \text{s.t.} \quad & \text{Verici Gücü Kısıtları} \\
 & \text{BKK'lere Uygulanan Girişim,}
 \end{aligned}$$

şeklinde özetlenebilir. Değişik senaryolar için oluşturulacak değişik problem formülasyonları yukarıdaki temel problemten yola çıkılarak oluşturulacaktır.

1.6.2 Problem Formülasyonları

İncelenen ilk problem, çok kullanıcı, tek-taşıyıcılı, tek-girdili tek-çıkıtlı (SISO) kanallardaki veri hızı enbüyültme problemidir. Amaç, ikinci katman kullanıcılarının (İKK) veri hızını, İKK'lerin azami ve asgari güç kısıtları ve birinci katman kullanıcılarına (BKK) yapılan toplam girişim güç kısıtı altında enbüyültmektir.

Özel bir durum olarak, birinci katmanda ilgili iletişim diliminde aynı anda *tek aktif BKK* olduğu durum incelenmiştir. Ayrıca, ikinci bir özel durum olarak, birinci katmanda birden çok kullanıcı olduğu senaryoda, toplam girişim güç kısıtı yerine, BKK'lerin *bireysel girişim gücü eşik değerlerine* sahip oldukları varsayılmaktadır.

Yeni nesil iletişim sistemlerinde, özellikle baz istasyonlarında, birden çok anten kullanılmasının veri hızını arttırdığı ve/veya aynı anda çalışabilen kullanıcı sayısını arttırdığı [23, 43–45] bilinmektedir. Bu sebeple incelenecek ikinci problemde anten sayıları artırılarak çok kullanıcı, tek-taşıyıcılı, *tek-girdili çok-çıkıtlı* (SIMO) kanallardaki ve *çok-girdili çok-çıkıtlı* (MIMO) kanallardaki veri hızı enbüyültme problemi çözülmüştür.

Bu bağlamda, ilk olarak SIMO kanallar incelenmiştir. Alıcıda sıralı girişim giderimi yönteminin olduğu ve olmadığı daha basit yapıları doğrusal alıcılar için problem çözülmüştür. Sonrasında aynı senaryolar MIMO kanallar için de incelenmiştir.

Birden çok kaynak dilimi kullanımı da, anten sayısı arttırımı gibi, servis verilebilecek kullanıcı sayısı artışı ve kötü kanal durumlarında iletişime olanak sağlayışı [3, 46] gibi özelliklerinden dolayı gelecek nesil iletişim sistemlerinde kullanılacaktır. Bu sebeple üçüncü incelenecen senaryoda çok kullanıcı, *çok-taşıyıcılı*, tek-girdili tek-çıkıtlı kanallardaki veri hızı enbüyültme problemi çalışıl-

mıştır. Ayrıca, eniyi çözüme yakın üst ve alt sınırlar hesaplanmıştır.

İncelenen tüm senaryolarda ikinci katman baz istasyonunun (İKB), İKK-İKB arasındaki kanalların (direkt kanallar olarak adlandırılacaktır) ve İKK-BKK arasındaki kanalların (girişim kanalları olarak adlandırılacaktır) durum bilgilerini (CSI) tam olarak bildiği varsayılmaktadır. Ancak girişim kanal bilgilerinin İKB’de tam olarak bilinmesi, İKK kullanıcı sayısı arttıkça, geri besleme kanal kısıtları sebebiyle pratikliğini kaybetmektedir [47–49]. Bu durumun önüne geçilebilmesi için, son olarak, çok kullanıcılı, tek-taşıyıcı, tek-girdili tek-çıkıtlı kanallardaki *geri besleme kısıtları altında* veri hızı enbüyültme problemi incelenmiştir. Amaç, ikinci katman kullanıcılarının (İKK) veri hızını, İKK’lerin azami ve asgari güç kısıtları, birinci katman kullanıcılarına (BKK) yapılan toplam girişim güç kısıtı ve çeşitli *geri besleme kısıtları* altında enbüyültmektir.

İki farklı geri besleme kısıtı incelenmiştir. İlk durumda BKK geri besleme kanalını kullanarak kısıtlı sayıda İKK’nin girişim kanal katsayılarını göndermektedir. İKB geri besleme kanalından girişim kanal katsayılarını aldığı kullanıcılar üzerinden güç dağılımını gerçekleştirmektedir. Bu senaryoda BKK’nin hangi kullanıcıların girişim kanal katsayılarını göndereceği veri hızı performansını değiştirecektir.

İkinci durumda da BKK girişim kanal katsayılarını nicemlendirir [50] ve tüm İKK’lerin kanal katsayılarının hangi nicemleme aralığında olduğunun bilgisini İKB’ye gönderir. İKB de kendisindeki nicemleme tablosunu kullanarak tüm ikinci katman kullanıcılarının nicemlenmiş kanal güç kazançlarını elde etmiş olur. Bu senaryoda da nicemleme hataları performans düşüklüğüne yol açacaktır. Nicemleme metodu ve nicemlemede kullanılacak bit sayısı veri hızı performansını değiştirecektir.

1.7 Tezin Literatüre Katkıları

Yapılan çalışmanın literatüre katkıları, ilk olarak, hem heterojen ağlar hem de bilişsel radyo ağları için genel bir çerçeve oluşturması ve bu sebeple birçok

çalışmaya kaynak teşkil edecek olması olarak değerlendirilmektedir.

İkinci olarak, bildiğimiz kadarıyla, literatürde, iki katmanlı sistemlerde ikinci katmanda birden çok kullanıcısı olan ve birinci katmandaki kullanıcılara etki eden girişimin eniyileme esnasında gözönünde bulundurulduğu başka bir çalışma bulunmamaktadır. Bu sebeple heterojen ve bilişsel radyo ağları için, günümüzde tek kullanıcıli iletişimin mümkün olmadığı gözönüne alınırsa, önemli bir açığın kapatıldığı düşünülmektedir.

Ayrıca, sistem modelinin sadece tek antenli SISO sistemlerle sınırlı kalmadığı, çok antenli SIMO ve MIMO sistemlerin de incelendiği çerçeve geniş tutulmuş ve literatürdeki diğer çoklu antenli çalışmalardan farklı olarak, problem formülasyonunda basitliğe gidilmeden, kullanıcıların veri hızı enbüyütlürken aynı ortamda bulunan diğer kullanıcılara yapılan girişim de belirli bir eşik değerinin altında tutulmaya çalışılmıştır. Böylece, aynı ortamda farklı kullanıcı tiplerinin çalışabilmesi konsepti gözardı edilmemiştir.

Tezde ayrıca, tek-taşıyıcılı sistemlerin yanısıra çok-taşıyıcılı sistemler de incelenilmiştir. Çoklu antenli sistemlerde olduğu gibi, bildiğimiz kadarıyla, problem formülasyonunu basitleştirmeden, çok-taşıyıcılı sistemlerde, iki katmandaki kullanıcıların birbirleriyle aynı ortamda belirli girişim eşik değerleri kısıtları altında iletişiminin araştırıldığı bir çalışma olarak literatüre katkı sağlanmaktadır.

Son olarak, farklı tipteki kullanıcıların aynı ortamda iletişimde bulunduğu sistemlerde genel olarak geri besleme kanal kısıtları gözardı edilmektedir. Bizim çalışmamızda, bahsedilen geri besleme kısıtları da incelenilmiş ve sistem performansına etkileri tartışılmıştır.

Böylece gelecek nesil haberleşme sistemlerinin kaynak tahsisi problemlerinde önemli bir konu olan iki katmanlı ağ yapıları, tek antenli, çok antenli, tek taşıyıcılı, çok-taşıyıcılı ve geri besleme kısıtlı senaryolarda çalışılarak literatürdeki önemli boşluklar doldurulmuştur.

2. LİTERATÜRDE GÜÇ KONTROLÜ

2.1 Toplam Verici Gücünü Enküçülten Çalışmalar

Tarihsel olarak bakıldığında, kablosuz ağlarda güç kontrolü probleminin üzerinde 1970'li yıllardan beri çalışıldığı görülmektedir [31, 51, 52]. Hedef bit hızlarının belirli olduğu problem yapılarında, çözülmek istenen ana problem

$$\begin{aligned} \text{enküçült} \quad & \sum_{i=1}^N P_i \\ \text{kısıtlar} \quad & \text{SINR}_i(\mathbf{P}) \geq \beta_i, \end{aligned} \tag{2.1}$$

şeklinde yazılabilir. Burada P_i her bir kullanıcıya tahsis edilen verici gücünü, $\mathbf{P}$ verici güçlerinden oluşan verici gücü vektörünü, N toplam verici sayısını, $\text{SINR}_i(\mathbf{P})$ i . kullanıcının gerçekleşen SINR değerini ve β_i de bu kullanıcının hedeflenen SINR değerini göstermektedir. Yani genel problem bireysel hedef SINR değerlerini karşılama kısıtı altında toplam verici gücünü enküçültmektir.

Bambos 1998'deki [36] çalışmasında belirli servis kalitesi kısıtları altında, güç tüketimini ve girişimi azaltıp ağ kapasitesini arttırmayı amaçlamaktadır. N vericili ve N alıcılı sistemde, servis kalitesi açısından hedef SINR değerini sağlayacak şekilde kullanıcılara güç dağılımı yapılmakta ve eniyi güç dağılımı vektörel bir kapalı form denklem ile bulunmaktadır.

Farrokhi'nin [53] çalışmasında M adet verici-alıcı çiftinin bulunduğu bir ortamda alıcılarda hüzme biçimlendirme ve güç kontrolü eniyilemesi gerçekleştirilmiştir. Eniyileme probleminde kullanıcıların toplam verici gücü enküçültülmüştür ve kısıt olarak da sinyal girişim gürültü oranının belirli bir eşik değerinin üzerinde olması seçilmiştir. Çözüm olarak özyine bir algoritma önerilmiştir ve bu algoritma her yinelemede hüzme biçimlendirme ağırlıklarını ve güç dağılımı vektörünü yenilemektedir. Problemin olurlu bir çözümü olduğu durumlarda algoritmanın bu çözüme yakınsadığı gösterilmiştir. Yine Farrokhi'nin [54] çalışmasında, bir önceki çalışmadaki problem formülasyonu kablosuz hücresel ağ

sistemlerine genişletilmiştir. Eniyilemeler hem yukarı yönlü hem de aşağı yönlü kanallarda gerçekleştirilmiştir.

Wong'un [8] çalışmasında tüm kullanıcıların kanal durum bilgilerinin bilindiği varsayılan bir dikgen frekans bölüşümlü çoğullama (OFDM) senaryosunda alt-taşıyıcı ve verici gücü tahsisi gerçekleştirilmiştir. Eniyileme probleminin maliyet işlevi toplam verici gücü olarak seçilmiştir. Kapalı formda bir sonuç elde edilememiştir ancak bir algoritma ile sayısal sonuçlar bulunmuştur. Sayısal sonuçlar incelendiğinde önerilen algoritmanın OFDM sistemlerinde frekans bölüşümlü çoklu erişim veya zaman bölüşümlü çoklu erişim tekniklerine göre daha iyi sonuçlar verdiği belirtilmiştir.

Julian 2002'deki [55] çalışmasında kablosuz hücresel ağları ve tasarsız ağları incelemiştir. Çalışmasında, hücresel ağlar için, sinyal girişim ve gürültü oranını (SINR) enbüyültme, toplam gücü enküçültme, ağırlıklandırılmış SINR'ı enbüyültme ve enküçük sinyal girişim oranını (SIR) enbüyültme olmak üzere dört farklı problemi ele almıştır. Ad-hoc ağlarda ise toplam veri hızını enbüyültmektedir. Eniyileme problemlerinde geometrik programlama kullanarak güç dağılımını gerçekleştirmektedir.

Schubert'in [56] çalışmasında çoklu giriş tek çıkış (MISO) çok kullanıcılı bir aşağı yönlü bağlantı senaryosunda toplam verici gücünü enküçültecek şekilde hüzme biçimlendirme ve verici gücü tahsisi gerçekleştirilmiştir. Problem çözümünde kanal çiftleşliği kullanılarak aşağı yönlü kanalı çiftleş yukarı yönlü kanalına çevrilmiştir. Ayrıca, toplam verici gücü kısıtı altında sinyal girişim gürültü oranının enbüyültüldüğü farklı bir problem daha incelenmiştir.

Mohseni'nin [57] çalışmasında alıcıda ve vericide birden çok anten bulunan sönümlemeli çoklu erişim ve yayın kanallarında kaynak tahsisi problemi incelenmiştir. Eniyileme probleminde hedef veri hızı kısıtları altında ağırlıklandırılmış toplam verici gücü enküçültülmüştür. Problemin çözümü için sayısal algoritmalar kullanılması önerilmiştir. Schubert'in [56] çalışmasında olduğu gibi yayın

kanalı sonuçları kanal çiftleşliği kullanılarak çoklu erişim kanalı sonuçlarından elde edilmiştir.

Pischella'nın [58] çalışmasında çok hücreli dikgen frekans bölüşümlü çoklu erişim (OFDMA) ağlarda kaynak tahsisi yapılmıştır. Hedef veri hızı kısıtları altında toplam veri verici gücünün enküçültüldüğü eniyileme problemine buluşsal sonuçlar elde edilmiştir. Ortaya atılan buluşsal yöntemde, her kullanıcı ve her alt-taşıyıcı için hedef veri hızlarına ulaşılmasını sağlayacak sinyal girişim gü-rültü oranı değerleri atanmaktadır, sonrasında da her alt-taşıyıcı için bağımsız olarak eniyileme yapılmaktadır.

Wang'ın [59] çalışmasında sönümlmeli kanallarda güç limitli bölgede, zaman bölüşümlü çoklu erişim (TDMA) durumunda kaynak tahsisi incelenmiştir. Kanal durum bilgisinin bilindiği varsayılarak, sırasıyla, ağırlıklandırılmış toplam veri hızı kısıtı ve bireysel veri hızı kısıtları altında verici gücü enküçültülmüştür. Sonuç olarak, aç gözlü su doldurma algoritması kullanılarak en uygun veri hızı ve zaman tahsisi yöntemleri gösterilmiştir. Bu çalışmadaki yaklaşım kullanıcıların sonlu kodlama modlarının desteklendiği pratik senaryolardaki güç limitlerini sağlayabilmektedir.

Qu'nun [60] çalışmasında çok kullanıcılı mobil tasarsız ağlarda bilişsel radyo tabanlı kaynak tahsisi gerçekleştirilmiştir. Eniyileme probleminde bilişsel radyo kullanıcılarının toplam harcadığı güç enküçültülürken hedef veri hızları sağlanmaya çalışılmıştır ve aynı ortamda halihazırda bulunan diğer iletişim elemanlarına etki eden girişim belirli bir kısıt altında tutulmuştur.

Liu'nun [61] çalışmasında sabit veri hızına sahip OFDM sistemlerde hedef bit hata olasılığını sağlayacak bir toplam verici gücü enküçültülmesi problemi incelenmiştir. Problemde alt-taşıyıcıların farklı bit hata olasılıklarına sahip olmalarına izin verilmiştir ve kapalı formda eniyi bit hata olasılığı ve güç dağılımları elde edilmiştir.

Tölli'nin [62] çalışmasında çok hücreli bir sistemde çok antenli bir baz istasyonunun tek antenli birden çok kullanıcıya hizmet ettiği senaryo incelenmiştir. Hedef SINR kısıtları altında toplam verici gücünün enküçültüldüğü problemde eniyi güç hüzme formları tahsisi gerçekleştirilmektedir. Merkezi bir karar mekanizmasına ihtiyaç duymayan algoritma eniyiye yakın sonuçlara ulaşmaktadır.

Lu'nun [63] çalışmasında kullanıcı başı hedef veri hızı kısıtları altında toplam verici gücü eniyilemesi yapılmıştır. Çok kullanıcılı, çok-taşıyıcılı çoklu erişim kanalı senaryosunda verici gücü tahsisinin yanında alt-taşıyıcı tahsisi de gerçekleştirilmiştir. Problemin dışbükey olmayışı ve NP-zor oluşu sebebiyle eniyi sonucun bulunması oldukça zordur. Bu sebeple eniyiye yakın sonuçlar veren algoritmalar geliştirilmiştir.

2.2 Toplam Veri Hızını Enbüyüten Çalışmalar

Minimum güç kullanarak hedef SINR değerlerine ulaşmak yerine, veri hızlarını enbüyüten güç dağılımlarının bulunması yeni nesil haberleşme sistemleri için daha uygundur. Bu doğrultuda, 1990'lı yılların ortalarından itibaren, Shannon-teorik veri hızlarını enbüyüten güç dağılımlarını araştıran farklı bir araştırma kolu belirmiştir [64–67]. İlk yapılan çalışmalarda problemleri kolaylaştırmak açısından sinyal girişiminin (çok kullanıcılı durumlar için) çok kullanıcılı sezim teknikleri kullanılarak tamamen yok edilebileceği varsayılmıştır. Bu durumda, performans kriterinin toplam ergodik kanal kapasitesi alınarak seçildiği durumlarda, çözülmesi gereken eniyileme problemi çoklu erişim kanalları için

$$\begin{aligned} \text{enbüyüt} \quad & \frac{1}{2} E_{\mathbf{h}} \left\{ \log \left(1 + \frac{\sum_{i=1}^N P_i(\mathbf{h}) |h_i|^2}{N_0} \right) \right\} \\ \text{kısıtlar} \quad & E_{\mathbf{h}} \{ P_i(\mathbf{h}) \} \leq P_{avg}, \quad \forall i. \end{aligned} \quad (2.2)$$

şeklinde yazılabilmektedir. Burada h_i i . kullanıcıyla baz istasyonu arasındaki kanal katsayısı, $\mathbf{h}$ vektörü bu kanal katsayılarının oluşturduğu vektör, P_{avg} or-

talama verici gücü kısıtı ve $E_h \{\cdot\}$ 'de kanallar üzerinden alınan beklenen değer işlemidir. Girişimin tamamen ortadan kalktığı durumda genel problem, bireysel verici gücü kısıtları altında toplam ergodik kanal kapasitesini enbüyülmektir. Girişimin yok edilebildiği bu gibi durumlarda ortaya çıkan eniyileme problemi dışbükeydir, ve standart dışbükey eniyileme teknikleri [30] kullanılarak çözülebilmektedir.

Fakat, sinyal girişiminin tam olarak yok edilemediği durumlar için toplam bit hızını enbüyülmekten güç dağılımı problemlerinde, çözüm çok daha karmaşık görülmektedir. Bu durumda ortaya çıkan problem formülasyonu genellikle çözülmesi zor dışbükey olmayan kısıtlı eniyileme problemleridir [68,69]. Bu durumda basit ama aynı zamanda eniyi dağılım ile bulunacak veri hızlarına ispatlanabilir yakınlıkta veri hızları elde eden güç dağılımları bulmak, bu güç dağılımlarının hangi durumlarda tam olarak eniyi olduğunu öğrenmek, heterojen ve iki-kademeli (veya daha çok) olması beklenen gelecek nesil iletişim sistemlerdeki girişim kısıtlamalarının elde edilecek çözümlere etkilerini incelemek bu tezin ilgileneceği konulardır.

Li'nin [70] çalışmasında sönümlemeli yayın kanallarında ergodik kapasite, sıfır ve sıfır olmayan servis kesintisi kapasitesini eniyileyen kaynak tahsisi stratejileri incelenilmiştir. Çalışmada kod, frekans ve zaman bölüşümlü kanal senaryoları incelenmiş ve kapasite bölgeleri ortaya çıkartılarak sayısal olarak hesaplanabilen güç dağılımları bulunmuştur.

Spasojevic'in [71–73] çalışmalarında blok düz sönümlenmeye maruz toplanır beyaz Gauss gürültülü (AWGN) kanallarda ulaşılabilir veri hızını enbüyülmeye eniyi güç dağılımını bulmaya çalışmıştır. Kanal durum bilgisinin hem alıcı hem de vericide bulunduğu varsayılan sistemde problemin çözümünün farklı kanal durumlarına göre kimi zaman su doldurma yöntemiyle kimi zaman da kanal evirme yöntemiyle bulunduğu gösterilmektedir.

Yine, Yu'nun [74] çalışmasında OFDM sistemlerinin tasarımı ve linear kısıtlar altında toplam veri hızının enbüyültülmesinde, maliyet işlevinin ve kısıtların içbükey olmasından bağımsız olarak frekans tonları sayısının sonsuza gittiği limitte problemin çifteşlik aralığının her zaman sıfır olduğu gösterilmiştir. Bu gözlem yazarları OFDM sistemlerinde içbükey olmayan problemlerin evrensel eniyi noktasını bulan verimli bir algoritmaya yönlendirmiştir.

Palomar'ın [75] çalışmasında çeşitli eniyileme problemlerinin farklı su-doldurma çözümlerine sahip oldukları belirtilmiş ve tüm problemlerin çözümünü kapsayacak genel bir su-doldurma yöntemi geliştirilmiştir. Böylece halihazırda kullanılan su-doldurma çözümlerini ve gelecekte kullanılması muhtemel çözümleri kapsayacak sayısal olarak hesaplanabilen bir algoritma önerilmiştir.

Literatürde, genellikle, karşılıklı bilgi terimi enbüyültülürken bağımsız Gauss girdileri kullanılmaktadır. Lozano [76–78] çalışmalarında, Gauss gürültülü bağımsız paralel kanallar yerine rasgele girdi dağılımları kullanarak kaynak tahsisi yapan bir yöntem önerilmiştir. Bu yöntem grafiksel bir yorumlamaya izin veren, civa/su doldurma algoritması olarak adlandırılmıştır ve genelleştirilmiş bir su doldurma çözümüdür.

Oh'un [79] çalışmasında kod bölüşümlü çoklu erişim (CDMA) sistemlerinde servis kalitesi kısıtları altında bilgi teorik toplam kapasite eniyilemesi incelenmiştir. Tek hücreli sistemlerde güç tahsisi stratejisi ile servis kalitesi kısıtlarını sağlayarak toplam kapasiteye erişilebildiği gösterilmiştir. Ayrıca çok kullanıcı çeşitleme kazancı ve servis kalitesi kısıtlarının etkisi numerik sonuçlarla incelenmiştir.

Wang'ın [80] çalışmasında OFDMA çizelgelemesinde hem aşağı yönlü hem de yukarı yönlü iletişim için ortak alt-taşıyıcı, güç ve veri hızı tahsisi veri hızı enbüyültme problemi kullanılarak incelenmiştir. Zaman paylaşımı yöntemi ile ikili tamsayı probleminin NP-zorluğundan kurtulup dışbükey bir formülasyon elde edilmiş ve eniyi tahsisin açgözlü su doldurma yaklaşımı ile elde edildiği

gösterilmiştir.

Shum'ın [81] çalışmasında Gauss girişim kanalları için özyineli su doldurma tabanlı bir güç tahsisi algoritması incelenmiştir. Sistem işbirliksiz bir oyun olarak formüle edilmiştir. Kullanıcılar ölçülen girişim güçlerine dayanarak ve özyineli olarak güç tahsisini ayarlayarak kendi veri hızı ve üretilen iş değerini enbüyütmektedir. Önerilen algoritmanın Nash dengesine ulaşması için gerekli ve yeterli koşullar çıkarılmıştır.

Bhaskaran'ın 2010'daki [82] çalışmasında N adet vericili ve N adet alıcılı simetrik, tüm vericilerin tüm alıcılara girişim yaptığı bir haberleşme ağı incelenmektedir. Direkt bağ kazancının 1, çapraz bağ kazançlarının $\sqrt{\varepsilon}$ olarak varsayıldığı senaryodaki eniyileme problemi bireysel verici gücü kısıtı altında toplam veri hızını enbüyüten güç dağılımının bulunması olarak seçilmiştir. Sonuç olarak çapraz bağ kazançlarına bağlı olarak iki farklı durumun eniyi sonuca ulaştığı gösterilmektedir. Birinci durum, tüm kullanıcıların birbirine girişim uyguladığı genişbant, ikinci durum ise frekans bantlarının birbirine dik olduğu dikgen frekans bölüşümlü çoğullama durumudur. Eğer çapraz bağ kazancı $\varepsilon < 1/\sqrt{2}$ ise ve ortalama güç kısıtı düşükse tüm kullanıcıların genişbant durumunda çalışmaları, çapraz bağ kazancı $\varepsilon > 1/\sqrt{2}$ veya $\varepsilon < 1/\sqrt{2}$ ve ortalama güç kısıtı yüksekse kullanıcıların OFDM durumunda çalışmalarının eniyi sonuç olduğu gösterilmiştir.

Quek'in [83] çalışmasında kablosuz röle kanalları için bireysel güç kısıtları altında sinyal gürültü oranını (SNR) enbüyüten bir kaynak tahsisi problemi incelenmiştir. Eniyi güç dağılımına hemen hemen dışbükey eniyileme programları ile ulaşılabildiği gösterilmiştir.

İnaltekin'in 2011'deki [39] çalışmasında tek hücreli bir çoklu erişim kanalında bireysel doruk güç kısıtları altında toplam veri hızının enbüyütülmesi çalışmıştır. Tüm vericilerin alıcıda girişime sebep olduğu sistemde girişime gürültü gibi davranılarak problem oluşturulmuştur. İnaltekin bu problemin dışbükey ol-

madığını ancak Schur-dışbükey olduğunu gösterip bu senaryo için eniyi güç dağılımının ikili güç dağılımı olduğunu ve iletimde olan kullanıcıların kanallarının en iyi kullanıcılar olduğunu belirtmiştir. İkili güç dağılımında [84], en az bir kullanıcı iletişime katılmakta ve iletişimdeki bu kullanıcı da maksimum güçle iletişim yapmaktadır. Bu basit ikili güç dağılımı yönteminin girişimin yok sayılmadığı durumda eniyi sonucu vermesi ve bu yöntemin farklı senaryolarda farklı kısıtlar altında kullanılmaya elverişli olması bu çalışmada önerilen tezi motive etmiştir.

Yukarıda bahsedilen çalışmalarda geri besleme kanalının üzerinde herhangi bir kısıt olmadığı varsayılmaktadır. Ancak pratik sistemlerde geri besleme kanalı sonsuz kapasitede olmayacaktır. Geri besleme kısıtını gözönüne alan yakın zamanda yayınlanmış çalışmalar aşağıda sıralanmaktadır.

Qin'in geri besleme kısıtlı çoklu erişim kanalı çalışmasında [85], veri hızı ölçekleme kurallarını kullanıcıların sadece kendi kanal bilgilerine sahip oldukları dağıtılmış bir sistemde incelenmiştir.

Marsch'ın [86] çalışmasında hücresele bir ağdaki yukarı yönlü bağ kanalında veri hızı eniyilemesi yapılmıştır. Ancak, eniyileme problemi maliyet işlevi olan veri hızının hesabında kısıt olarak, yukarı yönlü bağ sinyal sezimi işleminde kullanılacak kullanıcı sayısı seçilmiştir.

Nekouei 2014'teki [87] bilişsel yukarı yönlü bağ ağlarında eniyi güç kontrolü ve toplam veri hızı ölçekleme konularını incelemiştir. Probleme geri besleme kısıtı eklenerek kullanıcıların sadece kendi kanallarını bilmeleri, diğer kullanıcıların kanallarını bilmemeleri durumu ele alınmıştır. Böylece, merkezi karar mekanizmalı bir çözüm yerine dağıtılmış güç kontrolü çözümü teknikleri incelenmiştir. Eniyi dağılımın eşik değerine bağlı bir su doldurma çözümü olduğu gösterilmiştir.

Geri besleme kısıtlı sistemler hakkında incelenen yukarıdaki çalışmalar da kullanıcıların aynı ortamdaki diğer kullanıcılara etkide bulunduğu girişimi he-

saba katmadıkları için bizim çalışmamızdan farklıdır. Bununla birlikte geri besleme kısıtı stratejileri de doğal olarak farklılıklar göstermektedir.

Tez kapsamındaki eniyileme problemlerinde kullanıcıların veri hızı büyültülmeye çalışılırken farklı kısıtlar göz önüne alınmıştır. Literatürdeki benzer kısıtları göz önüne alan çalışmalar aşağıdaki alt-bölümlerde incelenmektedir.

2.2.1 Girişim Kısıtlı Eniyileme Hakkında Önceki Çalışmalar

Ghasemi 2007'deki [20] çalışmasında birincil ve ikincil kullanıcıların aynı ortamda haberleşme yaptığı bir senaryo incelemektedir. Tüm vericilerin ve tüm alıcıların tam kanal durum bilgisine sahip olduğu varsayılan sistemde ikincil kullanıcının birincil alıcıya yaptığı girişim gücüne belirli bir kısıt eklenmiştir ve ikincil kullanıcının toplam kapasitesi enbüyültülmeye çalışılmıştır. Ghasemi problemin çözümünde Lagrange çarpanları yöntemini kullanarak eniyi güç dağılımının bir su doldurma çözümü olduğunu göstermiştir. Bu çalışma eksik kanal durum bilgisi olduğu durumda ve birden çok kullanıcı olduğu durumlarda eniyi güç dağılımını vermemektedir ve bu konularda incelemeye açıktır. Suraweera [88]'teki çalışmasında, Ghasemi'nin [20] çalışması ile aynı sistem modeli kullanılmıştır ve asimetrik sönümlmeli ortamlar için benzer sonuçlar elde edilmiştir.

Musavian'ın [89] çalışmasında bilişsel bir radyo ağındaki tek ikincil kullanıcının veri hızı çalışılmıştır. Ergodik kapasite, servis kesintisi kapasitesi ve endüşük veri hızı kapasitesi eniyilemesi problemlerinde girişim kısıtları altında gerçekleştirilmiştir.

Zhang 2009 ve 2010'daki [90,91] çalışmalarında da Ghasemi'nin çalışmasında olduğu gibi birincil ve ikincil kullanıcıların aynı ortamda haberleşmesini ele almakta, ancak bu sefer ikincil kullanıcıların çok sayıda olduğu çoklu erişim kanalı (MAC) ve yayın kanalı (BC) senaryolarını incelemektedir. Çoklu erişim kanalı senaryosunda N adet ikincil kullanıcı bir baz istasyonu ile haberleşmekte ve M adet birincil alıcıya girişimde bulunmaktadırlar. Yayın kanalındaysa bir

baz istasyonu N adet ikincil kullanıcı ile iletişimde bulunurken M adet birincil alıcıya da girişimde bulunmaktadır. Her iki senaryoda da ikincil kullanıcıların bireysel güç kısıtları ve birincil kullanıcılara yapılan toplam girişim gücü kısıtı altında ikincil kullanıcıların ergodik toplam kapasitesinin enbüyütülmesi çalışılmaktadır. Ayrıca Zhang'ın [92–94] çalışmalarında da yine ikincil kullanıcı veri hızı ve birincil kullanıcıya etki eden girişim gücü dikkate alınarak eniyileme problemleri çözülmüştür.

Kang'ın [95, 96] çalışmalarında tek birincil kullanıcı ile aynı izgeyi paylaşan tek ikincil kullanıcının bulunduğu bir bilişsel radyo ağında ikincil kullanıcıların ergodik kapasitelerini enbüyütecek ve servis kesintisi olasılığını enküçütecek güç tahsis stratejileri incelenilmiştir. İlk çalışmada birincil kullanıcıya uygulanan girişim, ikinci çalışmada da birincil kullanıcının servis kesintisi olasılığı probleme kısıtlar olarak eklenilmiştir. İlgili çalışmaların bizim çalışmalarımızdan farkı ergodik kapasitenin enbüyütülmesi ve tek ikincil kullanıcı kullanılmasıdır. Bizim çalışmamız birden fazla kullanıcı, alıcılarda ve vericilerden birden çok anten, çok-taşıyıcı ve geri besleme kısıtları gibi farklı senaryoları kapsamıyla farklılıklar göstermektedir.

Gong'un [97] çalışmasında aynı izgeyi kullanan birden çok ikincil ve tek birincil kullanıcıya sahip bir bilişsel radyo ağında bantgenişliği ve güç tahsis problemi incelenmektedir. Eniyileme probleminde ikincil kullanıcıların veri hızını enbüyütmeyi amaçlayan çalışmada kullanıcıların bireysel güç kısıtları ve birincil kullanıcıya uygulanan girişim değeri kısıtlar olarak seçilmiştir. Ancak bizim çalışmamızdan farklı olarak ikincil kullanıcıların birbirlerine girişim yapmayacak şekilde farklı frekans bantlarına atandığı varsayılmıştır.

Naeem'in [40] çalışmasında çoklu giriş çoklu çıkış bir bilişsel radyo ağında ikincil kullanıcıların veri hızı enbüyütülmeye çalışılmıştır. Eniyileme probleminde birincil kullanıcılara etki eden girişim belirli bir eşik değerinin altında tutulması kısıtı eklenmiştir. Ayrıca ikincil katmandaki çalışan kullanıcı sayısı da kısıtlanmıştır ve bu kullanıcılar nicemlendirilmiş güç değerlerinde çalışmaya zor-

lanmıştır. İlgili makalenin bizim çalışmamızdan farkları alt-eniyi çözümler bulmaları, kısıtlı sayıda ikincil kullanıcıyı eniyileme işlemine sokmaları ve sürekli güç değerleri kullanmayarak problemlerini basitleştirmiş olmaları olarak sayılabilmektedir.

Naeem'in [98] çalışmasında bilişsel radyo sistemlerinde bant paylaşımli röle senaryosu için ortak çoklu röle ataması ve güç tahsisi yöntemi önerilmiştir. İlgili problemde veri hızı, girişim kısıtları altında enbüyülmüştür. Problemin NP-zor ve dış bükey olmayan yapısı sebebiyle algoritmik bir çözüm önerilmiştir.

Javan'ın [99] çalışmasında birincil ve ikincil kullanıcıların aynı bantgenişliğini paylaştığı yukarı yönlü haberleşme için bir bilişsel radyo ağında, oyun teorisi kullanılarak kaynak tahsisi gerçekleştirilmiştir. Her birincil kullanıcının sabit veri hızları ve hedef SINR değerleri bulunan eniyileme probleminde ikincil kullanıcıların veri hızını enbüyülecek güç tahsisi yapılmaktadır. İkincil kullanıcıların birincil kullanıcıya uyguladığı girişim problemi etkilediği için bu kullanıcıların verici güçlerinde bağlaşım oluşmaktadır. Bu sebeple problem Nash denge problemleri sınıfına girmektedir.

2.2.2 Çoklu Antenli Sistemler Hakkında Önceki Çalışmalar

Jorswieck'in [100] çalışmasında çoklu giriş çoklu çıkış (MIMO), noktadan noktaya, hücresel bir sistem incelenmiştir. Çalışmada en kötü durum veri hızı eniyilemesi ile güç kontrolü gerçekleştirilmiştir. Farklı gürültü senaryoları için kapasite hesapları yapılmış ve tüm senaryolarda hesaplanabilen veri hızının vericide kanal durum bilgisinin olmadığı, yani, verici işbiriksiz MIMO senaryolar ile aynı veri hızlarına sahip olduğu görülmüştür.

Yu'nun [37, 101] çalışmasında vektörel bir çoklu erişim kanalı enbüyük veri hızı eniyilemesinde eniyi güç dağılımının özyineli bir su-doldurma çözümü ile bulunabileceği gösterilmiştir. Toplam kapasitenin karakterizasyonu, bütün kapasite bölgesi için alt ve üst sınırların çıkarımına da izin vermektedir.

Kobayashi'nin [102, 103] çalışmalarında Gauss MIMO yayın ve çoklu erişim kanallarında ağırlıklandırılmış veri hızını bireysel güç kısıtları altında enbüyültülmüştür. Çözümün özyineli bir su-doldurma çözümü olduğu gösterilen çalışmada algoritmanın yakınsadığı da ispatlanmıştır.

Scutari'nin [104] çalışmasında vektörel bir Gauss MIMO girişim kanalında karışıklı bilgiyi enbüyülten bir eniyileme problemi incelenilmiştir. Literatürdeki tekil olmayan kanal matrisi çözümlerinin geliştirilerek dikdörtgenel ve eksik kerteli kanal matrisine sahip senaryoları da kapsayan genel bir çözüm ortaya konulmuştur.

Soysal'ın [38] çalışmasında tek ve çok kullanıcı MIMO sistemlerde, alıcıda tam kanal durum bilgisinin ve vericideyse kısmi kanal durum bilgisinin olduğu varsayılan bir senaryoda, veri hızını enbüyültecek verici ortak değişinti matrisinin özdeğerlerinin bulunması incelenmiştir. Oluşturulan eniyileme probleminde evrensel eniyiye ulaşan özyineli bir algoritma önerilmiştir.

Yine Soysal'ın [105, 106] çalışmalarında sırasıyla tek kullanıcı ve çok kullanıcı senaryoları için, kanal kestirimi ve veri hızı parametreleri, vericide kısmi kanal durum bilgisi (CSI) olan bir MIMO iletişim sistemi için ortak bir eniyileme işlemine tutulmuştur. Problem, özyineli bir algoritmayla çözülebilen birden çok eniyileme problemine bölünerek çözülmüştür. Benzetim çalışmaları sonucunda algoritmanın farklı başlangıç noktalarından başlatılsa bile aynı noktaya yakınsadığı görülmüştür.

Adian'ın [107] çalışmasında MIMO bilişsel radyo ağları için verici gücü tahsisi problemi incelenmiştir. Amacın ikincil kullanıcıların toplam veri hızının enbüyültülmesi olan problemde bireysel güç kısıtlarının yanısıra adillik kısıtı da bulunmaktadır. Hem merkezi bir kontrol hem de dağıtılmış kontrol stratejilerinin incelendiği çalışmada eniyi güç dağılımı özyineli bir su doldurma çözümü olarak gösterilmiştir.

Çoklu antenli sistemler hakkında incelenen yukarıdaki çalışmalardan farklı ola-

rak bizim çalışmamızda kullanıcıların veri hızı enbüyütlürken aynı ortamda bulunan diğer kullanıcılara yapılan girişim de belirli bir eşik değerinin altında tutulmaya çalışılmıştır. Böylece, aynı ortamda farklı kullanıcı tiplerinin çalışabilmesi konsepti gözardı edilmemiştir.

2.2.3 Çok-Taşıyıcılı Sistemler Hakkında Önceki Çalışmalar

Yu'nun [108] çalışmasında frekans seçici ve girişime maruz kalan sayısal abone hattı (DSL) sistemlerinde çok kullanıcı güç kontrolü incelenmiştir. İşbiriksiz bir oyun olarak modellenen girişim kanalında iki oyuncu içim Nash denge noktasının varolduğu ve tek olduğu gösterilmektedir. Merkezi kontrole ihtiyaç duyulmadan, eniyi güç dağılımının özyineli bir su doldurma algoritması ile bulunabileceği belirtilmiştir.

Etkin'in [109] çalışmasında birden çok sistemin aynı ortamda iletişime katıldığı ve birbirlerine girişimde bulunduğu bir sistemde izge paylaşımı problemi incelenmiştir. Girişime gürültü gibi davranılan sistemde merkezi bir karar mekanizmasına ihtiyaç kalmadan adil ve verimli izge paylaşım kuralları çalışılmıştır. İşbirliğine izin verilmeyen senaryoda cezalandırma stratejileriyle eniyi ulaşılabilir veri hızları elde edilmiştir.

Luo'nun [69] çalışmasında çok kullanıcılı bir senaryoda kullanıcıların kanal durumlarına göre güç izgesel yoğunluklarının eniyilenmesini incelenmiştir. Kullanıcıların girişiminden dolayı her kullanıcının ulaşılabilir veri hızı bilgisi kendi ve kendi dışındaki kullanıcılarının PSD değerlerine de bağlılık göstermektedir. Eniyileme probleminde ağırlıklandırılmış veri hızı enbüyütlülmeye çalışılmıştır ve dışbükey olmayan problem basitleştirilerek çözülmüştür.

Wong'un [110] çalışmasında dikgen frekans bölüşümlü çoklu erişim (OFDMA) baz istasyonunun yayın kanalında ergodik ve ağırlıklandırılmış veri hızını enbüyülten bir eniyileme yapılarak, kullanıcılara OFDMA ara-taşıyıcıları ve güç tahsisini gerçekleştiren bir algoritma önerilmiştir.

Scutari'nin [111] çalışmasında Gauss frekans seçici girişim kanalları için, izge maskeleme ve güç kısıtları altında, veri hızı enbüyültmesi yapılmıştır. İşbirlik-siz bir oyun olarak tasarlanan problemin çözümünün bulunmasında asenkron özyineli su doldurma algoritması kullanılması önerilmiştir.

Hayashi'nin [112] çalışmasında kullanıcıların birbirlerine girişim uyguladığı frekans seçici bir ortamda iletişim incelenilmiştir. Bireysel güç kısıtları altında toplam veri hızını enbüyültecek izge paylaşım teknikleri çalışılmıştır. Çalışmada belirli koşullar altında en iyi izge paylaşımını frekans bölüşümlü çoklu erişim yöntemiyle bulunabileceği anlatılmıştır.

Ma'nın [113] çalışmasında yukarı yönlü bağı dikgen frekans bölüşümlü çoklu erişim için toplam veri hızı enbüyültme algoritmaları incelenmiştir. Lagrange çifteşliği eniyileme metotları kullanılarak bulunan algoritmalar ile sayısal sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca adil kaynak aktarımı sağlanması ve sistem karmaşıklığının azaltılması amacıyla farklı kısıtlar kullanılarak farklı problemler de çözülebilmektedir.

Çok-taşıyıcılı sistemler hakkında incelenen çalışmalar bizim çalışmamızdan birçok farklılık göstermektedir. Kullanıcıların farklı frekans bantlarında olmadığı ve kendi baz istasyonları ile haberleşirken birbirlerine de girişimde bulunduklarını varsayarak daha genel bir problemi incelemekteyiz. Ayrıca, veri hızı enbüyültülürken aynı ortamda bulunan diğer kullanıcıclara yapılan girişim de belirli bir eşik değerinin altında tutulmaya çalışılmıştır.

2.3 Farklı Maliyet İşlevlerine Sahip Diğer Çalışmalar

Kandukuri 2002'deki [15] çalışmasında N adet vericili ve N adet alıcılı, tüm vericilerin tüm alıcılara girişimde bulunduğu bir senaryoyu incelemektedir. Ayrıca Kandukuri girişim'in alıcılardaki gürültüden çok daha güçlü olduğunu varsayarak gürültüyü yoksaymaktadır. Çalışmada üç farklı eniyileme yöntemi öneren Kandukuri ilk problemde SIR değerine bağlı bir kesinti olasılığını kullanıcıların güç değerlerinin pozitif olması kısıtı altında çözmekte, ikinci problemde

SIR değerine bağlı bir yarar fonksiyonunu yine aynı kısıtlar altında enbüyltmekte ve son probleminde ise enkk ve enbüyük g kısıtları ve hedef kesinti olasılığı kısıtı altında toplam verici gücünü enkltmektedir. Tüm problemlerin dışbükey olduğu çalışmada geometrik programlama kullanılarak eniyi sonuçlara ulaşmıştır.

Elmusrati'nin [114] çalışmasında çok hücreli, çok kullanıcılı bir hücresel iletişim sisteminde verici gücü ve veri hızı tahsisi gerçekleştirilmiştir. Eniyileme problemi oluşturulurken tek parametre yerine çoklu parametre seçimi kullanılmıştır. Problemden toplam verici gücü enkltlecek, servis kesinti olasılığı enkltlecek ve toplam üretilen iş enbyltlecek şekilde bir maliyet işlevi seçilmiştir.

Zhao'nun [115] çalışmasında geniş bant CDMA hücresel sisteminde g kontrolü ve veri hızı tahsisi problemi incelenmiştir. Hedef SINR ve bit hata olasılığı kısıtları altında önerilen algoritmada veri hızı enbüyültme işlemi ve veri gücü enkltme işlemi ortaklaşa gerçekleştirilmektedir.

Papandriopoulos'un 2008'deki [116] çalışmasında L bağlı, S adet kaynak olan bir mobil tasarsız ağ (MANET) senaryosu incelenmekte ve hızlı sönümlenmeye maruz kalan kanallarda verici gücü dağılımı yapılmaktadır. Kullanıcılar arasındaki girişimin tamamen ortadan kaldırıldığının varsayıldığı çalışmada eniyileme probleminde sadece verici gclerinin veya veri hızlarının eniyilemesi incelenmemiş bu iki performans faktörünün bir kombinasyonu maliyet işlevi olarak seçilmiştir. Problemin dışbükey olmadığı gösterilip bazı rahatlatmalar yapılarak eniyiye yakın çözümler bulunabileceği gösterilmiştir.

Yine, Papandriopoulos'un 2009'daki [117] çalışmasında N kullanıcılı, L tonlu bir ayrık çoklu-ton (DMT) DSL sistemi incelemektedir. Senaryoda bazı kullanıcıların sabit veri hızında bazı kullanıcıların ise uyarlanır veri hızında sistemde varolduklarını varsayan Papandriopoulos aynı anda sabit veri hızlı kullanıcıların gclerini düşürmeyi ve uyarlanır veri hızlı kullanıcıların da ağırlıklandırılmış hızlarını arttırmayı amaçlı bir maliyet işlevi seçmektedir. Kısıtlarda da sabit

veri hızlı kullanıcılar için bir bireysel hedef veri hızı kısıtı ve tüm kullanıcılar için bireysel güç kısıtları olarak seçilmiştir. Eniyileme problemi NP-zor bir problemidir ve Papandriopoulos problemi çözebilmek için maliyet işlevinde ve kısıtlarda bazı rahatlatmalara giderek problemi standart bir içbükey eniyileme problemine dönüştürmüştür ve rahatlatılmış problem basit eniyileme yöntemleriyle çözülebilmektedir.

Yu'nun [118] çalışmasında çok kullanıcı, MIMO kablosuz röle sisteminde güç tahsisi ve çizelgeleme problemleri çalışılmıştır. Sistemdeki her düğümün birden fazla antene sahip olduğu varsayılan senaryoda kaynak ortak değişinti matrisi ve röle dönüşüm matrislerinin sistem performansını eniyeleyecek şekilde seçilmesi amaçlanmıştır. Hem veri hızı enbüyültmesi hem de verici gücü enküçültülmesi problemlerinin incelendiği çalışmada, dışbükey olmayan problemlerin getirdiği karmaşıklıktan dolayı, sayısal yöntemler kullanılarak eniyileme problemleri çözülmeye çalışılmıştır.

Sorooshyari'nin [119] çalışmasında bilişsel radyo ağlarında güç tahsisi için dört temel amaca bağlı belitsel bir çerçeve geliştirilmiştir. Bu dört temel, birincil kullanıcılar için servis kalitesi korunumu, ikincil kullanıcıların fırsatlardan yararlanması, ikincil kullanıcılar için onanırılık ve bireysel kullanıcıların otonom işlemleridir. Ayrıca arzu edilen lisanslama ve çok yönlülük hedefleri de incelenmiştir. Bu amaçları sağlayan yeni bir güç kontrol tekniği tanıtılmış ve girişim-farkında güç kontrol algoritmasının bu hedeflere ulaştığı gösterilmiştir.

Liang'ın [120] çalışmasında bağımsız paralel Gauss kanalları için Gauss olmayan girdilerin melez-hata durumunda otomatik yinelemeleri (H-ARQ) için güç tahsisi eniyileştirmesini incelemektedir. Sinyal gürültü oranı (SNR) değerine göre monotonik olarak azalmayan ve dış bükey genel maliyet işlevlerinin enbüyültülmesi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada iki farklı maliyet işlevi düşünülmüştür, bunlar sırasıyla karşılıklı bilgi ve sembol hata oranı olarak seçilmiştir. Ayrıca en uygun güç tahsisi için genelleştirilmiş bir civa/su doldurma algoritması önerilmiştir.

Cai'nin [121] çalışmasında MIMO bir iletişim sisteminde ağırlıklandırılmış en-küçük SINR değerinin enbüyültülmesi problemi ağırlıklandırılmış toplam verici gücü kısıtı altında incelenmiştir ve problemi eniyileyen güç dağılımı bulunmuştur. Eniyi sonuca yakınsayan bir algoritma ile hesaplanan güç dağılımının, kapalı formda yazılabilecek bir çözüm olarak da bulunabilmesi için problem küçük problemlere parçalanarak çözülmüştür.

Literatürdeki önemli çalışmalar ile tezde yapılan araştırmaların karşılaştırılması aşağıdaki tablolarda verilmektedir. İlk tabloda verici gücünü enküçülten çalışmalar ile karşılaştırmalar verilirken ikinci tabloda ise veri hızını enbüyülten çalışmalar ile karşılaştırmalar verilmektedir.

	SISO	MIMO	Taşıyıcı	Maliyet İşlevi	Kısıtlar
[36], [54]	✓	×	Tek	Toplam Verici Gücü	SINR
[57], [63]	×	✓	Tek	Toplam Verici Gücü	Veri Hızı
[56], [62]	×	✓	Tek	Toplam Verici Gücü	SINR
[58], [61]	✓	×	Çok	Toplam Verici Gücü	Veri Hızı Bit Hata
Kısım 3'teki Çalışmalar	✓	×	Tek	Toplam Veri Hızı	Verici Gücü Girişim Gücü
Kısım 4'teki Çalışmalar	×	✓	Tek	Toplam Veri Hızı	Verici Gücü Girişim Gücü
Kısım 5'teki Çalışmalar	✓	×	Çok	Toplam Veri Hızı	Verici Gücü Girişim Gücü
Kısım 6'daki Çalışmalar	✓	×	Tek	Toplam Veri Hızı	Verici Gücü Girişim Gücü Geri Besleme

	SISO	MIMO	Taşıyıcı	Maliyet İşlevi	Kısıtlar
[39]	✓	×	Tek	Toplam Veri Hızı	Verici Gücü
[103], [104]	×	✓	Tek	Toplam Veri Hızı	Verici Gücü
[108], [110]	✓	×	Çok	Toplam Veri Hızı	Verici Gücü
[85], [87]	✓	×	Çok	Toplam Veri Hızı	Verici Gücü Geri Besleme
[20], [90], [95]	✓	×	Tek	Toplam Veri Hızı	Verici Gücü Girişim Gücü
[97]	✓	×	Çok	Toplam Veri Hızı	Verici Gücü Girişim Gücü
[40], [98]	×	✓	Tek	Toplam Veri Hızı	Verici Gücü Girişim Gücü Kullanıcı Limiti Güç Düzeyleri
Kısım 3'teki Çalışmalar	✓	×	Tek	Toplam Veri Hızı	Verici Gücü Girişim Gücü
Kısım 4'teki Çalışmalar	×	✓	Tek	Toplam Veri Hızı	Verici Gücü Girişim Gücü
Kısım 5'teki Çalışmalar	✓	×	Çok	Toplam Veri Hızı	Verici Gücü Girişim Gücü
Kısım 6'daki Çalışmalar	✓	×	Tek	Toplam Veri Hızı	Verici Gücü Girişim Gücü Geri Besleme

3. İKİ KATMANLI AĞ YAPILARI - SISO TEK-TAŞIYICILI KANALLARDA ENİYİ GÜÇ DAĞILIMI

İncelenen ilk problem, çok kullanıcı, tek-taşıyıcı, tek-girdili tek-çıkıtlı (SISO) kanallardaki veri hızını enbüyültme problemidir. İlk problem en basit haliyle ele alınmaktadır, böylece, ilerideki kısımlarda bu probleme değişik kısıtlar ve yapılar eklenerek yeni senaryolar oluşturulacaktır.

Tek-taşıyıcı, tek-girdili tek-çıkıtlı senaryoda birinci ve ikinci katmanlarda birden çok kullanıcı olduğu varsayılmaktadır. Amaç, İKK'lerin veri hızını, İKK'lerin azami ve asgari güç kısıtları ile BKK'lere yapılan toplam girişim güç kısıtı altında enbüyültmektir. Bu yapı için eniyi güç dağılımına analitik bir çözüm bulunmuştur. Bu eniyi güç dağılımı çözümü sonucunda üç farklı ikinci katman kullanıcı kümesi ortaya çıkmaktadır. İlk kümenin (S_1) elemanları maksimum güçle ($P_{\max}$) çalışırken ikinci kümenin (S_2) elemanları kapalı durumdadır ve en fazla bir tane elemanı olan üçüncü kümedeki (S_3) kullanıcı da $(0, P_{\max})$ aralığında bir güçle çalışmaktadır. Kanal sinyal girişim oranı S_3 kümesindeki kullanıcıdan büyük olan kullanıcılar tam güçle çalışırken kanal sinyal girişim oranı daha düşük olan kullanıcılar kapalı durumda kalırlar.

Özel bir durum olarak, birinci katmanda aynı anda *tek aktif BKK* olduğu durum incelenmiştir. Literatürde sıklıkla kullanılan bu varsayım [122] herhangi bir iletişim aralığında en iyi kanala sahip kullanıcının iletişimine izin verilerek veri hızını arttırmak için kullanılır. Bir önceki durumdaki gibi eniyi güç dağılımı analitik olarak hesaplanabilmektedir ve yine sadece bir adet İKK $(0, P_{\max})$ aralığında bir güçle çalışırken diğer kullanıcılar ya tam güçle çalışacaktır ya da kapalı durumda kalacaktır.

İkinci bir özel durum olarak, birinci katmanda birden çok kullanıcının bulunduğu senaryoda, toplam girişim güç kısıtı yerine, BKK'lerin *bireysel girişim gücü eşik değerlerine* sahip oldukları varsayılmaktadır. Bu durumda problem formülasyonunda tek girişim kısıtı yerine BKK sayısı kadar girişim kısıtı olacaktır. Bu

problem analitik olarak çözülememiştir ancak yapısı gereği dışbükey eniyileme araçları kullanılarak evrensel eniyi güç dağılımı bulunabilmektedir. Bu sayısal çözümlemenin yanısıra, eniyi güç dağılımının analitik olarak bulunabilmesi için, sezgisel bir çözüm yoluna yönlendirecek bir teori elde edilmiştir. Bu teoriye göre, eniyi güç dağılımında üç farklı ikinci katman kullanıcı kümesi vardır. İlk kümenin (S_1) elemanları maksimum güçle ($P_{\max}$) çalışır, ikinci kümenin (S_2) elemanları kapalı durumdadır ve en fazla bireysel girişim kısıtı sayısı kadar elemanı olan üçüncü kümedeki (S_3) kullanıcılar da $(0, P_{\max})$ aralığında bir güçle çalışırlar. Bu senaryo için ayrıca toplam girişim senaryosu eniyi güç dağılımı çözümünde bulunan yöntemler kullanılarak analitik olarak hesaplanabilen çok yakın üst ve alt veri hızı sınırları hesaplanmıştır.

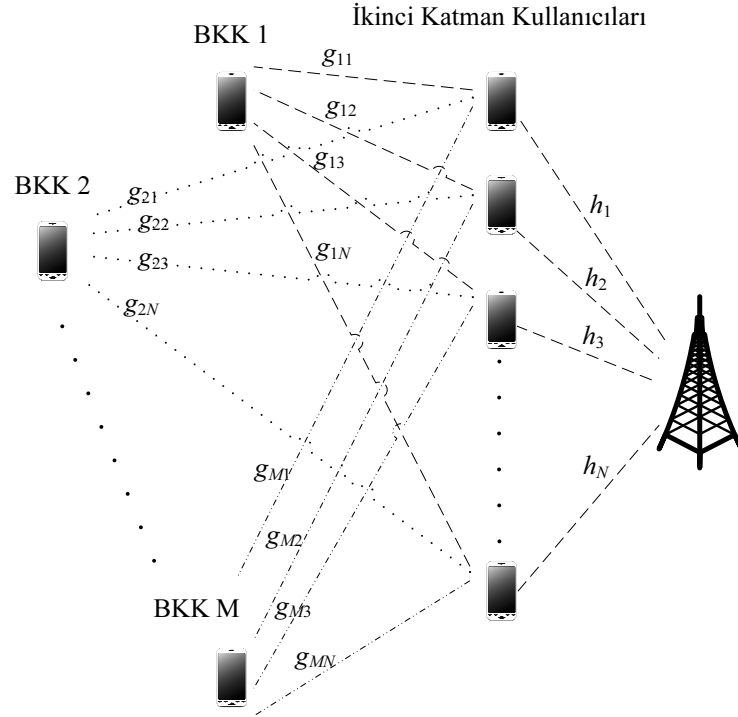
3.1 İlgili Çalışmalar ve Katkıları

Daha önce literatür taraması kısmında bahsedildiği gibi literatürde sıklıkla kullanılan kaynak tahsisi çalışmaları incelenmiştir [68, 70, 72, 82]. Ancak bu çalışmalar ortamdaki diğer kullanıcılara yapılan girişimi göz önüne almamaktadırlar. Aynı ortamdaki kullanıcıların aynı kaynakları kullanırken birbirlerine uyguladıkları girişimi göz önüne alarak sınırladıkları çalışmalar literatürde mevcuttur. Ancak bu tez çalışması birçok yönden ilgili çalışmaların açıklarını kapatmaktadır. Örneğin Ghasemi'nin [20] ve Suraweera'nın [88] çalışmalarında hem birinci katmanda hem de ikinci katmanda tek kullanıcı olduğu varsayılmıştır. Bu çalışmada ise her iki katmanda da birden çok kullanıcı incelenerek daha genel bir problem ele alınmıştır. Zhang'in [90, 91] çalışmalarından farklı olarak eniyi güç tahsisi için kapalı formda analitik olarak çözülebilen bir sonuç ortaya çıkarılmıştır. Diğer çalışmalar daha hakkında detaylı bilgi literatür taraması kısmında bulunabilir.

3.2 Sistem Modeli

Şekil 3.1'de, heterojen bir yapıya sahip iki katmanlı bir senaryo gösterilmektedir. Birinci katman, R_c yarıçaplı bir servis alanını kapsayan merkezi bir ağ ve

bu katmanın kullanıcılarından, ikinci katman da bu merkezi ağın içerisindeki R_f yarıçaplı servis alanına sahip bir ağ ve bu katmanın kullanıcılarından oluşmaktadır. Senaryoda, aynı kanal kaynaklarını kullanan M adet BKK ve N adet İKK vardır. İKK'ler kendi baz istasyonlarıyla (İkinci Katman Baz İstasyonu, İKB) haberleşirken, BKK'lere girişimde bulunmaktadır. İkinci katman kullanıcıları baz istasyonları ile bir çoklu erişim kanalı oluşturmaktadırlar ve İKB'de sıralı girişim giderimi [65] yapılabilirdiği varsayılarak çoklu erişim kanalında İKK'ler arası girişimin tamamen ortadan kaldırıldığı kabul edilmektedir. h_i ve g_{ji} , sırasıyla, i . İKK ile İKB arasındaki direkt kanal katsayılarını ve i . İKK ile j . BKK arasındaki girişim kanal katsayılarını göstermektedir. Bu katsayılar sıfır ortalamaya ve birim varyansa sahip kompleks Gauss bağımsız dağılımlardan seçilmişlerdir.



Şekil 3.1. SISO Tek-Taşıyıcılı Sistem Modeli

Tam kanal durum bilgisinin tüm kullanıcılarda ve baz istasyonunda bulunduğu varsayılan sistemde bireysel güç kısıtları ve BKK'lere yapılan toplam girişim

kısıtı altında İKK'lerin veri hızını enbüyültme problemi

$$\begin{aligned}
 \mathbf{p}^* = \arg \max_{\mathbf{p}} \quad & R_{\text{toplaml}} = \log_2 \left(1 + \frac{\sum_{i=1}^N |h_i|^2 P_i}{N_0} \right) \\
 \text{s.t.} \quad & P_i \geq 0, \quad \forall i \\
 & P_i \leq P_{\max}, \quad \forall i \\
 & \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N |g_{ji}|^2 P_i \leq Q,
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

şeklindedir. Burada P_i , i . İKK'nin verici gücünü, R_{toplaml} , İKK'lerin toplam veri hızını, N_0 İKB'deki gürültü gücünü, Q BKK'lerin tolere edebileceği toplam girişim gücü eşik değerini ve $\mathbf{p}^* = [P_1^* \ P_2^* \ \dots \ P_N^*]$ eniyi güç dağılımı vektörünü göstermektedir. İKK'lerin toplam veri hızı Kısım 2.3.3'te açıklandığı gibi formül (1.11) kullanılarak hesaplanmıştır.

Logaritma tekdüze artan bir fonksiyon olduğu için, $\log_2 \left(1 + \frac{\sum_{i=1}^N |h_i|^2 P_i}{N_0} \right)$ işle-

vini enbüyülten güç vektörü aynı zamanda $\sum_{i=1}^N |h_i|^2 P_i$ işlevini de enbüyültecek-

tir. Bu sebeple, problemdeki maliyet işlevi basitleştirilerek $\sum_{i=1}^N |h_i|^2 P_i$ şeklinde yazılabilir. Bu durumda problem

$$\begin{aligned}
 \mathbf{p}^* = \arg \max_{\mathbf{p}} \quad & \sum_{i=1}^N |h_i|^2 P_i \\
 \text{s.t.} \quad & P_i \geq 0, \quad \forall i \\
 & P_i \leq P_{\max}, \quad \forall i \\
 & \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N |g_{ji}|^2 P_i \leq Q,
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

şeklini alacaktır. Doğrusal programlama formundaki bu problemin çözümünün

basit bir ikili güç tahsisi olduğu Teori 3.1’de ispatlanmaktadır.

Teori 3.1 *M adet BKK, K adet İKK içeren iki katmanlı bir hücresel sistemin, azami güç kısıtları ve birincil katman kullanıcılarına etki eden toplam girişim kısıtı altında eniyi güç dağılımında 3 farklı kullanıcı kümesi vardır. İlk kümenin (S_1) elemanları maksimum güçle ($P_{\max}$) çalışır, ikinci kümenin (S_2) elemanları kapalı durumdadır ve son kümenin de (S_3) en fazla bir tane elemanı olabilir ve bu tek kullanıcı $(0, P_{\max})$ arasında bir güçle çalışır. Tam güçle çalışan kullanıcıların kanal sinyal girişim oranı $\frac{|h_i|^2}{\sum_{j=1}^M |g_{ji}|^2}$, ara güçle çalışan kullanıcının kanal sinyal girişim oranından büyüktür ve kapalı kullanıcıların kanal sinyal girişim oranı bu kullanıcıdan küçüktür.*

İspat 3.1

İlk olarak toplam girişim kısıtı $\sum_{i=1}^N \left(\sum_{j=1}^M |g_{ji}|^2 \right) P_i = \sum_{i=1}^N I_i P_i \leq Q$ şeklinde yazılarak girişim kanal katsayıları tek dizine düşürülecektir, burada $I_i = \sum_{j=1}^M |g_{ji}|^2$ değişken tanımı yapılmıştır. Sürekli rasgele değişkenlerin toplamı olan I_i de yine sürekli bir rasgele değişkendir.

Problem (3.2)’ye bakıldığında maliyet işlevinin ve tüm kısıtların doğrusal oldukları görülmektedir. Buradan yola çıkılarak problemin çözümünü bulmak için problemin Lagrangian’ı hesaplanmalı ve Karush-Kuhn-Tucker (KKT) koşulları [30] incelenmelidir. Problemin Lagrangian’ı

$$L = \sum_{i=1}^N |h_i|^2 P_i - \sum_{i=1}^N \mu_i (P_i - P_{\max}) + \sum_{i=1}^N \alpha_i P_i - \lambda \left(\sum_{i=1}^N I_i P_i - Q \right),$$

ve KKT koşulları da

$$\left. \frac{\partial L}{\partial P_i} \right|_{P_i=P_i^*} = |h_i|^2 - \mu_i + \alpha_i - \lambda \hat{g}_i = 0, \forall i, \quad (a)$$

$$\mu_i (P_i - P_{\max}) = 0, \forall i, \quad (b)$$

$$\alpha_i P_i = 0, \forall i, \quad (c)$$

$$\lambda \left(\sum_{i=1}^N I_i P_i - Q \right) = 0, \quad (d)$$

şeklindedir. Burada $\alpha_i, \mu_i (i = 1, 2, \dots, N)$ ve λ sırasıyla asgari güç kısıtı, azami güç kısıtı ve toplam girişim kısıtı ile ilgili Lagrange çarpanlarını göstermektedir. Girişim kısıtının Lagrange çarpanı λ 'nın alabileceği iki farklı değer üzerinden problem ele alınmalıdır.

1. $\lambda = 0$: Bu durumda (a) koşulu $|h_i|^2 = \mu_i - \alpha_i$ şeklini alır. $|h_i|^2$ 'in her kanal durumu için pozitif olduğu ve Lagrange çarpanlarının negatif olamayacağı bilindiğine göre

$$\mu_i - \alpha_i > 0 \implies \mu_i > 0.$$

olacaktır. KKT koşullarına bakıldığında $\mu_i > 0$ sağlandığı durumlarda da $P_i - P_{\max} = 0$ olmak zorundadır. Öyleyse tüm kullanıcılar maksimum güçle çalışmaktadırlar.

2. $\lambda > 0$: Varsayılmsinki bir k kullanıcısı vardır ve $0 < P_k^* < P_{\max}$ gücüyle çalışmaktadır. Bu kullanıcının gücü 0 veya $P_{\max}$ olmadığı için (b) ve (c) koşullarına bakıldığında $\mu_k = \alpha_k = 0$ olduğu görülür. Bu eşitlikler de (a) koşulunu $\lambda = |h_k|^2 / I_k$ haline getirir. $|h_k|^2$ ve I_k sürekli olasılık dağılımlarından seçildiği için $\lambda = |h_k|^2 / I_k$ eşitliğini sağlayan en fazla bir adet $(|h_k|^2, I_k)$ çifti vardır. Bu durumda 0 ile $P_{\max}$ güçleri arasında çalışan en fazla bir adet kullanıcı olabilir. Bu kullanıcı (varsa) S_3 kümesini oluşturmaktadır.

Böylece tüm ikinci katman kullanıcıları içerisinde üç farklı kullanıcı kümesi oluşturulmuştur. S_1 kümesinde maksimum güçle çalışan kullanıcılar, S_2 kümesinde iletişime katılmayan kullanıcılar ve en fazla bir elemanı olan S_3 kümesinde de 0 ve $P_{\max}$ arasında güçle çalışan tek kullanıcı vardır. Şimdi bulunan λ , (a) koşulunda yerine yazılarak I_i

$$|h_i|^2 = \mu_i + \lambda I_i = \mu_i + \frac{|h_k|^2}{I_k} I_i,$$

$$I_i = \frac{I_k}{|h_k|^2} (|h_i|^2 - \mu_i),$$

şeklinde bulunacaktır ve bulunan I_i de (d) koşulunda yerine yazılarak

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^N I_i P_i &= Q, \\ \sum_{i \in S_1}^N I_i P_i + \sum_{i \in S_2}^N I_i P_i + \sum_{i \in S_3}^N I_i P_i &= \sum_{i \in S_1}^N P_{\max} I_i + P_k^* I_k = Q, \\ \frac{I_k}{|h_k|^2} \left(\sum_{i \in S_1}^N P_{\max} |h_i|^2 + P_k^* |h_k|^2 \right) &= Q + \frac{I_k}{|h_k|^2} P_{\max} \sum_{i \in S_1}^N \mu_i, \\ \sum_{i \in S_1}^N P_{\max} |h_i|^2 + P_k^* |h_k|^2 &= \frac{|h_k|^2}{I_k} Q + P_{\max} \sum_{i \in S_1}^N \mu_i, \\ \underbrace{\sum_{i \in S_1}^N P_{\max} |h_i|^2 + P_k^* |h_k|^2}_{\text{Toplam Alınan Güç}} &= \frac{|h_k|^2}{I_k} Q + P_{\max} \sum_{i \in S_1}^N \mu_i. \end{aligned} \quad (3.3)$$

şeklindeki eniyileme için gerekli koşullar elde edilecektir. Yukarıdaki (3.3) formülünde eşitliğin sol tarafına bakıldığında problem (3.2)'nin maliyet işlevi olan ikincil baz istasyonuna gelen toplam güç ifadesi görülmektedir. Eşitliğin sağ tarafında da sabit olmayan tek eleman μ_i 'dir. Problemin amacı da alıcıya gelen toplam gücü enbüyülmek olduğu için yukarıdaki eşitliğin sağ tarafını enbüyülmek gerekmektedir, bu da μ_i 'nin pozitif olması gerektiği anlamına gelir. Bu da

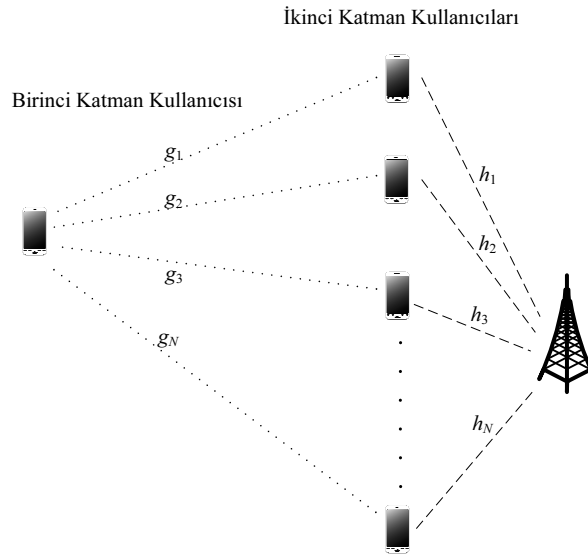
$$\mu_i = |h_i|^2 - \frac{|h_k|^2}{I_k} I_i > 0 \implies \frac{|h_i|^2}{I_i} > \frac{|h_k|^2}{I_k}.$$

eşitsizliğini ortaya çıkaracaktır. Bu sonuca göre bir k kullanıcısı vardır

ve bu k kullanıcısı 0 ile $P_{\max}$ arasında bir güçle çalışmaktadır. $|h_i|^2 / l_i$ oranı bu kullanıcının $|h_k|^2 / l_k$ oranından büyük olan kullanıcılar, kanalları iyi olan kullanıcılar olarak nitelendirilir ve maksimum güçle çalışırlar. $|h_i|^2 / l_i$ oranı bu kullanıcının $|h_k|^2 / l_k$ oranından küçük olan kullanıcılar da, kanalları kötü olan kullanıcılar olarak nitelendirilir ve iletişime katılmazlar. Böylece Teori 3.1 ispatlanmış olmaktadır.

Teori 3.1’de açıklanan eniyi güç tahsisi basit bir algoritmayla hesaplanabilmektedir. Tüm İKK’lerin kanal sinyal girişim oranları (KSGO, $\frac{|h_i|^2}{\sum_{j=1}^M |g_{ji}|^2} = \frac{|h_i|^2}{l_i}$) büyükten küçüğe sıralanır ve en büyük KSGO’ya sahip kullanıcıdan başlanarak kullanıcılara sırayla tam güç verilir. Herhangi bir kullanıcıya tam güç verildikten sonra toplam girişim kısıtı aşıldığı takdirde o kullanıcının gücü toplam girişim kısıtı eşitlikle sağlanıncaya kadar düşürülür. Bu işlem Algoritma 3.1’de gösterilmektedir.

3.3 Özel Durum - Tek BKK



Şekil 3.2. SISO Tek-Taşıyıcılı Sistem Modeli - Tek BKK

Şekil 3.2’de, aynı kanal kaynaklarını kullanan 1 tane BKK, N tane İKK ve il-

Algoritma 3.1 SISO - Birden Çok BKK için Eniyi Güç Dağılımı

Girdi: Direkt kanal katsayısı vektörü $\mathbf{h} \in \mathbb{C}^N$ ve girişim kanal katsayısı matrisi $\mathbf{G} \in \mathbb{C}^{M \times N}$

Çıktı: Eniyi güç dağılımı vektörü $\mathbf{p}^*(\mathbf{h}, \mathbf{G})$

İlk Değerler: $I_i = \sum_{j=1}^M |g_{ji}|^2$. İKK'ların kanal sinyal girişim oranlarını, $\frac{|h_i|^2}{I_i}$, $1 \leq$

$i \leq N$, büyükten küçüğe sırala: $\frac{|h_{\pi(1)}|^2}{I_{\pi(1)}} \geq \dots \geq \frac{|h_{\pi(N)}|^2}{I_{\pi(N)}}$. $j \geq 2$ için eşitle

$P_{\pi(1)}^*(\mathbf{h}, \mathbf{G}) = P_{\max}$, $P_{\pi(j)}^*(\mathbf{h}, \mathbf{G}) = 0$, $Q^{(0)} = 0$, $Q^{(1)} = I_{\pi(1)} P_{\max}$ ve $k = 1$.

while $Q^{(k)} \leq Q$ ve $k < N$

$k = k + 1$

$Q^{(k)} = Q^{(k-1)} + I_{\pi(k)} P_{\max}$

$P_{\pi(k)}^*(\mathbf{h}, \mathbf{G}) = P_{\max}$

end while

if $Q^{(k)} \leq Q$ **then**

$\mathbf{p}^*(\mathbf{h}, \mathbf{G})$ tüm İKK'lar maksimum güçle çalışacak şekilde seçilir.

else

$$P_{\pi(k)}^*(\mathbf{h}, \mathbf{G}) = \frac{Q - Q^{(k-1)}}{I_{\pi(k)}}$$

end if

Çıktı $\mathbf{p}^*(\mathbf{h}, \mathbf{G})$

gili ikinci katman baz istasyonunu barındıran bir iletişim ağı görünmektedir. Yine, ilk katman, R_c yarıçaplı bir servis alanını kapsayan merkezi bir ağ ve bu katmanın kullanıcılarından, ikinci katman da bu merkezi ağın içerisindeki R_f yarıçaplı servis alanına sahip bir ağ ve bu katmanın kullanıcılarından oluşmaktadır. Önceki senaryodan tek fark, birinci katmanda aynı iletişim diliminde aktif tek kullanıcı olmasıdır. İKB'de yine sıralı girişim giderimi yapılabildiği varsayılmaktadır, ancak, İKK'ler kendi baz istasyonlarıyla (İKB) iletişimde bulunurken, tek BKK'ye girişimde bulunmaktadırlar. h_i ve g_i , sırasıyla, i . İKK ile İKB arasındaki ve i . İKK ile BKK arasındaki kanalı göstermektedir. Bu katsayılar sıfır ortalamaya ve birim varyansa sahip kompleks Gauss dağılımlardan seçilmişlerdir.

Tam kanal durum bilgisinin tüm kullanıcılarda ve baz istasyonunda bulunduğu varsayılan sistemde bireysel güç kısıtları ve BKK'ye yapılan toplam girişim kısıtı altında İKK'lerin veri hızını enbüyültme problemi

$$\begin{aligned} \mathbf{p}^* = \arg \max_{\mathbf{p}} \quad & R_{\text{toplaml}} = \log_2 \left(1 + \frac{\sum_{i=1}^N |h_i|^2 P_i}{N_0} \right) \\ \text{s.t.} \quad & P_i \geq 0, \quad \forall i \\ & P_i \leq P_{\max}, \quad \forall i \\ & \sum_{i=1}^N |g_i|^2 P_i \leq Q, \end{aligned}$$

şeklindedir. Burada P_i , i . İKK'nin bireysel verici gücünü, N_0 İKB'deki gürültü gücünü, $\mathbf{p}^* = [P_1^* \ P_2^* \ \dots \ P_N^*]$ eniyi güç dağılımı vektörünü, R_{toplaml} İKK'lerin toplam veri hızını, Q toplam girişim gücü eşik değerini göstermektedir. Logaritma tekdüze artan bir fonksiyon olduğu için problemdeki maliyet işlevi bir önceki senaryoda olduğu gibi basitleştirilerek $\sum_{i=1}^N |h_i|^2 P_i$ şeklinde yazılabilir. Bu

durumda tek BKK için problem

$$\begin{aligned}
 \mathbf{p}^* = \arg \max_{\mathbf{p}} \quad & \sum_{i=1}^N |h_i|^2 P_i \\
 \text{s.t.} \quad & P_i \geq 0, \quad \forall i \\
 & P_i \leq P_{\max}, \quad \forall i \\
 & \sum_{i=1}^N |g_i|^2 P_i \leq Q,
 \end{aligned} \tag{3.4}$$

şeklini alacaktır. Problem incelendiğinde, birden çok BKK senaryosuyla aynı formülasyonda olduğu görülecektir. Tek fark $I_i \iff |g_i|^2$ değişken değişikliğinin yapılmış olmasıdır. Bu durumda eniyi güç dağılımı çözümü birden çok BKK senaryosunda olduğu gibi basit bir ikili güç tahsisi olacaktır.

Teori 3.2 *Tek BKK, K İKK içeren iki katmanlı bir hücresel sistemin, azami güç kısıtları ve birincil katman kullanıcılarına etki eden toplam girişim kısıtı altında eniyi güç dağılımında 3 farklı kullanıcı kümesi vardır. İlk kümenin (S_1) elemanları maksimum güçle ($P_{\max}$) çalışır, ikinci kümenin (S_2) elemanları kapalı durumdadır ve son kümenin de (S_3) en fazla 1 tane elemanı olabilir ve bu 1 adet kullanıcı $(0, P_{\max})$ arasında bir güçle çalışır. Tam güçle çalışan kullanıcıların kanal sinyal girişim oranı $\frac{|h_i|^2}{|g_i|^2}$, ara güçle çalışan kullanıcının kanal sinyal girişim oranından büyüktür ve kapalı kullanıcıların kanal sinyal girişim oranı bu kullanıcıdan küçüktür.*

İspat 3.2

Tek BKK eniyi güç dağılımı çözümünün ispatı için $I_i \iff |g_i|^2$ değişken değişikliği yapılarak İspat 3.1'deki adımlar izlenebilir.

Tek BKK eniyi güç tahsisi yine birden çok BKK senaryosunda kullanılan algoritmayla hesaplanabilmektedir. Tüm İKK'lerin kanal sinyal girişim oranları

(KSGO, $\frac{|h_i|^2}{|g_i|^2}$) büyükten küçüğe sıralanır ve en büyük KSGO'ya sahip kullanıcıdan başlanarak kullanıcılara sırayla tam güç verilir. Herhangi bir kullanıcıya tam güç verildikten sonra toplam girişim kısıtı aşıldığı takdirde o kullanıcının gücü toplam girişim kısıtı eşitlikle sağlanıncaya kadar düşürülür. Bu işlem $I_i \iff |g_i|^2$ değişken değişikliği yapıp Algoritma 3.1'de gösterildiği gibi gerçekleştirilir.

Toplam girişim kısıtı incelendiği durumda BKK sayısının problem formülasyonunu değiştirmedeği SISO kanal senaryosunda gösterilmiştir. Anlatım karmaşıklığının azalması açısından sonraki bölümlerde, toplam girişim kısıtı incelendiği durumlarda, tek aktif birinci katman kullanıcısı olduğu varsayılacaktır.

3.4 Özel Durum - Birden Çok BKK - Bireysel Girişim Gücü Eşik Değerleri

Yine iki katmanlı senaryoda, ilk katman, R_c yarıçaplı bir servis alanını kapsayan merkezi bir ağ ve bu katmanın kullanıcılarından, ikinci katman da bu merkezi ağın içerisindeki R_f yarıçaplı servis alanına sahip bir ağ ve bu katmanın kullanıcılarından oluşmaktadır. Sistem modeli toplam girişim gücü kısıtı senaryosundan farklı olmayan bireysel girişim gücü eşik değerleri senaryosu Şekil 3.1'de gösterildiği gibidir. İlk senaryoyle aynı şekilde, h_i ve g_{ji} , sırasıyla, i . İKK ile İKB arasındaki direkt kanal katsayılarını ve i . İKK ile j . BKK arasındaki girişim kanal katsayılarını göstermektedir. Bu katsayılar sıfır ortalamaya ve birim varyansa sahip kompleks Gauss bağımsız dağılımlardan seçilmişlerdir.

M adet BKK ve N adet İKK'den oluşan sistemde tüm kullanıcılar aynı kaynakları kullanmaktadırlar. İKK'ler İKB ile haberleşirken, BKK'lere girişimde bulunmaktadır. İkinci katman kullanıcıları baz istasyonları ile bir çoklu erişim kanalı oluşturmaktadırlar ve İKB'de sıralı girişim giderimi yapılabildiği varsayılarak çoklu erişim kanalında İKK'ler arası girişimin tamamen ortadan kaldırıldığı kabul edilmektedir.

Bu senaryoda da eldeki problem İKK'lerin toplam veri hızını enbüyüktür. Asgari ve azami güç kısıtlarının yanısıra problemde bu sefer birinci katman

kullanıcılarının bireysel girişim gücü eşik değerleri kısıtları eklenmiştir. Bu senaryo için problem

$$\begin{aligned} \mathbf{p}^* = \arg \max_{\mathbf{p}} \quad & R_{\text{toplaml}} = \log_2 \left(1 + \frac{\sum_{i=1}^N |h_i|^2 P_i}{N_0} \right) \\ \text{s.t.} \quad & P_i \geq 0, \quad \forall i \\ & P_i \leq P_{\max}, \quad \forall i \\ & \sum_{i=1}^N |g_{ji}|^2 P_i \leq Q_j, \quad \forall j, \end{aligned}$$

şeklindedir. Burada P_i , i . İKK'nin verici gücünü, R_{toplaml} , toplam veri hızını, N_0 İKB'deki gürültü gücünü ve $\mathbf{p}^* = [P_1^* \ P_2^* \ \dots \ P_N^*]$ eniyi güç dağılımı vektörünü göstermektedir. Q_j her bir BKK'nin bireysel girişim gücü eşik değerlerini göstermektedir. Logaritma tekdüze artan bir fonksiyon olduğu için

$$\log_2 \left(1 + \frac{\sum_{i=1}^N |h_i|^2 P_i}{N_0} \right),$$

işlevini enbüyükten güç vektörü aynı zamanda $\sum_{i=1}^N |h_i|^2 P_i$ işlevini de enbüyültecektir. Bu sebeple, problemdeki maliyet işlevi basitleştirilerek yeni problem

$$\begin{aligned} \mathbf{p}^* = \arg \max_{\mathbf{p}} \quad & \sum_{i=1}^N |h_i|^2 P_i \\ \text{s.t.} \quad & P_i \geq 0, \quad \forall i \\ & P_i \leq P_{\max}, \quad \forall i \\ & \sum_{i=1}^N |g_{ji}|^2 P_i \leq Q_j, \quad \forall j, \end{aligned} \tag{3.5}$$

şeklini alacaktır. Yukarıdaki problemin hem maliyet fonksiyonu hem de tüm kısıtları doğrusal fonksiyonlardır. Bu durumda problem bir doğrusal programlama şeklinde yazılabilir. Ancak, birden çok girişim kısıtı olması problem çözümünü karmaşıktırmaktadır. Bunun sebebi, girişim kısıtlarının herbirinin, problemin olurlu kümesinde kesiklere neden olması ve olurlu kümenin köşe sayısını arttırmasına sebep olmasıdır. Bilindiği gibi bir doğrusal programlama probleminin eniyi çözümü olurlu kümenin köşelerinden herhangi bir tanesindedir [30] ve köşe sayısının artışı problem çözümünü zorlaştırmaktadır. Bu sebeplerden ötürü probleme basit ve açık bir çözüm elde edilememiştir. Probleme analitik bir çözüm bulunamamasına rağmen, maliyet işlevi ve kısıtların doğrusal yapısı sayesinde, literatürdeki dışbükey optimizasyon araçları kullanılarak eniyi güç dağılımı bulunmaktadır.

Sayısal sonuçlar incelendiğinde, ilginç bir sonuç olarak görülmüştür ki, eniyi güç dağılımında 3 adet kullanıcı kümesi vardır (S_1 , S_2 , S_3). S_1 kümesindeki kullanıcılar maksimum güçle çalışmaktadır, S_2 kümesindeki kullanıcılar iletişime katılmamaktadır ve S_3 kümesindeki kullanıcılar $0 < P_k^* < P_{\max}$ ara güç değeriyle çalışmaktadır. Doğrusal programlama özellikleri kullanılarak sayısal sonuçlarda gözlenen bu durumun matematiksel açıklaması yapılmıştır. Önemli bir bulgu olarak S_3 kümesinin eleman sayısının üst sınırının BKK sayısı kadar olacağı ispatlanmıştır. Bu sonuçlar aşağıda özetlenmektedir.

Teori 3.3 *M BKK, K İKK içeren iki katmanlı bir hücresel sistemin, azami güç kısıtları ve birincil katman kullanıcılarına etki eden bireysel girişim kısıtları altında eniyi güç dağılımında 3 farklı kullanıcı kümesi vardır. İlk kümenin (S_1) elemanları maksimum güçle ($P_{\max}$) çalışır, ikinci kümenin (S_2) elemanları kapalı durumdadır ve son kümenin de (S_3) en fazla M tane elemanı olabilir ve bu M adet kullanıcı da $(0, P_{\max})$ arasında bir güçle çalışır.*

İspat 3.3

Birden çok BKK içeren senaryoda M tane BKK ve N tane İKK olduğu varsayılmaktadır. İlgili senaryonun problem formülasyonu (3.5)'te gösterilmektedir. Görüldüğü gibi problemin maliyet işlevi ve kısıtları doğrusaldır. Bunun gibi doğrusal programlama problemlerinin çözümünde, ilk olarak eşitsizlik kısıtlarına yapay değişkenler eklenir ve eşitlik kısıtı haline getirilir [30]. Bu işlem sonrasında problem

$$\begin{aligned}
 \mathbf{p}^* = \arg \max_{\mathbf{p}} \quad & \sum_{i=1}^N |h_i|^2 P_i \\
 \text{s.t.} \quad & P_i \geq 0, \quad \forall i, \\
 & P_i + P_k = P_{\max}, \quad \forall i, k, \\
 & \sum_{i=1}^N (|g_{ji}|^2 P_i) + P_l = Q_j, \quad \forall j, l,
 \end{aligned} \tag{3.6}$$

şeklinde olacaktır. Burada, P_i , i . İKK'nin gücünü göstermektedir ancak P_k 'lar ($k = N + 1 : 2N$) ve P_l 'ler ($l = 2N + 1 : 2N + M$) yapay değişkenlerdir. Problem vektör formunda yazılırsa

$$\begin{aligned}
 \max \quad & \mathbf{c}^T \mathbf{p}_{\text{yeni}} \\
 \text{s.t.} \quad & \mathbf{p}_{\text{yeni}} \succeq \mathbf{0} \\
 & \mathbf{A} \mathbf{p}_{\text{yeni}} = \mathbf{b},
 \end{aligned} \tag{3.7}$$

elde edilir. Burada

$$\mathbf{c} = \begin{bmatrix} |h_1|^2 \\ \vdots \\ |h_N|^2 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}_{(2N+M) \times 1}, \mathbf{p}_{\text{yeni}} = \begin{bmatrix} P_1 \\ \vdots \\ P_{2N+M} \end{bmatrix}_{(2N+M) \times 1}$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{N \times N} & & \\ [\mathbf{g}_1^T]^2 & & \\ \vdots & \mathbf{I}_{(N+M) \times (N+M)} & \\ \vdots & & \\ [\mathbf{g}_M^T]^2 & & \end{bmatrix}_{(N+M) \times (2N+M)}, \mathbf{b} = \begin{bmatrix} P_{\max} \\ \vdots \\ P_{\max} \\ Q \\ \vdots \\ Q \end{bmatrix}_{(N+M) \times 1},$$

matris ve vektörleri kullanılmıştır. $[\mathbf{g}_j^T]^2 = [|g_{j1}|^2 \ |g_{j2}|^2 \ \dots \ |g_{jN}|^2]$, $j = 1 : M$, vektörü girişim kanal kazançlarının mutlak karelerini barındıran vektördür.

Eşitlik kısıtı matrisi $\mathbf{A}_{(N+M) \times (2N+M)}$, boyutlarından dolayı en fazla $N + M$ adet doğrusal bağımsız kolona sahip olabilir. Bilindiği gibi [30], bir doğrusal programlama problemi için, eniyi sonuç, olurlu kümenin bir köşe noktasında yer almak zorundadır, ve bu köşe noktaları $\mathbf{A}\mathbf{p}_{\text{yeni}} = \mathbf{b}$ eşitliğiyle gösterilen kısıtların temel olurlu çözüm noktalarıdır. Bir çözüm noktasının temel olurlu çözüm noktası olabilmesi için $2N + M$ elemanından N tanesinin sıfır olması gerekmektedir [123]. Yani, toplam değişken sayısı ile $\mathbf{A}$ matrisinin doğrusal bağımsız kolon sayısının farkı kadar elemanın sıfır olması gerekmektedir. Bu durumda $\mathbf{p}_{\text{yeni}}^*$ vektörünün, eniyi sonuç durumunda, en azından N adet elemanı sıfır olmalıdır.

Kullanıcıların ara güç değerinde çalışması için P_k 'lerin sıfırdan farklı olması gerekmektedir ($P_k = 0 \implies P_i = P_{\max}$). $\mathbf{p}_{\text{yeni}}^*$ vektörünün N elemanı sıfır olacağından, en fazla sayıda ara güçle çalışan kullanıcıya sahip olabilmek için, girişim kısıtı yapay değişkenleri (P_i) sıfır olmalıdır. Çünkü, en fazla sayıda P_i

sıfır yapılmalıdır ki sıfır yapılması gereken değişken sayısı azalsın ve en az sayıda P_k sıfır olsun. Bu nedenle, en az sayıda P_k 'nin sıfır olabilmesi için, M adet P_i 'nin yani tüm girişim kısıtı ile ilintili yapay değişkenlerin sıfır olduğu varsayılmaktadır.

İspatın başında $\mathbf{p}_{\text{yeni}}^*$ vektörünün en azından N elemanının sıfır olması gerektiğinden bahsedilmiştir, M tane P_i sıfır olarak kabul edildiğine göre geriye $N - M$ (en azından $N - M$) tane daha sıfır olması gereken değişken (geriye kalan değişkenler N tane P_i ve N tane P_k 'dir) kalmıştır. $P_i + P_k = P_{\max}$, kısıtı incelenirse, P_i gücü ve ona karşılık gelen P_k yapay değişkeni aynı anda sıfır olamayacaktır, çünkü bu durum $0 = P_{\max}$ çelişmesine yol açacaktır. Öyleyse N adet maksimum güç kısıtının $N - M$ tanesinde P_i veya P_k sıfıra eşit olacaktır. Bu durumda en fazla $N - (N - M) = M$ adet P_k yapay değişkeni sıfırdan farklı olacaktır. M tane P_k 'nin sıfırdan farklı olması da bu yapay değişkenlere denk gelen M tane P_i 'nin $(0, P_{\max})$ aralığında olmasını gerektirir. Böylelikle, en fazla M adet İKK ara güç değeriyle, yani, $(0, P_{\max})$ aralığında güçle çalışacaktır. Bu sayı girişim kısıtı sayısına ve dolayısıyla BKK sayısına eşittir. Diğer İKK'ler ya tam güçle çalışacaktır ya da hiç çalışmayacaklardır.

Yukarıdaki ispat eniyi güç dağılımına analitik bir çözüm getirmemekle birlikte probleme yönelik sezgisel bir çözüm yoluna yönlendirmektedir.

Önceden bahsedildiği gibi bireysel girişim gücü eşik değerleri senaryosu için eniyi güç dağılımı dışbükey optimizasyon araçlarıyla bulunabilmektedir. Bu araçların kullanılmadığı alıcı sistemlerinde kullanılması için tek BKK senaryosundaki problemin analitik çözümü kullanılarak hesaplanabilen eniyiye çok yakın üst ve alt sınırlar bulunabilir. Gerektiği takdirde bu sınırlara ulaşan güç dağılımlarının kullanılması makul bir performans kaybına rağmen işlem karmaşıklığının azalması açısından faydalı olacaktır.

3.4.1 Üst Sınır

Bireysel girişim gücü eşik değerlerine sahip birden çok BKK senaryosunda üst sınır hesaplanırken, tüm BKK'lerin pasif olduğu ve sadece bir adet BKK'nin aktif olduğu varsayılarak İKK'lerin kapasitesi hesaplanmaktadır. Bu işlem tüm BKK'lerin sırayla aktif hale getirilmesi ile devam ettirilmektedir. Elde edilen en küçük toplam veri hızı değeri üst sınır olarak belirlenmektedir. Bu üst sınırın algoritmik ifadesi aşağıda verilmektedir.

Algoritma 3.2 Bireysel girişim gücü eşik değerine sahip birden çok BKK için üst sınır veri hızına ulaşan güç dağılımı

Girdi: Direkt Kanal Katsayısı vektörü $\mathbf{h} \in \mathbb{C}^N$ ve girişim kanal katsayısı matrisi $\mathbf{G} \in \mathbb{C}^{M \times N}$

Çıktı: Üst sınır veri hızına ulaşan güç dağılımı vektörü $\mathbf{p}_{\text{üst}}^*(\mathbf{h}, \mathbf{G})$

For $i = 1 : M$

i . BKK'yi aktifleştir, diğerlerini kapat.

Algoritma 3.1'i çalıştır, güç dağılımını hesapla ve $\mathbf{p}_i$ vektöründe sakla.

End For

En düşük veri hızına ulaşan güç dağılımı vektörü üst sınır güç dağılımı vektörüdür, $\mathbf{p}_{\text{üst}}^*$.

Çıktı $\mathbf{p}_{\text{üst}}^*(\mathbf{h}, \mathbf{G})$

Pratikte üst sınır hesaplanırken tüm kapasiteleri teker teker hesaplamak yerine en çok girişime maruz kalacak BKK haricindeki kullanıcıları yok saymak yani kanal kazançlarının ortalaması en yüksek olan BKK haricindeki kullanıcıları kapatmak daha akılcı bir yöntem olarak seçilebilmektedir.

3.4.2 Alt Sınır

Bireysel girişim gücü eşik değerlerine sahip birden çok BKK senaryosunda alt sınır hesaplanırken, ilk olarak üst sınıra ulaşan güç dağılımı vektörü hesaplanır. Ardından tüm BKK'lerin bireysel girişim eşik değeri kısıtları sağlanana kadar kanal sinyal girişim oranı en kötü kullanıcıdan başlanarak İKK'lerin güç-

leri azaltılmaktadır. Bu alt sınırın algoritmik ifadesi aşağıda verilmektedir.

Algoritma 3.3 Bireysel girişim gücü eşik değerine sahip birden çok BKK için alt sınır veri hızına ulaşan güç dağılımı

Girdi: Direkt Kanal Katsayısı vektörü $\mathbf{h} \in \mathbb{C}^N$ ve girişim kanal katsayısı matrisi $\mathbf{G} \in \mathbb{C}^{M \times N}$

Çıktı: Alt sınır veri hızına ulaşan güç dağılımı vektörü $\mathbf{p}_{\text{alt}}^*(\mathbf{h}, \mathbf{G})$

Algoritma 3.2'yi çalıştır.

Üst sınırı veren BKK'yi k . kullanıcı olarak sakla.

For $i = 1 : M, i \neq k$

Repeat

 En kötü kanal sinyal girişim oranına sahip İKK'dan başlayarak kullanıcıların gücünü azalt,

Until $Q_i = \mathbf{p}_{\text{alt}}^T \mathbf{G}_{i,1:N}$ sağlanana kadar.

End For

Çıktı $\mathbf{p}_{\text{alt}}^*(\mathbf{h}, \mathbf{G})$

Hem üst sınır hem de alt sınır hesaplanırken görülmüştür ki BKK'lerin girişim kanalı güç kazançlarının ortalama değerleri birbirinden uzaklaştıkça sınırlar eniyi çözüme daha yakın sonuçlar vermektedirler. BKK'lerden herhangi birinin ortalama girişim kanalı güç kazancı diğer BKK'lere göre çok daha büyük olduğu durumlarda düşük ortalama kazançta sahip BKK'lerin eniyileme problemine girişim kısıtı olarak etkisi neredeyse yok denecek kadar az olduğu için bu sonuç mantıklıdır.

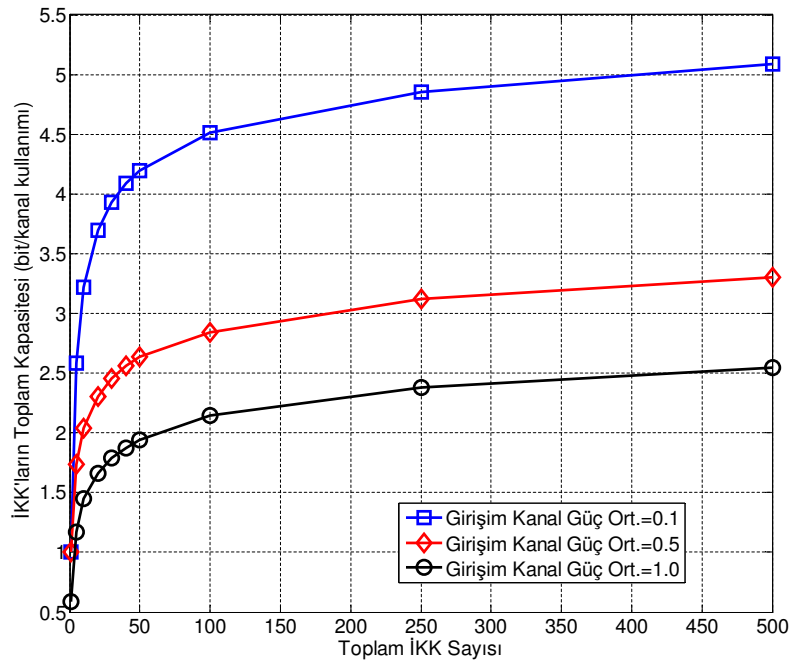
3.5 Benzetim Çalışmaları

Bu bölümde, incelenen üç farklı senaryo için toplam veri hızı sonuçları belirtilmiştir. Veri hızının İKK sayısı, BKK sayısı, girişim kanal güç ortalamaları ve girişim gücü eşik değeri gibi değişkenlere göre değişimi incelenmiştir. Benzetim çalışmalarında hem girişim kanalları (İKK'ler ve BKK'ler arasında) hem de direkt kanallar (İKK'ler ve İKB arasında) Rayleigh sönmülemeli olarak seçil-

miştir. Benzetimleri farklı kanal durumlarında gerçekleştirmek basit bir şekilde yapılabilir.

Tüm benzetim çalışmalarında bireysel maksimum güç kısıtı 1 W olarak seçilmiştir. Rayleigh sönümlmeli direkt kanal güç kazançlarının ortalaması tüm simülasyonlarda 1 olacak şekilde sabit tutulmuştur. Alıcılardaki eklenir beyaz Gauss gürültüsünün birim varyansa sahip olduğu varsayılmaktadır.

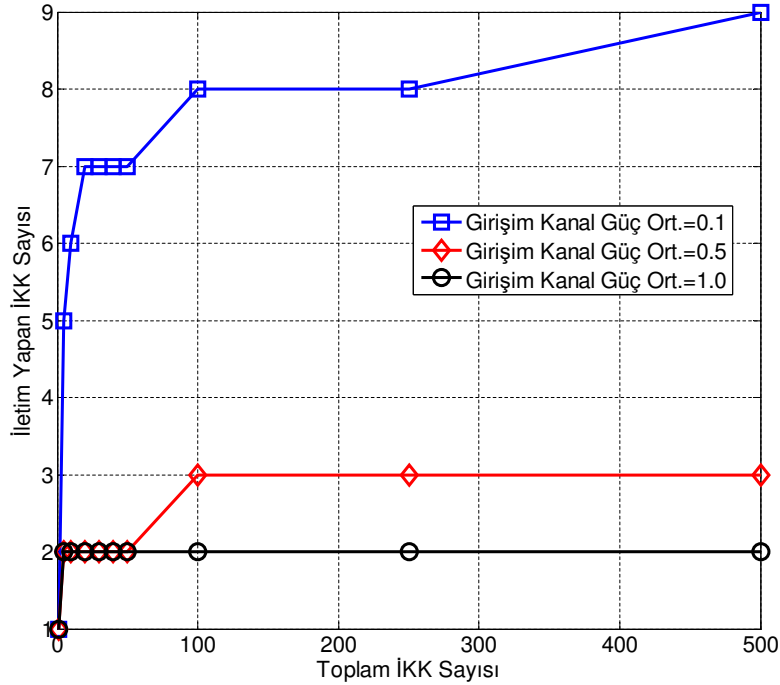
3.5.1 Birden Çok BKK - Toplam Girişim Gücü Eşik Değeri Kısıtı



Şekil 3.3. Toplam Girişim Gücü Eşik Değeri - Rayleigh Direkt ve Girişim Kanalları - İKK Sayısına Karşılık Veri Hızı Değişimi

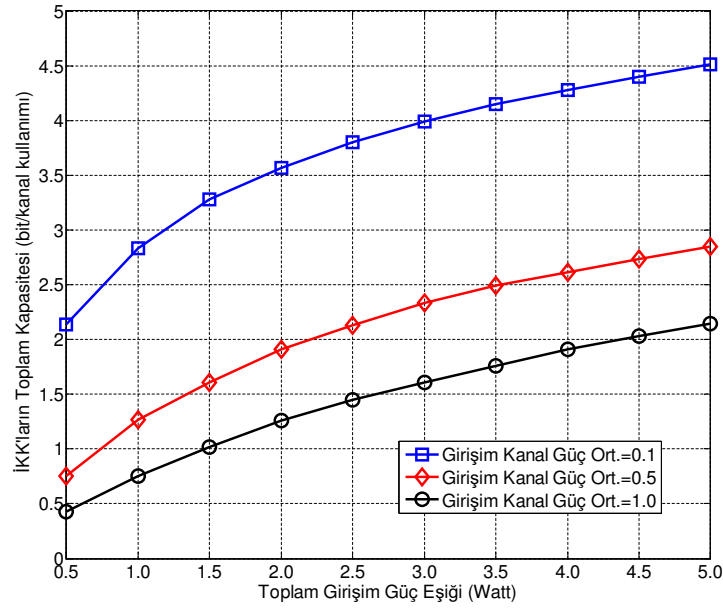
Toplam girişim gücü eşik değeri kısıtı altında yapılan ilk benzetim çalışmasında BKK başına düşen girişim gücü eşiği $Q = 0.5\text{ W}$ olarak seçilmiştir, birinci katmanda 10 adet BKK olduğu varsayılan sistemdeki toplam girişim gücü eşik değeri bu durumda 5 W olacaktır. Şekil 3.3'te hem direkt hemde girişim kanalları Rayleigh sönümlmelidir, toplam veri hızının farklı sayıda İKK'ler ve farklı girişim kanalı güç kazancı ortalamalarına göre değişimi gösterilmektedir. Gi-

rişim kanal güç kazançları ortalama değeri arttıkça İKK'lerin toplam veri hızı azalmaktadır. Bu durum beklenen bir sonuçtur, çünkü, girişim kanal güç kazançları arttıkça toplam girişim kısıtından dolayı İKK'lerin alabileceği güç değerleri azalmaktadır ve bu da veri hızlarının azalmasına sebep olmaktadır. İKK sayısı arttıkça veri hızının artması çok kullanıcı çeşitliliğinden kaynaklanmaktadır. Bu durum Şekil 3.4'te görölmektedir. Sisteme yeni kullanıcılar eklendikçe kanal sinyal girişim oranı daha iyi olan kullanıcıların ortaya çıkma ihtimali artmaktadır ve çalışan kullanıcı sayısı değişmese bile veri hızında artış gerçekleşmektedir.

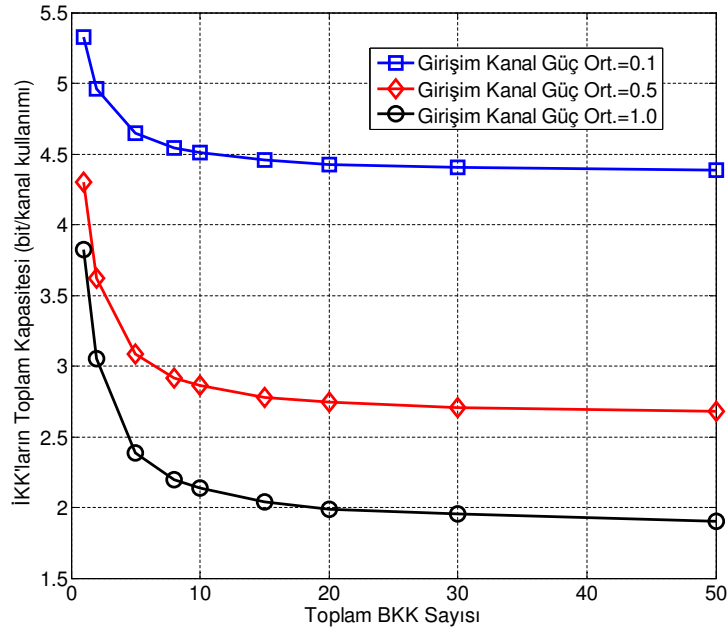


Şekil 3.4. Toplam Girişim Gücü Eşik Değeri - Rayleigh Direkt ve Girişim Kanalları - İKK Sayısına Karşılık İletime Katılan İKK Sayısı

Birinci katmanda 10 adet BKK ve ikinci katmanda 100 adet İKK olan simölasyonda toplam veri hızı farklı girişim kanalı güç kazancı ortalamaları ve farklı girişim güç eşik değeri kısıtları için hesaplanmıştır ve Şekil 3.5'te gösterilmektedir. Yatay ekseninde her BKK başına düşen girişim gücü eşik değeri gösterilmektedir ve dikey ekseninde bu değerlere karşılık gelen veri hızları verilmiştir.



Şekil 3.5. Toplam Girişim Gücü Eşik Değeri - Rayleigh Direkt ve Girişim Kanalları - Girişim Eşik Değerine Karşılık Veri Hızı Değişimi

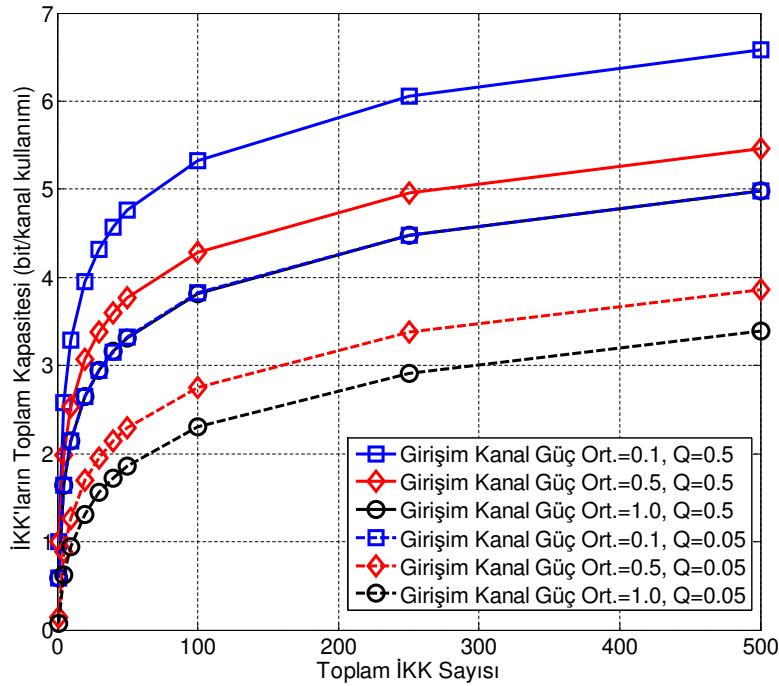


Şekil 3.6. Toplam Girişim Gücü Eşik Değeri - Rayleigh Direkt ve Girişim Kanalları - BKK Sayısına Karşılık Veri Hızı Değişimi

Beklenildiği gibi, girişim eşik değerinin artırılması ilgili kısıtın rahatlatılmasına sebep olduğu için performansı arttırmaktadır. Daha fazla İKK iletişime katılabildiği için veri hızı artmaktadır.

Şekil 3.6'da toplam veri hızının farklı sayıda BKK'ler ve farklı girişim kanalı güç kazancı ortalamalarına göre değişimi gösterilmektedir. Girişim gücü eşik değeri BKK başına $0.5 W$ olarak sabit tutulmuştur. BKK sayısı arttıkça İKK'lerin toplam veri hızı azalmaktadır. BKK sayısı arttıkça ikinci katmanın sebep olduğu girişim de artmaktadır. Bu durumda İKK'lerin daha az güçle çalışmalarına sebep olmakta ve veri hızlarının düşmesi ile sonuçlanmaktadır.

3.5.2 Özel Durum - Tek BKK

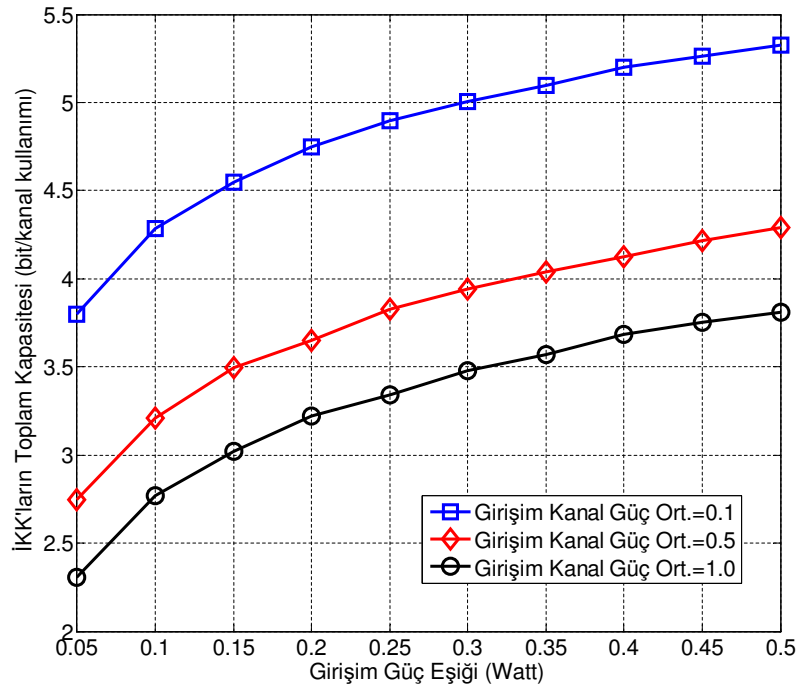


Şekil 3.7. Tek BKK - Rayleigh Direkt ve Girişim Kanalları - İKK Sayısına Karşılık Veri Hızı Değişimi

Şekil 3.7'de, hem direkt hem de girişim kanalları Rayleigh sönümlmeli kanallardır. Toplam veri hızı farklı sayıda İKK'ler, farklı girişim kanalı güç kazancı ortalamaları ve farklı girişim gücü eşik değerleri için hesaplanmıştır. Bek-

lenildiği gibi, girişim kanal kazançlarının ortalaması arttıkça toplam veri hızı azalmaktadır. Ayrıca girişim eşik değerinin artırılması ilgili kısıtın rahatlatılmasına sebep olduğu için performansı arttırmaktadır. Yine, birden çok BKK senaryosunda olduğu gibi, çok kullanıcı çeşitliliği sayesinde İKK sayısı arttıkça veri hızındaki artış belirgin bir şekilde görülebilmektedir.

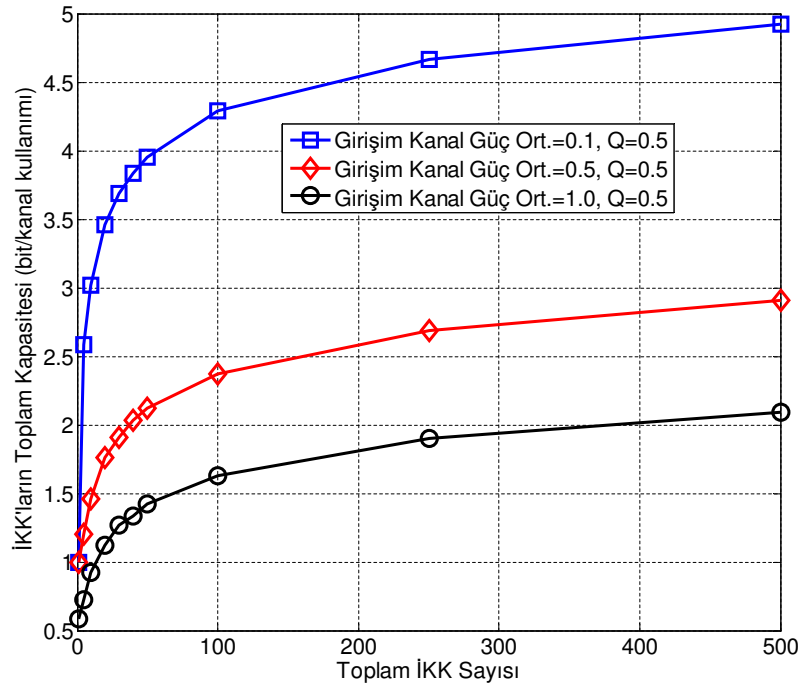
Şekil 3.8’de, toplam veri hızı 100 adet İKK için farklı girişim kanalı güç kazancı ortalamaları ve farklı girişim güç eşik değeri kısıtları için hesaplanmıştır. Önceki benzetim çalışmasında olduğu gibi, girişim kanal kazançlarının ortalaması arttıkça veri hızı azalmakta ve girişim eşik değeri arttıkça veri hızı artmaktadır.



Şekil 3.8. Tek BKK - Rayleigh Direkt ve Girişim Kanalları - Girişim Eşik Değerine Karşılık Veri Hızı Değişimi

3.5.3 Özel Durum - Birden Çok BKK - Bireysel Girişim Gücü Eşik Değerleri Kısıtları

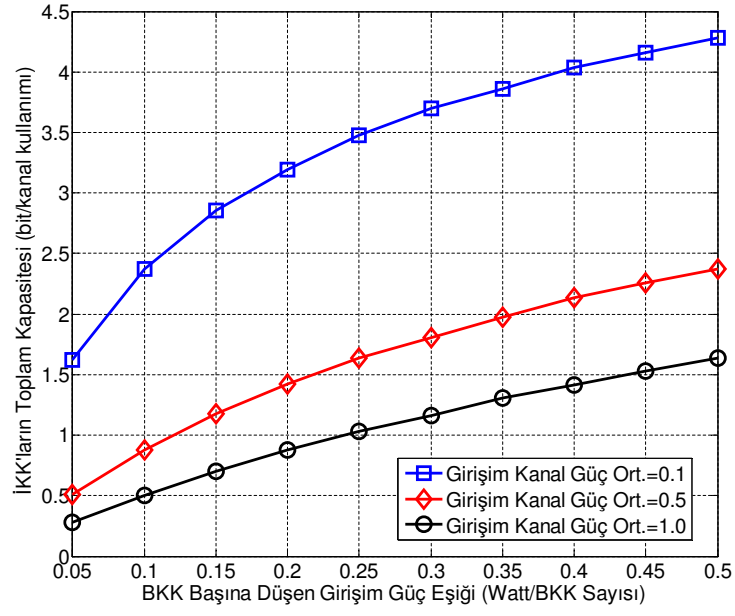
Bireysel girişim gücü eşik değerleri ile kısıtlanan problemde eniyi güç dağılımları için sayısal çözümler dışbükey eniyileme araçları kullanılarak bulunmuştur.



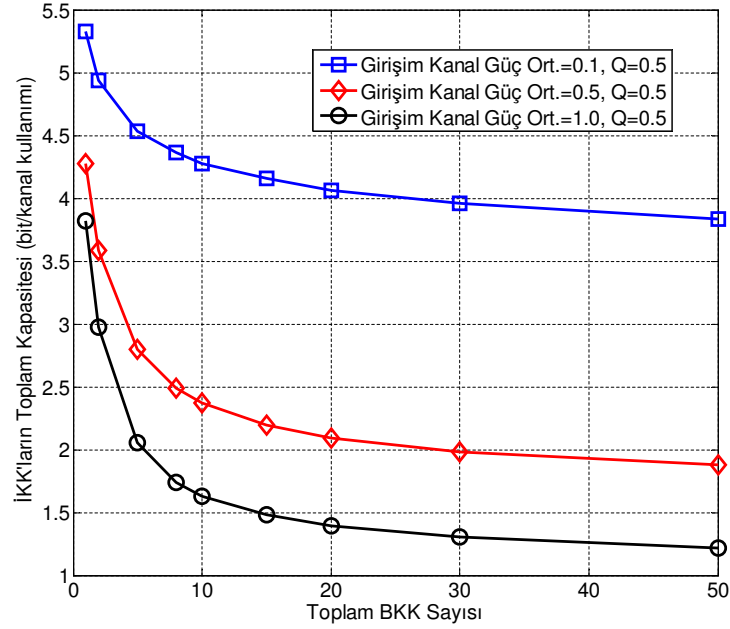
Şekil 3.9. Bireysel Girişim Gücü Eşik Değeri - Rayleigh Direkt ve Girişim Kanalları - İKK Sayısına Karşılık Veri Hızı Değişimi

Birinci katmanda 10 adet BKK olan ilk simülasyonda hem direkt hemde girişim kanalları Rayleigh sönümlmelidir. Şekil 3.9'da toplam veri hızının farklı sayıda İKK'ler ve farklı girişim kanalı güç kazancı ortalamalarına göre değişimi gösterilmektedir. Girişim gücü eşik değeri $0.5W$ olarak sabit tutulmuştur. Yine çok kullanıcı çeşitliliği sayesinde İKK sayısı arttıkça veri hızındaki artış belirgin bir şekilde görülebilmektedir.

Birinci katmanda 10 adet BKK ve ikinci katmanda 100 adet İKK olan simülasyonda toplam veri hızı farklı girişim kanalı güç kazancı ortalamaları ve farklı girişim gücü eşik değeri kısıtları için hesaplanmıştır ve Şekil 3.10'da gösterilmektedir. Girişim gücü eşik değeri her BKK için aynı değer olarak alınmıştır. Veri hızındaki değişim önceki benzetim çalışmalarıyla uyumluluk göstermektedir.

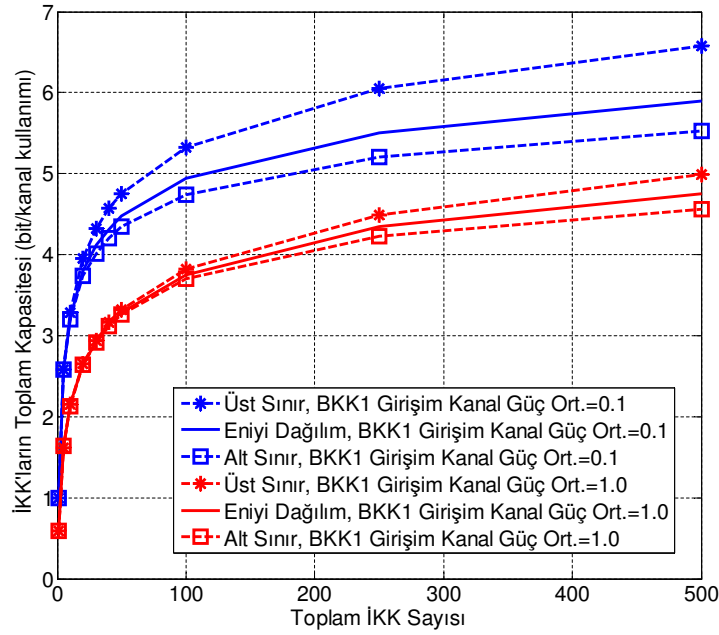


Şekil 3.10. Bireysel Girişim Gücü Eşik Değeri - Rayleigh Direkt ve Girişim Kanalları - Girişim Eşik Değerine Karşılık Veri Hızı Değişimi



Şekil 3.11. Bireysel Girişim Gücü Eşik Değeri - Rayleigh Direkt ve Girişim Kanalları - BKK Sayısına Karşılık Veri Hızı Değişimi

Şekil 3.11'de toplam veri hızının farklı sayıda BKK'ler ve farklı girişim kanalı güç kazancı ortalamalarına göre değişimi gösterilmektedir. Girişim gücü eşik değeri $0.5W$ olarak sabit tutulmuştur. BKK sayısı arttıkça İKK'lerin toplam veri hızı azalmaktadır. Bu durum BKK sayısının artmasının eniyileme problemindeki kısıt sayısı artışına sebep olmasından dolayı gerçekleşmektedir.

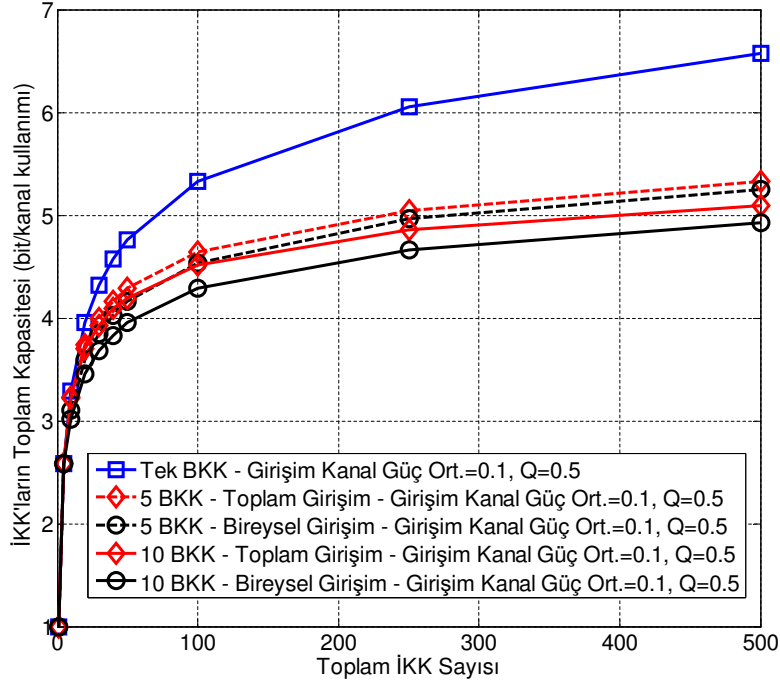


Şekil 3.12. Bireysel Girişim Gücü Eşik Değeri - İki Adet BKK - Eniyi Çözüme karşı Üst ve Alt Sınır Değerleri

Önceden bahsedildiği gibi, bireysel girişim gücü eşik değeri senaryosunda analitik olarak hesaplanabilen üst ve alt sınırlar bulunmuştur. Birinci katmanda iki adet BKK bulunduğu varsayılan senaryoda, girişim kanalları daha kötü olan BKK'nin yok sayılarak bulunan üst sınır benzetim sonuçları ve iki BKK'nin da hesaba katılarak hesaplanan alt sınır için benzetim sonuçları Şekil 3.12'de, Rayleigh sönümlmeli direkt ve girişim kanalları için gösterilmektedir. İkinci BKK'nin girişim kanalları güç ortalaması 0.1 değerinde sabit tutulurken birinci BKK'de bu değer değiştirilmektedir. Girişim gücü eşik değeri $0.5W$ olarak sabit tutulmuştur. Şekilden de görüldüğü gibi analitik olarak hesaplanabilen üst ve alt sınırlar eniyi dağılım ile hesaplanan veri hızına çok yakındır. Bu benzetimden,

İKK-BKK arasındaki girişim kanallarının ortalama güç kazançları arasındaki farkın artmasıyla hem üst sınırın hem de alt sınırın eniyi sonuca yaklaştığı sonucu çıkartılmaktadır. Girişime daha az katkıda olan BKK'nin problemde daha az kısıtlayıcı hale gelmesi bu sonucu doğurmaktadır.

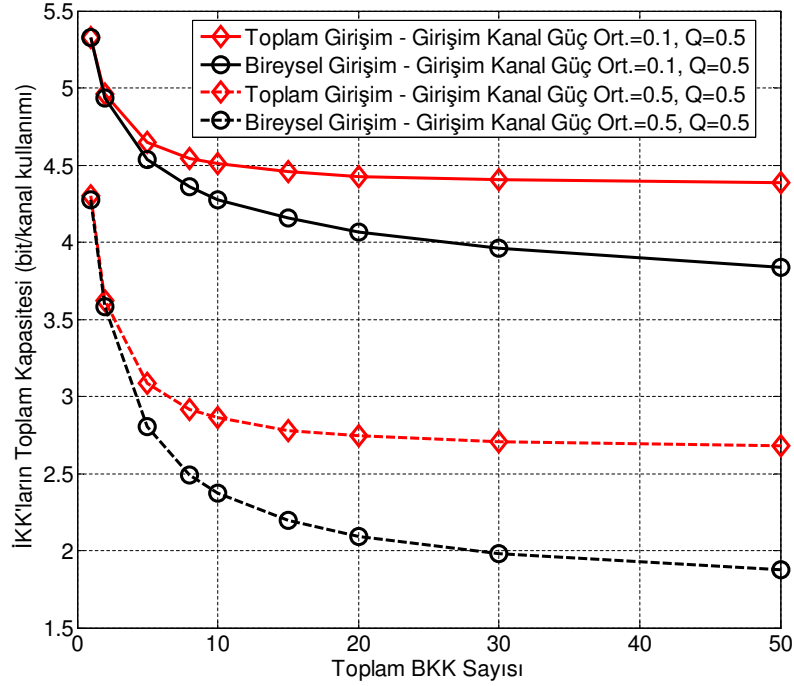
3.5.4 Senaryolar Arası Karşılaştırmalar



Şekil 3.13. Senaryolar Arası Karşılaştırmalar - Rayleigh Direkt ve Girişim Kanalları - İKK Sayısına Karşılık Veri Hızı Değişimi

Şekil 3.13'te yukarıda incelenen 3 farklı senaryonun karşılaştırılması yapılmıştır. Hem direkt hemde girişim kanalları Rayleigh sönümlemeli olan benzetim çalışmasında BKK başına düşen girişim gücü eşiği $Q = 0.5W$ olarak seçilmiştir. Toplam veri hızının farklı sayıda İKK'lere göre değişimi gösterilmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi eniyi sonuçlar tek BKK senaryosunda gözlenirken, en kötü sonuçlar da bireysel girişim gücü eşik değeri kısıtlı senaryoda elde edilmektedir. Bunun sebebi, girişim gücü eşik değerinin problemi kısıtlayışının her senaryoda farklılık göstermesidir. Ayrıca BKK sayısı arttıkça toplam girişim

gücü ve bireysel girişim gücü eşik değeri kısıtlı senaryolar arasındaki performans farkı artmaktadır.



Şekil 3.14. Senaryolar Arası Karşılaştırmalar - Rayleigh Direkt ve Girişim Kanalları - BKK Sayısına Karşılık Veri Hızı Değişimi

Şekil 3.14'te toplam ve bireysel girişim gücü eşik değeri kısıtlı senaryoları karşılaştırılmıştır. BKK başına düşen girişim gücü eşiği $Q = 0.5W$ olarak seçilmiştir ve ikinci katman kullanıcı sayısı 100 olarak seçilmiştir. Toplam veri hızının farklı sayıda BKK'lere ve farklı girişim kanal güç ortalaması değerlerine göre değişimi gösterilmektedir. Toplam veri hızının, farklı sayıda BKK'ler ve farklı girişim kanalı güç kazancı ortalamalarına göre değişimi gösterilmektedir. BKK sayısı arttıkça İKK'lerin toplam veri hızı azalmaktadır. Girişim kanal güç ortalaması arttıkça iki senaryo arasındaki performans farkı da artmaktadır. Bu durumda, BKK'lerin konumu bireysel girişim gücü eşik değeri kısıtlı senaryosunu diğer senaryoya göre daha fazla etkilediği söylenebilmektedir.

4. İKİ KATMANLI AĞ YAPILARI - SIMO/MIMO TEK-TAŞIYICILI KANALLARDA ENİYİ GÜÇ DAĞILIMI

İncelenen ikinci problemde, amaç yine İKK'lerin veri hızını, BKK'lere uygun olan girişim kısıtı altında enbüyülmektir. Problem tek-girdili çok-çıkıtlı (SIMO) kanallarda, alıcıda sıralı girişim giderme (SGG) yönteminin olduğu ve olmadığı (alıcıda sadece doğrusal filtre kullanılabilen) durumlarda incelenmiş ve çözülmüştür. Çözümün alıcıda SGG olduğu durumda *özyineli* bir girişimle düzenlenmiş su doldurma çözümü, alıcıda SGG olmadığı durumda ise basit bir girişimle düzenlenmiş su doldurma çözümü olduğu görülmüştür. Özyineli girişimle düzenlenmiş su doldurma çözümünün yakınsama analizi yapılmıştır ve algoritmanın olurlu çözüm kümesinden başladığı takdirde evrensel eniyi güç dağılımı noktasına yakınsadığı ispatlanmıştır.

İKK'lerde da anten sayısı arttırılarak problem çok-girdili çok-çıkıtlı (MIMO) kanallarda incelenmiş ve daha kapsamlı bir senaryo çalışılmıştır. Ancak, problem formülasyonu incelendiğinde, çözümün tek-girdili çok-çıkıtlı kanal eniyi çözümünden farklı olmadığı ispatlanmıştır.

Toplam girişim kısıtı incelendiği durumda BKK sayısının problem formülasyonunu değiştirmede SISO kanal senaryosunda gösterilmiştir (bkz. Kısım 3.3 sayfa 54). Anlatım karmaşıklığının azalması açısından sonraki bölümlerde tek aktif birinci katman kullanıcısı olduğu varsayılacaktır.

4.1 İlgili Çalışmalar ve Katkılar

Literatürde çok antenli sistemlerde çoklu erişim kanalı için kaynak tahsisi uygulayan çalışmalar mevcuttur [38, 100, 103, 107]. Ancak, bahsi geçen bu çalışmalar kullanıcılarının ortamda varolan diğer kullanıcılara etkilerini gözardı ederek yaptıkları girişimi kısıtlamamaktadırlar. İkincil öneme sahip kullanıcıların birincil kullanıcılara uyguladığı girişimi sınırlayan ve çoklu anten kullanan bir çalışma olan Naeem ve diğ.'nin [40] çalışmasında ise eniyiye yakın çözümler bulunmakta, kısıtlı sayıda ikincil kullanıcı eniyileme işlemine katılmakta ve

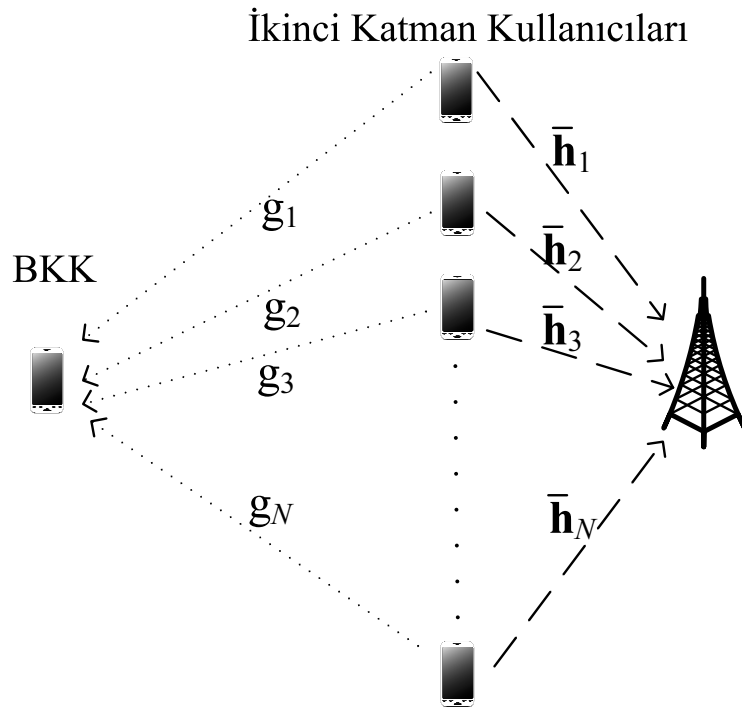
sürekli güç değerleri kullanılmayarak nicemlendirilmiş değerler kullanılmaktadır. Diğer çalışmalar hakkında detaylı bilgi için literatür taraması kısmına bakınız.

4.2 Alıcıda Sıralı Girişim Giderimi Olduğu Durumda Güç Dağılımı

4.2.1 SIMO Kanallar

4.2.1.1 Sistem Modeli

Şekil 4.1’de, heterojen bir yapıya sahip iki katmanlı bir senaryo gösterilmektedir. İlk katman, R_c yarıçaplı bir servis alanını kapsayan merkezi bir ağ ve bu katmanın kullanıcılarından, ikinci katman da bu merkezi ağın içerisindeki R_f yarıçaplı servis alanına sahip bir ağ ve bu katmanın kullanıcılarından oluşmaktadır.



Şekil 4.1. SIMO sistem modeli.

Heterojen bir yapıya sahip senaryoda, aynı kanal kaynaklarını kullanan 1 adet tek antenli BKK ve N adet tek antenli İKK vardır. İKK'ler birden çok antene

sahip baz istasyonlarıyla (İkinci Katman Baz İstasyonu, İKB) haberleşirken, BKK'lere girişimde bulunmaktadırlar. İkinci katman kullanıcıları baz istasyonları ile bir çoklu erişim kanalı oluşturmaktadır ve İKB'de sıralı girişim giderimi yapılabildiği varsayılarak çoklu erişim kanalında İKK'ler arası girişimin tamamen ortadan kaldırıldığı kabul edilmektedir. $\mathbf{h}_i$ ve g_i , sırasıyla, i . İKK ile İKB arasındaki $N_B \times 1$ 'lik vektörel direkt kanal katsayılarını ve i . İKK ile BKK arasındaki skaler girişim kanal katsayılarını göstermektedir. Bu katsayılar sıfır ortalamaya ve birim varyansa sahip kompleks Gauss bağımsız dağılımlardan seçilmişlerdir.

BKK tek antenli olarak seçilmiştir çünkü birden çok anteninin olup olmayışı problem çözümünü etkilemeyecektir. BKK çok antenli olduğu durumda i . İKK ile İKB arasındaki kanal vektörel, $\mathbf{g}_i$, bir kanal olacaktır ve BKK'ye yapılan toplam girişim

$$\sum_i P_i \mathbf{g}_i^H \mathbf{g}_i = \sum_i P_i \beta_i, \quad (4.1)$$

şeklinde gösterilecektir. Burada $\mathbf{g}_i^H \mathbf{g}_i = \beta_i$ skalerdir ve i . İKK'den çıkan kanal güçlerinin toplamını göstermektedir. Bu sebeple BKK'nin bir adet anteni olduğu varsayılacaktır ve i . İKK ile BKK arasındaki kanal skaler kabul edilecektir.

Tam kanal durum bilgisinin tüm kullanıcılarda ve baz istasyonunda bulunduğu varsayılan sistemde bireysel güç kısıtları ve BKK'ye yapılan toplam girişim kısıtı altında İKK'lerin veri hızını enbüyültme problemi

$$\begin{aligned} \mathbf{p}^* = \arg \max_{\mathbf{p}} \quad & R_{\text{toplaml}} = \log_2 \left(\det \left[\mathbf{I} + \frac{\sum_i P_i \mathbf{h}_i \mathbf{h}_i^H}{N_0} \right] \right) \\ \text{s.t.} \quad & P_i \geq 0, \quad \forall i \\ & P_i \leq P_{\max}, \quad \forall i \\ & \sum_{i=1}^N |g_i|^2 P_i \leq Q, \end{aligned} \quad (4.2)$$

şeklindedir. Burada P_i , i . İKK'nin verici gücünü, R_{toplaml} , İKK'lerin toplam veri

hızını, N_0 İKB'deki gürültü gücünü, Q toplam girişim gücü eşik değeri kısıtını ve $\mathbf{p}^* = [P_1^* \ P_2^* \ \dots \ P_N^*]$ eniyi güç dağılımı vektörünü göstermektedir.

4.2.1.2 Güç Dağılımı Algoritması

Problemin çözümünün *özyineli* bir girişimle düzenlenmiş su doldurma çözümü olduğu gösterilmiştir.

Teori 4.1 *Birinci katmanda tek BKK, ikinci katmanda N adet İKK ve N_B antenli, sıralı girişim giderimi yapılabilen bir baz istasyonu içeren iki katmanlı SIMO hücresel bir sistemin, azami güç kısıtları ve BKK'ye uygulanan toplam girişim kısıtı altında eniyi güç dağılımı, özyineli girişimle düzenlenmiş bir su doldurma çözümüdür. Bu su doldurma çözümünün güç dağılımı formülasyonu*

$$P_i = \min \left[\left(\frac{1}{\lambda |g_i|^2 \ln 2} - \frac{1}{\mathbf{h}_i^H \mathbf{A}_i^{-1} \mathbf{h}_i} \right)^+, P_{\max} \right], \forall i, \quad (4.3)$$

şeklindedir. Burada $\mathbf{A}_i = N_0 \mathbf{I} + \sum_{j \neq i} P_j \mathbf{h}_j \mathbf{h}_j^H$ matrisidir, $(x)^+ = \begin{cases} x, & x > 0 \\ 0, & \text{diğer} \end{cases}$ işlevidir ve λ toplam girişim kısıtı ile ilgili Lagrange çarpanıdır. Lagrange çarpanı ve dolayısıyla su seviyesinin bulunması da

$$\sum_i P_i |g_i|^2 = Q. \quad (4.4)$$

ile gösterilen toplam girişim kısıtı kullanılarak gerçekleştirilmektedir.

İspat 4.1

Probleme bakıldığında maliyet işlevinin ve tüm kısıtların dışbükey ve doğrusal oldukları görülmektedir [30]. Bundan yola çıkarak problemin çözümünü bulmak için problemin Lagrangian'ı hesaplanmalı ve Karush-Kuhn-Tucker (KKT) koşulları [30] incelenmelidir. Problemin Lagrangian'ı hesaplanırken (4.2)'deki

problemdeki birinci ve ikinci kısıtlar şu anda gözardı edilip sonradan çözüme eklenecektir. Bu durumda Lagrangian

$$\begin{aligned}
L &= -\log_2 \left(\det \left[\mathbf{I} + \frac{\sum_i P_i \mathbf{h}_i \mathbf{h}_i^H}{N_0} \right] \right) + \lambda \left(\sum_i P_i |g_i|^2 - Q \right), \\
\frac{\partial L}{\partial P_i} \Big|_{P_i=P_i^*} &= -\frac{1}{\ln 2} \text{tr} \left\{ \left(\mathbf{I} + \frac{\sum_j P_j^* \mathbf{h}_j \mathbf{h}_j^H}{N_0} \right)^{-1} \frac{\mathbf{h}_i \mathbf{h}_i^H}{N_0} \right\} + \lambda |g_i|^2 \\
&= -\frac{1}{\ln 2} \text{tr} \left\{ \left(N_0 \mathbf{I} + \sum_j P_j^* \mathbf{h}_j \mathbf{h}_j^H \right)^{-1} \mathbf{h}_i \mathbf{h}_i^H \right\} + \lambda |g_i|^2 \\
&= \mathbf{h}_i^H \left(N_0 \mathbf{I} + \sum_j P_j^* \mathbf{h}_j \mathbf{h}_j^H \right)^{-1} \mathbf{h}_i - \lambda |g_i|^2 \ln 2 = 0
\end{aligned} \tag{4.5}$$

şeklinde olacaktır. Matris evirme teorisi ve Sherman-Morrison formülü [124] kullanılarak

$$\mathbf{h}_i^H \left(N_0 \mathbf{I} + \sum_j P_j^* \mathbf{h}_j \mathbf{h}_j^H \right)^{-1} \mathbf{h}_i = \mathbf{h}_i^H \left(\mathbf{A}_i + \sum_{j \neq i} P_j^* \mathbf{h}_j \mathbf{h}_j^H \right)^{-1} \mathbf{h}_i = \frac{\mathbf{h}_i^H \mathbf{A}_i^{-1} \mathbf{h}_i}{1 + P_i^* \mathbf{h}_i^H \mathbf{A}_i^{-1} \mathbf{h}_i},$$

eşitliği elde edilebilmektedir. Burada $\mathbf{A}_i = N_0 \mathbf{I} + \sum_{j \neq i} P_j \mathbf{h}_j \mathbf{h}_j^H$ şeklindedir. Bu sonuç (4.5) eşitliğinde yerine konularak devam edilirse

$$\frac{\mathbf{h}_i^H \mathbf{A}_i^{-1} \mathbf{h}_i}{1 + P_i^* \mathbf{h}_i^H \mathbf{A}_i^{-1} \mathbf{h}_i} = \lambda |g_i|^2 \ln 2, \tag{4.6}$$

$$\frac{1}{\frac{1}{\mathbf{h}_i^H \mathbf{A}_i^{-1} \mathbf{h}_i} + P_i^*} = \lambda |g_i|^2 \ln 2, \tag{4.7}$$

dolayısıyla

$$P_i^* = \frac{1}{\lambda |g_i|^2 \ln 2} - \frac{1}{\mathbf{h}_i^H \mathbf{A}_i^{-1} \mathbf{h}_i}, \tag{4.8}$$

elde edilecektir.

Problem (4.2)'deki daha önceden çözüm esnasında problemden çıkartılan ilk iki kısıt (verici gücü kısıtları) da eklendiğinde eniyi güç dağılımı

$$\Rightarrow P_i^* = \min \left[\left(\frac{1}{\lambda |g_i|^2 \ln 2} - \frac{1}{\mathbf{h}_i^H \mathbf{A}_i^{-1} \mathbf{h}_i} \right)^+, P_{\max} \right], \forall i, \quad (4.9)$$

şeklini alacaktır. Burada $(x)^+ = \begin{cases} x, & x > 0 \\ 0, & \text{diğer} \end{cases}$. Görüldüğü gibi i . kullanıcının eniyi güç dağılımını bulmak için diğer kullanıcıların eniyi güç dağılımlarına ihtiyaç vardır. Bu sebeple çözüm özyineli bir yapıdadır. Ayrıca, çözüm incelenirse, bir su doldurma çözüm yapısı olduğu da görülmektedir. Su doldurma çözümündeki su seviyesi de girişim kısıtı kullanılarak

$$\sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{\lambda \ln 2} - \frac{|g_i|^2}{\mathbf{h}_i^H \mathbf{A}_i^{-1} \mathbf{h}_i} \right) = Q, \quad (4.10)$$

formülü ile bulunacaktır.

Geleneksel su doldurma çözümlerinde su seviyesi toplam güç kısıtı kullanılarak bulunur. Oysaki, bizim problemimizde toplam girişim kısıtı kullanılarak bulunmaktadır. Bu sebeple eniyi güç dağılımı çözümüne özyineli girişimle düzenlenmiş bir su doldurma çözümü denilmiştir.

SIMO kanal senaryosu için eniyi güç dağılımı özyineli girişimle düzenlenmiş su doldurma çözümünde su seviyesi sayısal olarak hesaplanmaktadır. Sayısal hesaplamaların istenmemesi durumunda su seviyesinin hesabına ihtiyaç duymadan özyineli bir algoritmayla da kullanıcıların güç değerleri tahsis edilebilir.

Teori 4.2 *Birinci katmanda tek BKK, ikinci katmanda N adet İKK ve N_B antenli, sıralı girişim giderimi yapılabilen bir baz istasyonu içeren iki katmanlı SIMO hücresel bir sistemin, azami güç kısıtları ve BKK'ye uygulanan toplam girişim kısıtı altında eniyi güç dağılımı*

$$P_i^* = \min \left[\frac{P_i E_i(\mathbf{p})}{\sum_{j=1}^N P_j E_j(\mathbf{p})} \frac{Q}{|g_i|^2}, P_{\max} \right] = \min \left[\frac{Q/|g_i|^2}{\sum_{j=1}^N \frac{P_j E_j(\mathbf{p})}{P_i E_i(\mathbf{p})}}, P_{\max} \right] = f_i(\mathbf{p}), \quad (4.11)$$

$$\mathbf{p}^{(n+1)} = \mathbf{f}(\mathbf{p}^{(n)}), \quad (4.12)$$

ile gösterilen özyineli algoritmayla çözülebilmektedir. Burada $f_i(\cdot)$ fonksiyonu girdi olarak o anki güç dağılımı vektörünü almakta ve çıktı olarak i . kullanıcının bir sonraki adımdaki güç değerini vermektedir. $\mathbf{p}^{(n)}$ ve $\mathbf{p}^{(n+1)}$ vektörleri sırasıyla n . ve $n+1$. adımdaki güç dağılım vektörlerini göstermektedir ve $\mathbf{f}(\cdot)$ fonksiyonu da bu iki vektörü birbirine bağlayan özyineli işlevi göstermektedir.

Denklem (4.11) ile gösterilen özyineli algoritma olurlu kümeden seçilmiş bir başlangıç vektörüyle çalıştırıldığı durumda evrensel eniyi güç dağılımına yakınsar.

İspat 4.2

İlk olarak özyineli güç dağılımı algoritması bulunacaktır ardından algoritmanın yakınsama analizi gerçekleştirilecektir. Lagrange çarpanının diğer değişkenler cinsinden yazılması için (4.6) eşitliğinin

$$\frac{\mathbf{h}_i^H \mathbf{A}_i^{-1} \mathbf{h}_i}{1 + P_i^* \mathbf{h}_i^H \mathbf{A}_i^{-1} \mathbf{h}_i} = E_i(\mathbf{p}) = \lambda |g_i|^2 \ln 2, \quad (4.13)$$

şeklinde tekrar yazılması gerekmektedir. Burada $E_i(\mathbf{p})$ eşitliğin sol tarafına atanmıştır. Eşitliğin her iki tarafı P_i^* ile çarpılıp tüm kullanıcılar üzerinden toplanırsa

$$P_i^* E_i(\mathbf{p}^*) = \lambda P_i^* |g_i|^2 \ln 2, \quad (4.14)$$

$$\sum_{i=1}^N P_i^* E_i(\mathbf{p}^*) = \lambda \sum_{i=1}^N P_i^* |g_i|^2 \ln 2, \quad (4.15)$$

elde edilecektir.

Yukarıdaki (4.15) eşitliği incelenirse eşitliğin sağ tarafının $\lambda Q \ln 2$ 'ye eşit olduğu görülmektedir. Çünkü girişim kısıtının $\sum_{i=1}^N P_i^* |g_i|^2 = Q$ olduğu bilinmektedir. Bu durumda Lagrange çarpanı kullanıcı güçleri ve girişim eşik değeri cinsinden

$$\sum_{i=1}^N P_i^* E_i(\mathbf{p}^*) = \lambda Q \ln 2 \Rightarrow \lambda = \frac{\sum_{i=1}^N P_i^* E_i(\mathbf{p}^*)}{Q \ln 2}. \quad (4.16)$$

şeklinde hesaplanabilir. Sonrasında, bulunan Lagrange çarpanı (4.14) eşitliğinde yerine yazılarak

$$P_i^* \lambda |g_i|^2 \ln 2 = P_i E_i(\mathbf{p}^*) \Rightarrow P_i^* = \frac{P_i E_i(\mathbf{p}^*)}{\lambda |g_i|^2 \ln 2},$$

$$P_i^* = \frac{P_i E_i(\mathbf{p}^*)}{\sum_{j=1}^N P_j E_j(\mathbf{p}^*)} \frac{Q}{|g_i|^2}.$$

elde edilir. Asgari ve azami güç kısıtları da güç dağılımına eklenince özyineli algoritma son halini

$$P_i^* = \min \left[\frac{P_i E_i(\mathbf{p})}{\sum_{j=1}^N P_j E_j(\mathbf{p})} \frac{Q}{|g_i|^2}, P_{\max} \right] = \min \left[\frac{Q/|g_i|^2}{\sum_{j=1}^N \frac{P_j E_j(\mathbf{p})}{P_i E_i(\mathbf{p})}}, P_{\max} \right] = f_i(\mathbf{p}), \quad (4.17)$$

$$\mathbf{p}^{(n+1)} = \mathbf{f}(\mathbf{p}^{(n)}), \quad (4.18)$$

şeklini almış olacaktır. Burada $f_i(\cdot)$ fonksiyonu girdi olarak o anki güç dağılımı vektörünü almakta ve çıktı olarak i . kullanıcının bir sonraki adımdaki güç değerini vermektedir. $\mathbf{p}^{(n)}$ ve $\mathbf{p}^{(n+1)}$ vektörleri sırasıyla n . ve $n + 1$. adımdaki güç dağılım vektörlerini göstermektedir ve $\mathbf{f}(\cdot)$ fonksiyonu da bu iki vektörü birbirine bağlayan özyineli işlevi göstermektedir.

Yakınsama Analizi

Algoritmanın yakınsama analizi ve evrensel eniyi güç dağılımına yakınsadığı 3 adımda gösterilmektedir, yakınsama analizi yapılırken [38]'dan yararlanılmıştır.

1. İlk olarak algoritmanın $\mathbf{f}(\cdot)$ işlevinin tekdüze (Monotonic) bir işlev olduğunu göstermek gerekmektedir.

Kuram 4.1 *Olurlu kümenin içerisinde $\mathbf{p} = [P_1 \dots P_N]^T$ vektörü ve $\mathbf{v} = [V_1 \dots V_N]^T$ vektörü seçilsin. Bu vektörler için $P_i > V_i$ ise her durumda $f_i(\mathbf{p}) > f_i(\mathbf{v})$ 'dir. Yani $f_i(\cdot)$ işlevinin girdisi artarsa çıktısı da artar.*

Kuram 4.1 İspat

Girişim kısıtı her iki olurlu vektör için de eşitlikle sağlandığı için $P_i > V_i$ ise $\sum_{j \neq i} P_j |g_j|^2 < \sum_{j \neq i} V_j |g_j|^2$ 'dir, çünkü $\sum_{i=1}^N P_i |g_i|^2 = \sum_{i=1}^N V_i |g_i|^2 = Q$ eşitliğinden P_i ve V_i elemanları çıkartıldığında geriye kalan $P_j |g_j|^2$ çarpımlarının toplamı $P_j |g_j|^2$ çarpımlarının toplamından küçük olmak zorundadır. Ayrıca, girişim kanal güç kazançları, $|g_i|^2$, pozitif olduğu için $\sum_{j \neq i} P_j < \sum_{j \neq i} V_j$ da bu vektörler için doğru olmak zorundadır.

Kuram 4.1'in ispatlanması için $f_i(\mathbf{p})$ 'nin P_j 'ler sabit tutulduğunda P_i ile arttığının ve P_i sabit tutulduğunda $\sum_{j \neq i} P_j$ ile azaldığının gösterilmesi gereklidir.

İlk olarak daha kolay olan $f_i(\mathbf{p})$ 'nin P_j 'ler sabit tutulduğunda P_i ile arttığı

ispatlanacaktır. İteratif algoritmada gösterildiği üzere $f_i(\mathbf{p})$ işlevi

$$f_i(\mathbf{p}) = \frac{Q/|g_i|^2}{\sum_{j=1}^N \frac{P_j E_j(\mathbf{p})}{P_i E_i(\mathbf{p})}}, \quad (4.19)$$

şeklindedir. $P_i E_i(\mathbf{p})$ 'nin P_i 'ye göre türevi pozitiftir (denklem (4.20)) ayrıca $P_j E_j(\mathbf{p})$ 'lerin herbirinin, $j \neq i$, P_i 'ye göre türevi negatiftir (denklem (4.21)), $\frac{\partial \mathbf{A}^{-1}}{\partial \alpha} = -\mathbf{A}^{-1} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial \alpha} \mathbf{A}^{-1}$ özelliği kullanılmıştır). Bu durumda, P_j 'lerin hepsi, $j \neq i$, sabit tutulduğunda, $f_i(\mathbf{p})$ işlevi P_i ile artmaktadır çünkü $\frac{P_j E_j(\mathbf{p})}{P_i E_i(\mathbf{p})}$ işlevi P_i artarken azalmaktadır.

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_i E_i(\mathbf{p})}{\partial P_i} &= E_i(\mathbf{p}) + P_i \frac{\partial E_i(\mathbf{p})}{\partial P_i} \\ &= \frac{\mathbf{h}_i^H \mathbf{A}_i^{-1} \mathbf{h}_i}{(1 + P_i \mathbf{h}_i^H \mathbf{A}_i^{-1} \mathbf{h}_i)^2} > 0, \end{aligned} \quad (4.20)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_j E_j(\mathbf{p})}{\partial P_i} &= P_j \frac{\partial E_j(\mathbf{p})}{\partial P_i} \\ &= -\frac{P_j \mathbf{h}_j^H \mathbf{A}_j^{-1} \frac{\partial \mathbf{A}_j}{\partial P_i} \mathbf{A}_j^{-1} \mathbf{h}_j}{(1 + P_j \mathbf{h}_j^H \mathbf{A}_j^{-1} \mathbf{h}_j)^2} < 0. \end{aligned} \quad (4.21)$$

İkinci olarak, $f_i(\mathbf{p})$ 'nin P_i sabit tutulduğunda $\sum_{j \neq i} P_j$ ile artmasının ispatı

için $\sum_{j \neq i}^N \frac{\partial f_i(\mathbf{p})}{\partial P_j} < 0$ olduğu gösterilmelidir, bu durumun sağlanması için de $\frac{\partial f_i(\mathbf{p})}{\partial P_j} < 0$, $\forall j \neq i$, olduğunu göstermek yeterli koşuldur. $P_i E_i(\mathbf{p})$ 'nin

P_j 'ye göre türevi negatiftir (denklem (4.22)) ve $\sum_{k=1}^N P_k E_k(\mathbf{p})$ 'nin P_j 'ye göre türevi pozitiftir (ispatı için [38]). Bu durumda, $\frac{\partial f_i(\mathbf{p})}{\partial P_j} < 0$, ve $\sum_{j \neq i}^N \frac{\partial f_i(\mathbf{p})}{\partial P_j} < 0$ doğrulanmıştır. Böylece, P_i sabit tutulduğunda, $f_i(\mathbf{p})$ 'nin $\sum_{j \neq i} P_j$ ile azaldığı ispatlanmış olur.

$$\begin{aligned}
\frac{\partial P_i E_i(\mathbf{p})}{\partial P_j} &= P_i \frac{\partial E_i(\mathbf{p})}{\partial P_j} \\
&= -\frac{P_i \mathbf{h}_i^H \mathbf{A}_i^{-1} \frac{\partial \mathbf{A}_i}{\partial P_j} \mathbf{A}_i^{-1} \mathbf{h}_i}{(1 + P_i \mathbf{h}_i^H \mathbf{A}_i^{-1} \mathbf{h}_i)^2} < 0.
\end{aligned} \tag{4.22}$$

Böylece $f_i(\cdot)$ ve dolayısıyla $\mathbf{f}(\cdot)$ işlevinin tekdüze bir işlev olduğu ispatlanmış olur.

2. İkinci olarak algoritmanın çözüm kümesine yakınsadığı gösterilmelidir.

Kuram 4.2 *Olurlu kümenin içerisinde seçilen $\mathbf{p}^{(0)} = [P_1^{(0)} \dots P_N^{(0)}]^T$ vektörü ile başlatıldığı zaman $\mathbf{p}^{(n+1)} = \mathbf{f}(\mathbf{p}^{(n)})$ algoritması problemin çözüm kümesi içerisinde bir noktaya yakınsar.*

Kuram 4.2 İspat

İlk iterasyondan sonrasında oluşabilecek 3 farklı durum vardır. İlk durumda, algoritmanın ikinci adımında bulunan güç değeri bir öncekinin tıpatıp aynısıdır, yani, $P_i^{(1)} = f_i(\mathbf{p}^{(0)}) = P_i^{(0)}$. Bu durum, başlangıç noktasının KKT koşullarını çözen eniyi noktadan başlandığını gösterir ve algoritma ilerlemez.

İkinci durumda, ikinci adımda bulunan güç değeri bir önceki güç değerinden büyüktür, yani, $P_i^{(1)} = f_i(\mathbf{p}^{(0)}) > P_i^{(0)}$. $f_i(\cdot)$ işlevinin tekdüze yapısı gereği sonraki adımlardaki yeni güç değerlerinin giderek artması beklenmektedir ($P_i^{(n)} > P_i^{(n-1)} > \dots > P_i^{(0)}$). P_i yukardan sınırlı olduğu için ve $f_i(\cdot)$ tekdüze olduğu için algoritma çözüm kümesinde bir noktaya yakınsamak zorundadır.

Üçüncü durumda, ikinci adımda bulunan güç değeri bir önceki güç değerinden küçüktür, yani, $P_i^{(1)} = f_i(\mathbf{p}^{(0)}) < P_i^{(0)}$. $f_i(\cdot)$ işlevinin tekdüze yapısı gereği sonraki adımlardaki yeni güç değerlerinin giderek azalması beklenmektedir ($P_i^{(n)} < P_i^{(n-1)} < \dots < P_i^{(0)}$). P_i aşağıdan sınırlı olduğu için ve

$f_i(\cdot)$ tekdüze olduğu için algoritma çözüm kümesinde bir noktaya yakınsamak zorundadır.

$\mathbf{p}$ vektörünün her bir elemanı yakınsadığına göre, vektörün kendisi de çözüm kümesindeki bir noktaya yakınsar.

3. Algoritma hesaplanırken (4.14) eşitliğinde her iki taraf P_i ile çarpılarak çözüm kümesine $P_i = 0$ sanal sabit noktaları (Artificial Fixed Points) eklenmiştir. Bu durumda yakınsanan noktanın bir sanal sabit nokta olmadığı gösterilmelidir.

Kuram 4.3 *Sanal sabit noktalar kararsızdır. Çok küçük ve sabit bir ε değeri için, algoritmanın bir adımında sanal sabit noktadan ε değeri kadar uzaklaşırsa bir sonraki adımda çözüm noktası o sanal sabit noktadan çok daha fazla uzaklaşacaktır. Böylece algoritma bu sanal sabit noktalara yakınsayamayacaktır.*

Kuram 4.3 İspat

Problemin bir sanal sabit noktasına, $\mathbf{p} = [b_1 \ b_2 \ \dots \ b_N]$, sahip olduğu varsayalım. Bu vektörün bazı değerleri sıfıra eşit olmak zorundadır. S_0 kümesinin sıfır güce sahip kullanıcı endekslerini kapsadığı ve $S_{\max}$ kümesinin de maksimum güce sahip kullanıcı endekslerini kapsadığı varsayalım, yani, $S_0 = \{i \mid b_i = 0\}$ ve $S_{\max} = \{i \mid b_i = P_{\max}\}$. Bu iki kümenin birleşimi de $S = S_0 \cup S_{\max}$ kümesi ile gösterilsin. $i \notin S$ için

$$b_i = \frac{b_i E_i(\mathbf{p})}{\sum_{j=1}^N b_j E_j(\mathbf{p})} \frac{Q}{|g_i|^2}, \quad (4.23)$$

denklemleri eşitlikle sağlanacaktır. $i \notin S$ için $0 < b_i < P_{\max}$ olacağından dolayı asgari ve azami güç kısıtlarıyla ilgili Lagrange çarpanları sıfıra eşit olacaktır ve $\frac{E_i(\mathbf{p})}{|g_i|^2} = \lambda' \ln 2$ şeklinde yazılabilecektir. Burada çözümün eniyi çözüm olmadığını, bir sanal sabit nokta olduğunu bildiğimiz için $\lambda' \neq \lambda_{opt}$ durumunu belirtmek gerekmektedir (λ_{opt} eniyi çözümün girişim

kısıtı Lagrange çarpanıdır). $\frac{E_i(\mathbf{p})}{|g_i|^2} = \lambda' \ln 2$ olduğuna göre tekrar denklem (4.23)'ye bakıldığında, $\sum_{j \in S} b_j E_j(\mathbf{p}) = E_i(\mathbf{p}) \frac{Q}{|g_i|^2} = Q\lambda' \ln 2$ görülmektedir.

$i \in S_0$ için, $E_i(\mathbf{p}) = \lambda' |g_i|^2 \ln 2 - \alpha_i \ln 2$ şeklindedir. Çünkü bu küme için güç değerleri sıfırdır ve bu da asgari güç kısıtı ile ilgili Lagrange çarpanlarının (α_i) pozitif olmasına sebebiyet vermektedir. Bu durumda S_0 kümesinde bir k kullanıcısı vardır ve bu kullanıcının

$$\frac{E_k(\mathbf{p})}{|g_k|^2 \ln 2} > \frac{E_i(\mathbf{p})}{|g_i|^2 \ln 2}, k \neq i, k \in S_0, \quad (4.24)$$

$\frac{E_k(\mathbf{p})}{|g_k|^2 \ln 2}$ değeri diğer kullanıcılardan daha büyüktür. Bu noktadan sonra gerçekleşebilecek iki durum vardır. Birincisi $\lambda' > \frac{E_k(\mathbf{p})}{|g_k|^2 \ln 2} > \frac{E_i(\mathbf{p})}{|g_i|^2 \ln 2}$ durumudur ve ikincisi de $\lambda' \leq \frac{E_k(\mathbf{p})}{|g_k|^2 \ln 2}$ durumudur. Eğer ilk durumdaki eşitsizlik doğruysa $\mathbf{p}$ noktası problemi çözen eniyi nokta olmak zorundadır çünkü tüm KKT koşulları sağlanmaktadır. Ancak bu durum bir çelişki yaratmaktadır, çünkü kuramın başında bu $\mathbf{p}$ noktasının eniyi çözüm noktası olmadığı aksine bir sanal sabit nokta olduğu belirtilmektedir. Bu durumda

$$\lambda' \leq \frac{E_k(\mathbf{p})}{|g_k|^2 \ln 2}, \quad (4.25)$$

eşitsizliği doğru olmak zorundadır.

Şimdi, sanal sabit noktanın ε değeri kadar değişmesi sonucu, bir sonraki adımdaki noktanın bu sanal sabit noktadan uzaklaşacağı gösterilecektir. Bu sanal sabit nokta ε kadar değiştirilerek yeni bir nokta oluşturulmuştur, $\mathbf{p}' = [b_1 \quad \varepsilon \quad b_3 \quad \dots \quad b_N - \varepsilon']$ ve bu nokta algoritmaya sokulacaktır. Görüldüğü gibi yeni vektör eski vektörden iki bileşeniyle ayrılmaktadır. $\mathbf{p}$ vektöründe önceden sıfır olan a_2 bileşeni ε kadar arttırılmıştır ve önceden sıfırdan farklı olan a_N bileşeni toplam girişim kısıtı sağlanacak şekilde ε'

kadar azaltılmıştır. Şimdi incelenmesi gereken durum $\mathbf{p}'$ vektörünün algoritmaya sokulmasıyla a_2 bileşeninin sıfıra yaklaşıp yaklaşmayacağıdır.

Taylor seri açılımı kullanılarak, $E_i(\mathbf{p}') = E_i(\mathbf{p}) + O(\varepsilon) \forall i$ yazılabilir, burada $O(\varepsilon)$ artık bileşenleri temsil eder ve ε 'a bağlı pozitif bir değerdir. Algoritmanın bir sonraki adımında k . yani 2. kullanıcı için alacağı değer

$$\begin{aligned} f_k(\mathbf{p}') &= \frac{\varepsilon E_k(\mathbf{p}')}{\sum_{j=1}^N b_j E_j(\mathbf{p}')} \frac{Q}{|g_k|^2} \\ &= \frac{\varepsilon E_k(\mathbf{p})}{\sum_{j=1}^N b_j E_j(\mathbf{p})} \frac{Q}{|g_k|^2} + O(\varepsilon^2), \end{aligned} \quad (4.26)$$

şeklini alacaktır. $\sum_{j=1}^N b_j E_j(\mathbf{p}) = Q\lambda' \ln 2$ eşitliği (4.26)'da yerine konulduğunda bir sonraki adımdaki güç değeri

$$\begin{aligned} f_k(\mathbf{p}') &= \frac{\varepsilon E_k(\mathbf{p})}{Q\lambda' \ln 2} \frac{Q}{|g_k|^2} + O(\varepsilon^2) \\ &= \varepsilon \underbrace{\frac{E_k(\mathbf{p}) / (|g_k|^2 \ln 2)}{\lambda'}}_{\geq 1} + O(\varepsilon^2). \end{aligned} \quad (4.27)$$

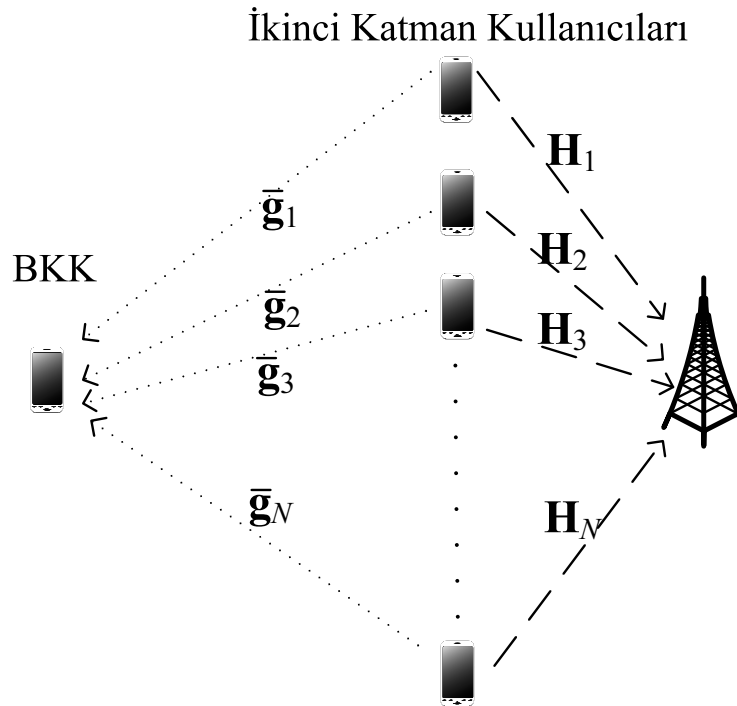
şeklinde hesaplanmış olacaktır.

Eşitsizlik (4.25)'te gösterildiği üzere $\frac{E_k(\mathbf{p}) / (|g_k|^2 \ln 2)}{\lambda'} \geq 1$ 'dir, bu da $f_k(\mathbf{p}') > \varepsilon$ durumuna yol açar. Yani bir sonraki adımdaki güç değeri ε 'dan daha büyük olacaktır. Bu sonuç, sanal sabit bir noktadan ε değeri kadar uzaklaşıldığı takdirde, algoritmanın sonraki adımlarında çözümün sanal sabit noktaya yaklaşmadığını, aksine bu noktadan giderek uzaklaşıldığını göstermektedir, çünkü Kuram 1'de de bahsedildiği üzere algoritma tekdüze bir fonksiyondan oluşmaktadır. Bu durumda sanal sabit noktaları kararsızdır ve algoritma bu noktalara yakınsamaz.

Böylece yukarıda anlatılan üç kuram kullanılarak, algoritmanın tekdüze bir fonksiyona sahip olduğu, olurlu kümeden seçilen bir başlangıç noktasından başlandığı takdirde çözüm kümesinde bir noktaya yakınsadığı ve yakınsadığı bu noktanın bir sanal sabit nokta olamayacağı evrensel eniyi çözüm noktası olması gerektiği ispatlanarak algoritmanın yakınsama analizi tamamlanmıştır.

4.2.2 MIMO Kanallar

Şekil 4.2'de, heterojen bir yapıya sahip iki katmanlı MIMO senaryo gösterilmektedir. İlk katman, R_c yarıçaplı bir servis alanını kapsayan merkezi bir ağ ve bu katmanın kullanıcılarından, ikinci katman da bu merkezi ağın içerisindeki R_f yarıçaplı servis alanına sahip bir ağ ve bu katmanın kullanıcılarından oluşmaktadır.



Şekil 4.2. MIMO sistem modeli.

Heterojen bir yapıya sahip senaryoda, aynı kanal kaynaklarını kullanan 1 adet tek antenli BKK ve N adet birden çok antenli İKK vardır. İKK'ler birden çok

antene sahip baz istasyonlarıyla (İkinci Katman Baz İstasyonu, İKB) haberleşirken, BKK'lere girişimde bulunmaktadırlar. SIMO sıralı girişim giderimi yapılabilen senaryoda olduğu gibi ikinci katman kullanıcıları baz istasyonları ile bir çoklu erişim kanalı oluşturmaktadırlar ve İKB'de sıralı girişim giderimi yapılabildiği varsayılarak çoklu erişim kanalında İKK'ler arası girişimin tamamen ortadan kaldırıldığı kabul edilmektedir. $\mathbf{H}_i$ ve $\mathbf{g}_i$, sırasıyla, i . İKK ile İKB arasındaki $N_B \times N_K$ 'lik matris direkt kanal katsayılarını ve i . İKK ile BKK arasındaki vektörel girişim kanal katsayılarını göstermektedir. Bu katsayılar sıfır ortalamaya ve birim varyansa sahip kompleks Gauss bağımsız dağılımlardan seçilmişlerdir.

SIMO senaryodaki gibi BKK tek antenli olarak seçilmiştir çünkü birden çok antenin olup olmayışı problem çözümünü etkilemeyecektir (bkz. Kısım 4.2.1.1 sayfa 75). Bu sebeple, BKK'lerin bir adet anteni olduğu varsayılacaktır.

İKK'lerde tek anten olduğu önceki senaryolarda asgari ve azami güç kısıtları kullanıcı başına kısıtlar olarak seçilmiştir. Anten sayısı arttırılınca iki farklı kısıt türü kullanılabilmektedir. Birinci türde her kullanıcının anten başına güç kısıtları eklenmekte ve ikinci kısıt türünde ise kullanıcıların antenlerinin toplam güçleri kullanıcı başına kısıtlanmaktadır. Pratik kullanımlarda anten başına güç kısıtı daha çok tercih edildiği için burada da bu kısıt tercih edilecektir.

Tam kanal durum bilgisinin tüm kullanıcılarda ve tüm baz istasyonlarında bulunduğu varsayılan sistemde anten başına asgari ve azami güç kısıtları ve BKK'ye yapılan toplam girişim kısıtı altında İKK'lerin veri hızını enbüyültme

problemi

$$\begin{aligned}
\mathbf{P}^* = \arg \max_{\mathbf{P}} \quad & R_{\text{toplaml}} = \log_2 \left(\det \left[\mathbf{I} + \frac{\sum_{i=1}^N \mathbf{H}_i \mathbf{P}_i \mathbf{H}_i^H}{N_0} \right] \right) \\
\text{s.t.} \quad & \{\mathbf{P}_i\}_{j,j} \geq 0, \quad \forall i, j, \\
& \{\mathbf{P}_i\}_{j,j} \leq P_{\max}, \quad \forall i, j, \\
& \{\mathbf{P}_i\}_{j,k} = 0, \quad \forall i, \forall j \neq k \\
& \sum_{i=1}^N \mathbf{g}_i^H \mathbf{P}_i \mathbf{g}_i \leq Q,
\end{aligned} \tag{4.28}$$

şeklindedir. Burada $\{\mathbf{P}_i\}_{j,k}$ gösterimi $\mathbf{P}_i$ matrisinin j . sıra k . kolonundaki elemanı göstermektedir. Problemden $\mathbf{P} = \text{blkdiag}(\mathbf{P}_i)_{i=1:N}$ matrisi blok diyagonal bir matristir ve diyagonalde her bir kullanıcının güç dağılım matrislerini, $\mathbf{P}_i$, taşımaktadır, $\mathbf{P}_i = \text{diag}(\{\mathbf{P}_i\}_{j,j})_{j=1:N_K}$ diyagonal bir matristir ve diyagonalde i . kullanıcının antenlerinin güçlerini taşır. $\{\mathbf{P}_i\}_{j,j}$, i . İKK'nin j . anteninin gücünü, R_{toplaml} , İKK'lerin toplam veri hızını, N_0 İKB'deki gürültü gücünü, Q toplam girişim gücü eşik değerini göstermektedir. İKK'lerin MIMO çoklu erişim kanalı toplam veri hızı Kısım 2.3.4'te açıklandığı gibi (1.14) formülü kullanılarak hesaplanmıştır.

Yukarıdaki (4.28) probleminde, $\mathbf{P}_i$ matrisinin diyagonal bir matris olması ve determinant işlevinin $\mathbf{H} = [\mathbf{h}_1 \ \dots \ \mathbf{h}_N] \Rightarrow \det[\mathbf{A} + \mathbf{H}\mathbf{H}^H] = \det\left[\mathbf{A} + \sum_{i=1}^N \mathbf{h}_i \mathbf{h}_i^H\right]$ özelliği sayesinde toplam veri hızı, anten güçleri ve anten kanalları cinsinden

$$R_{\text{toplaml}} = \log_2 \left(\det \left[\mathbf{I} + \frac{\sum_{i=1}^N \mathbf{H}_i \mathbf{P}_i \mathbf{H}_i^H}{N_0} \right] \right) = \log_2 \left(\det \left[\mathbf{I} + \frac{\sum_{i=1}^{N \cdot N_K} \hat{P}_i \mathbf{h}_i \mathbf{h}_i^H}{N_0} \right] \right),$$

şeklinde yazılabilir. Burada $\hat{P}_i$, i . antenin iletim gücünü, $\mathbf{h}_i$ 'de i . anten ile İKB arasındaki $N_B \times 1$ boyutlu vektörel kanalı göstermektedir. Ayrıca, i . anten ile BKK arasındaki skaler kanal katsayısı g_i ile gösterilirse toplam girişim kısıtı da

$\sum_{i=1}^N \mathbf{g}_i^H \mathbf{P}_i \mathbf{g}_i = \sum_{i=1}^{N \cdot N_K} |g_i|^2 P_i$ şeklinde yazılabilecektir. Bu durumda problem formülasyonu uygun olarak değiştirilince

$$\begin{aligned} \mathbf{p}^* = \arg \max_{\mathbf{p}} \quad & R_{\text{toplamlam}} = \log_2 \left(\det \left[\mathbf{I} + \frac{\sum_{i=1}^{N \cdot N_K} \hat{P}_i \mathbf{h}_i \mathbf{h}_i^H}{N_0} \right] \right) \\ \text{s.t.} \quad & P_i \geq 0, \quad \forall i \\ & P_i \leq P_{\max}, \quad \forall i \\ & \sum_{i=1}^{N \cdot N_K} |g_i|^2 P_i < Q, \end{aligned} \quad (4.29)$$

şeklinde yazılarak herhangi bir kayıp yaşanmayacaktır.

Yukarıdaki problemde de görülebileceği gibi, problem $N \cdot N_K$ kullanıcı SIMO problemle aynı formattadır. Bunun sebebi asgari ve azami güç kısıtlarının anten başına seçilmiş olmasıdır. Her bir anten farklı birer kullanıcı gibi davranmaktadır. Böylece N kullanıcı ve her kullanıcıda N_K anten olan MIMO problem $N \cdot N_K$ kullanıcı bir SIMO problemle denk olmaktadır.

Güç dağılımı da SIMO sistemdeki gibi Teori 4.1'de gösterilen *özyineli* girişimle düzenlenmiş bir su doldurma çözümüdür. Aynı şekilde su seviyesinin sayısal olarak hesaplanmasının istenmediği durumlarda da Teori 4.2'deki *özyineli* algoritmayla eniyi güç dağılımı hesaplanabilmektedir.

4.3 Alıcıda Sıralı Girişim Giderimi Olmadığı Durumda Güç Dağılımı

4.3.1 SIMO Kanallar

4.3.1.1 Sistem Modeli

Şekil 4.1'de gösterilen heterojen yapıya sahip SIMO senaryoyu tekrar değerlendirilecektir. Ancak, bu sefer İKB'de sıralı girişim giderimi olmadığı varsayılmaktadır. Sıralı girişim giderimi olmadığı durumda, baz istasyonu bir İKK'nin sinyalini çözerken diğer kullanıcıların girişimini gürültü olarak kabul etmektedir.

Bu durumda i . kullanıcı için veri hızı

$$R_i = \log_2 \left(\frac{\det \left[P_i \mathbf{h}_i \mathbf{h}_i^H + N_0 \mathbf{I} + \sum_{j \neq i}^N P_j \mathbf{h}_j \mathbf{h}_j^H \right]}{\det \left[N_0 \mathbf{I} + \sum_{j \neq i}^N P_j \mathbf{h}_j \mathbf{h}_j^H \right]} \right), \quad (4.30)$$

şeklindedir. Görüldüğü gibi, baz istasyonu i . kullanıcının sinyalini çözerken daha önce çözdüğü sinyalleri kullanmamakta ve diğer sinyallerin hepsini gürültü olarak kabul etmektedir. Toplam veri hızı da tüm kullanıcıların veri hızlarının toplamı olarak

$$R_{\text{toplam}} = \sum_{i=1}^N \log_2 \left(\frac{\det \left[P_i \mathbf{h}_i \mathbf{h}_i^H + N_0 \mathbf{I} + \sum_{j \neq i}^N P_j \mathbf{h}_j \mathbf{h}_j^H \right]}{\det \left[N_0 \mathbf{I} + \sum_{j \neq i}^N P_j \mathbf{h}_j \mathbf{h}_j^H \right]} \right), \quad (4.31)$$

şeklinde gösterilmektedir.

Tam kanal durum bilgisinin tüm kullanıcılarda ve tüm baz istasyonlarında bulunduğu varsayılan sistemde bireysel güç kısıtları ve BKK'ye yapılan toplam girişim kısıtı altında İKK'lerin veri hızını enbüyültme problemi

$$\begin{aligned} \mathbf{p}^* = \arg \max_{\mathbf{p}} \quad & \sum_{i=1}^N \log_2 \left(\frac{\det \left[P_i \mathbf{h}_i \mathbf{h}_i^H + N_0 \mathbf{I} + \sum_{j \neq i}^N P_j \mathbf{h}_j \mathbf{h}_j^H \right]}{\det \left[N_0 \mathbf{I} + \sum_{j \neq i}^N P_j \mathbf{h}_j \mathbf{h}_j^H \right]} \right) \\ \text{s.t.} \quad & P_i \geq 0, \quad \forall i \\ & P_i \leq P_{\max}, \quad \forall i \\ & \sum_{i=1}^N |g_i|^2 P_i \leq Q, \end{aligned} \quad (4.32)$$

şeklindedir. Problemde P_i , i . İKK'nin verici gücünü, $\mathbf{p}^* = [P_1^* \ P_2^* \ \dots \ P_N^*]$ eniyi güç dağılımı vektörünü, N_0 İKB'deki gürültü gücünü ve Q toplam girişim gücü eşik değerini göstermektedir. Alıcıda SGG yapılmadığı için tüm İKK'ler birbirlerine girişim yapmaktadırlar, bu sebeple maliyet işlevi karmaşık bir dış-bükey olmayan yapıdadır. Bu problemin henüz literatürde bilinen bir çözümü bulunmamaktadır.

Bu sebeple, alıcıda doğrusal bir filtre kullanılacağı varsayılmıştır ve bu filtre yardımıyla İKK'ler arası girişim ortadan kaldırılmaya çalışılacaktır. Alıcıda veya vericide filtreler kullanılarak girişimi ortadan kaldırmak literatürde sıklıkla kullanılan bir yöntemdir [125–127].

4.3.1.2 Alıcı Filtresi Tasarımı

Alıcı filtresinin amacı, efektif kanal matrisindeki girişim katsayılarını sıfıra çekerek her bir kullanıcının SIMO kanallarını birer paralel kanal haline getirmektir. Böylece çok kullanıcılı SIMO kanal diyagonal bir hale gelecek ve hem problem formülasyonu basitleşecek hem de kanallar arası girişim ortadan kaldırılacaktır. Bunun için yapılacak işlem alıcı filtresindeki k . vektörü, $\mathbf{h}_j$ ($j = 1 : N, j \neq k$) kanallarının sıfır uzayından bir vektör olarak seçmektir.

İlk olarak k kullanıcısı hariç diğer kullanıcıların kanallarından oluşan bir $\hat{\mathbf{H}}_k$ matrisi

$$\hat{\mathbf{H}}_k = [\mathbf{h}_1 \ \dots \ \mathbf{h}_{k-1} \ \mathbf{h}_{k+1} \ \dots \ \mathbf{h}_N],$$

şeklinde tanımlansın. Alıcı matrisi $\mathbf{U}$ 'nun k . vektörünün $\hat{\mathbf{H}}_k$ matrisinin sıfır uzayında olması gerekmektedir, yani alıcı vektörü

$$\mathbf{u}_k^H \hat{\mathbf{H}}_k = \mathbf{0}^T, \quad (4.33)$$

olacak şekilde seçilmelidir. Bu işlem $\hat{\mathbf{H}}_k$ 'nin tekil değer ayrıştırması [123] ile

$$\hat{\mathbf{H}}_k = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{U}}_k^1 & \hat{\mathbf{U}}_k^0 \end{bmatrix}_{N_B \times N_B} \begin{bmatrix} \hat{\Sigma}_k \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}_{N_B \times (N-1)} \hat{\mathbf{V}}_k^H,$$

yapılabilmektedir. Bu eşitlik $\hat{\mathbf{H}}_k$ 'nin tekil değer ayrıştırılmasıdır. Burada $\hat{\Sigma}_k$ matrisi $(N-1) \times (N-1)$ boyutlu bir matristir ve $\hat{\mathbf{H}}_k$ 'nin sıfırdan farklı tekil değerlerini taşır. $\hat{\mathbf{U}}_k^0$ matrisi de sıfır tekil değerlere karşılık gelen tekil değer vektörlerini barındıran $N_B \times (N_B - (N-1))$ boyutlu matristir. $\hat{\mathbf{U}}_k^0$ 'nun kolonları $\hat{\mathbf{H}}_k$ 'nin sıfır uzayını taradığı için alıcı filtresi $\mathbf{u}_k$ 'yı bu matrisin vektörlerinden seçmek hem alıcı filtresi sonrası efektif kanalın paralel kanallara ayrışmasını hem de sıfır girişim elde edilmesini sağlayacaktır. Burada dikkat edilmesi gereken husus, $\hat{\mathbf{H}}_k$ 'nin sıra sayısı kolon sayısından en az bir fazla olması gerekliliğidir, çünkü $\hat{\mathbf{U}}_k^0$ matrisinin kolon sayısının en az 1 olması gereklidir ve $\hat{\mathbf{H}}_k$ matrisinin sıra sayısı ile kolon sayısının farkına eşittir. Bu durum da İKB'deki anten sayısının en az İKK sayısı kadar olması gerekliliğine sebep olmaktadır. Yani $N_B \geq N$ olmak zorundadır.

Ayrıca, $\hat{\mathbf{U}}_k^0$ matrisinin birden fazla kolonu olduğu durumlarda, veri hızını daha da arttırabilmek için ilgili matristen ($\hat{\mathbf{U}}_k^0$) seçilen $\mathbf{u}_k$ vektörünün ilgili kullanıcının kanal vektörü $\mathbf{h}_k$ 'ya olabildiği kadar hizalanmış olması gerekmektedir. Yani, seçilecek alıcı vektörünün $|\mathbf{u}_k^H \mathbf{h}_k|$ ifadesini enbüyöltecek vektör olması veri hızını daha da arttıracaktır. Bu durumda alıcı filtresi

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} \mathbf{u}_1 & \dots & \mathbf{u}_N \end{bmatrix} \longrightarrow \begin{array}{l} k. \text{ kolon } |\mathbf{u}_k^H \mathbf{h}_k| \text{ değerini} \\ \text{enbüyöltecek şekilde} \\ \hat{\mathbf{U}}_k^0 \text{ matrisinden seçilmiştir,} \end{array} \quad (4.34)$$

şeklinde üretilecektir.

Yukarıdaki şekilde oluşturulan $\mathbf{U} = \begin{bmatrix} \mathbf{u}_1 & \dots & \mathbf{u}_N \end{bmatrix}$ matrisi birim güce sahip bir

matristir ve alıcıda gürültü gücünü arttırmayacaktır. Filtre sonrası efektif kanal

$$\mathbf{H}_{eff} = \mathbf{U}^H \mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{U}^H \mathbf{h}_1 & \dots & \mathbf{U}^H \mathbf{h}_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_N \end{bmatrix}, \quad (4.35)$$

şeklinde gösterilebilir. Burada dikkat edilmelidir ki σ_i 'ler $\mathbf{H}$ kanal matrisinin tekil değerleri değildir. Ancak kanallar paralel hale getirilmiş ve girişim ortadan kaldırılmıştır.

Ayrıca, alıcı filtresi $\mathbf{U}$ 'nun birim matris olmadığı da dikkat çekicidir. Bu sebeple $\mathbf{U}^H \mathbf{U} \neq \mathbf{I}$ ve bu durumda alıcıya gelen beyaz Gauss gürültüsü alıcı filtresinden sonra renkli Gauss gürültüsü haline gelmektedir. Genel olarak, gürültünün çözümleme işleminde uzaysal olarak beyaz gürültü şeklinde alınmasından dolayı, renkli Gauss gürültüsünün daha düşük bir veri hızı verdiği, $R_{renkli} \leq R_{beyaz}$, bilinmektedir. Ancak bu durum, literatürdeki örnekleri gibi [128], ihmal edilip problem çözülmeye devam edilecektir ve elde edilecek veri hızı $R'(\mathbf{p})$ ile gösterilip en iyi veri hızına bir alt sınır olacaktır, $R'(\mathbf{p}) \leq R_{total}(\mathbf{p})$. Eşitlik, dolayısıyla eniyi durum, $\mathbf{U}^H \mathbf{U} = \mathbf{I}$ eşitliği gerçekleşince sağlanmaktadır.

4.3.1.3 Güç Dağılımı Algoritması

Alıcı filtresi sonrası problemin maliyet işlevi

$$\begin{aligned}
R'(\mathbf{p}) &= \log_2 \left(\det \left[\mathbf{I} + \frac{\sum_i P_i \mathbf{h}_{eff,i} \mathbf{h}_{eff,i}^H}{N_0} \right] \right) = \log_2 \left(\det \left[\mathbf{I} + \frac{\sum_i P_i \mathbf{U}^H \mathbf{h}_i \mathbf{h}_i^H \mathbf{U}}{N_0} \right] \right) \\
&= \log_2 \left(\det \left[\mathbf{I} + \begin{bmatrix} \frac{P_1 \sigma_1^2}{N_0} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{P_2 \sigma_2^2}{N_0} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{P_N \sigma_N^2}{N_0} \end{bmatrix} \right] \right) \\
&= \log_2 \left(\prod_{i=1}^N \left[1 + \frac{P_i \sigma_i^2}{N_0} \right] \right) \\
&= \sum_{i=1}^N \log_2 \left(1 + \frac{P_i \sigma_i^2}{N_0} \right), \tag{4.36}
\end{aligned}$$

şeklinde sadeleşmektedir. Görüldüğü gibi, girişim terimleri ortadan kalkmıştır ve kullanıcı başına kestirim sağlanabilmektedir. Bu durumda problem tekrar yazılırsa

$$\begin{aligned}
\mathbf{p}^* &= \arg \max_{\mathbf{p}} \sum_{i=1}^N \log_2 \left(1 + \frac{P_i \sigma_i^2}{N_0} \right) \\
\text{s.t.} \quad & P_i \geq 0, \quad \forall i \\
& P_i \leq P_{\max}, \quad \forall i \\
& \sum_i P_i |g_i|^2 < Q,
\end{aligned} \tag{4.37}$$

elde edilecektir ve problem yapısının su doldurma problemi yapısında olduğu görülmektedir.

Teori 4.3 Birinci katmanda tek BKK, ikinci katmanda N adet İKK ve N_B antenli, sadece doğrusal filtre kullanımına izin verilen bir baz istasyonu içeren iki katmanlı SIMO hücresel bir sistemin, azami güç kısıtları ve BKK'ye uygulanan toplam girişim kısıtı altında eniyi güç dağılımı, girişimle düzenlenmiş bir su

doldurma çözümüdür. Bu su doldurma çözümünün güç dağılımı formülasyonu

$$P_i^* = \min \left[\left(\frac{1}{\lambda |g_i|^2 \ln 2} - \frac{N_0}{\sigma_i^2} \right)^+, P_{\max} \right], \quad (4.38)$$

şeklindedir. Burada $(x)^+ = \begin{cases} x, & x > 0 \\ 0, & \text{diğer} \end{cases}$ işlevidir ve λ toplam girişim kısıtı ile ilgili Lagrange çarpanıdır. Lagrange çarpanı ve dolayısıyla su seviyesinin bulunması da

$$\sum_{i=1}^N P_i^* |g_i|^2 = Q, \quad (4.39)$$

şeklinde toplam girişim kısıtı kullanılarak gerçekleştirilmektedir.

İspat 4.3

İlk adımda asgari ve azami güç kısıtları ilk adımda gözardı edilecektir. Problemin Lagrangian'ı

$$L = \sum_{i=1}^N \log_2 \left(1 + \frac{P_i \sigma_i^2}{N_0} \right) - \lambda \left(\sum_i P_i |g_i|^2 - Q \right),$$

şeklindedir. Lagrangian'ın P_i 'ye göre türevi alınıp sıfıra eşitlenince

$$\frac{\partial L}{\partial P_i} \Big|_{P_i=P_i^*} = \frac{1}{\ln 2} \frac{\sigma_i^2}{N_0 + P_i^* \sigma_i^2} - \lambda |g_i|^2 = 0,$$

denklemini elde edilir. Bu noktada bireysel güç kısıtları da denkleme eklenince girişimle düzenlenmiş su doldurma çözümü

$$P_i^* = \min \left[\left(\frac{1}{\lambda |g_i|^2 \ln 2} - \frac{N_0}{\sigma_i^2} \right)^+, P_{\max} \right], \quad (4.40)$$

olarak gösterilecektir.

Görüldüğü gibi, önceki senaryodan farklı olarak, i . kullanıcının eniyi güç dağılımını bulmak için diğer kullanıcıların eniyi güç dağılımlarına ihtiyaç yoktur. Su doldurma çözümündeki su seviyesi de girişim kısıtı kullanılarak

$$\sum_{i=1}^N P_i^* |g_i|^2 = Q, \quad (4.41)$$

formülü ile bulunacaktır.

Geleneksel su doldurma çözümlerinde su seviyesi toplam güç kısıtı kullanılarak bulunur. Oysaki, bizim problemimizde toplam girişim kısıtı kullanılarak bulunmaktadır. Bu sebeple eniyi güç dağılımı çözümüne girişimle düzenlenmiş bir su doldurma çözümü denilmiştir.

Bulunan çözüm Ghasemi'nin [20] çalışmasındaki çözüme benzemektedir. Ancak oradaki tek kullanıcı-SISO çözüm, bizim sistemimizin bir alt kümesidir. Çünkü bizim çözümümüz çok kullanıcı SISO-MIMO senaryoları kapsamaktadır.

Yukarıdaki girişimle düzenlenmiş su doldurma probleminin çözümü Algoritma 4.1'de gösterilmiştir.

4.3.2 MIMO Kanallar

Bu kısımda değerlendirilecek olan heterojen yapıya sahip MIMO senaryosu Şekil 4.2'deki ile aynıdır. Ancak, Kısım 4.3.1'de olduğu gibi yine İKB'de sıralı girişim giderimi olmadığı varsayılmaktadır. Sıralı girişim giderimi olmadığı için, baz istasyonu bir İKK'nin sinyalini çözerken diğer kullanıcıların girişimini de gürültü olarak kabul etmektedir. Bu durumda i . kullanıcı için veri hızı

$$R_i = \log_2 \left(\frac{\det \left[N_0 \mathbf{I} + \sum_{i=1}^N \mathbf{H}_i \mathbf{P}_i \mathbf{H}_i^H \right]}{\det \left[N_0 \mathbf{I} + \sum_{j \neq i}^N \mathbf{H}_j \mathbf{P}_j \mathbf{H}_j^H \right]} \right), \quad (4.42)$$

Algoritma 4.1 SIMO - Doğrusal Alıcı için Güç Dağılımı Algoritması

Girdi: Direkt kanal katsayı matrisi $\mathbf{H}_{eff} \in \mathbb{C}^{N \times N}$ ve girişim kanal katsayı vektörü $\bar{\mathbf{g}} \in \mathbb{C}^{N \times 1}$

Çıktı: Eniyi güç dağılımı vektörü $\mathbf{p}^* (\mathbf{H}_{eff}, \mathbf{g})$

İlk Değerler: Girişim-gürültü seviyelerini, $\frac{N_0 |g_i|^2}{\sigma_i^2}$, $1 \leq i \leq N$, küçükten büyüğe sırala: $\frac{N_0 |g_{\pi(1)}|^2}{\sigma_{\pi(1)}^2} \leq \dots \leq \frac{N_0 |g_{\pi(N)}|^2}{\sigma_{\pi(N)}^2}$. Girişim kanal güçlerini, $|g_i|^2$, küçükten büyüğe sırala: $|g_{\pi(1)}|^2 \leq \dots \leq |g_{\pi(N)}|^2$. Eşitle $\mathbf{n}_v = \begin{bmatrix} \frac{N_0 |g_{\pi(1)}|^2}{\sigma_{\pi(1)}^2} & \dots & \frac{N_0 |g_{\pi(N)}|^2}{\sigma_{\pi(N)}^2} \end{bmatrix}$, $\mathbf{g}_{sort} = [|g_{\pi(1)}|^2 \dots |g_{\pi(N)}|^2]^T$, $son = N$, $loop = 1$.

while $loop$

$w_l = \mathbf{n}_v (last)$, Su Seviyesi

$\mathbf{p} = \min \{ \max [((w_l - \mathbf{n}_v) ./ \mathbf{g}_{sort}), 0], P_{\max} \}$

$s_i = \mathbf{p}^T \mathbf{g}_{sort}$, Toplam Girişim Gücü

if $s_i > Q$ **then**

$son = son - 1$, Su Seviyesini Bir Seviye Azalt

else

while $abs(\mathbf{p}^T \mathbf{g}_{sort} - Q) > 10^{-5}$

$w_l = w_l + step$, Su Seviyesini step Kadar Arttır

$\mathbf{p} = \min \{ \max [((w_l - \mathbf{n}_v) ./ \bar{\mathbf{g}}_{sort}), 0], P_{\max} \}$

end while

$loop = 0$

end if

end while

Çıktı $\mathbf{p}^* (\mathbf{H}_{eff}, \mathbf{g})$

şeklindedir. Görüldüğü gibi, baz istasyonu i . kullanıcının sinyalini çözerken diğer sinyalleri gürültü olarak kabul etmektedir. Tam kanal durum bilgisinin tüm kullanıcılarda ve tüm baz istasyonlarında bulunduğu varsayılan sistemde anten başına güç kısıtları ve BKK'ye yapılan toplam girişim kısıtı altında İKK'lerin veri hızını enbüyültme problemi

$$\begin{aligned}
 \mathbf{P}^* = \arg \max_{\mathbf{P}} \quad & \sum_{i=1}^N \log_2 \left(\frac{\det \left[N_0 \mathbf{I} + \sum_{i=1}^N \mathbf{H}_i \mathbf{P}_i \mathbf{H}_i^H \right]}{\det \left[N_0 \mathbf{I} + \sum_{j \neq i}^N \mathbf{H}_j \mathbf{P}_j \mathbf{H}_j^H \right]} \right) \\
 \text{s.t.} \quad & \{\mathbf{P}_i\}_{j,j} \geq 0, \quad \forall i, j, \\
 & \{\mathbf{P}_i\}_{j,j} \leq P_{\max}, \quad \forall i, j, \\
 & \{\mathbf{P}_i\}_{j,k} = 0, \quad \forall i, \forall j \neq k \\
 & \sum_{i=1}^N \mathbf{g}_i^H \mathbf{P}_i \mathbf{g}_i \leq Q,
 \end{aligned} \tag{4.43}$$

şeklinde olacaktır. Kısım 4.2.2'deki MIMO senaryosundaki gibi kısıtların anten başına seçilmiş olmasından dolayı her bir anten farklı birer kullanıcı gibi davranmakta ve N kullanıcı, her kullanıcıda N_K anten olan MIMO problem ile $N \cdot N_K$ kullanıcı (4.44)'da gösterilen SIMO problemle denk olmaktadır.

$$\begin{aligned}
 \mathbf{p}^* = \arg \max_{\mathbf{p}} \quad & R_{\text{toplam}} = \sum_{i=1}^{N \cdot N_K} \log_2 \left(\frac{\det \left[N_0 \mathbf{I} + \sum_{i=1}^{N \cdot N_K} \hat{P}_i \mathbf{h}_i \mathbf{h}_i^H \right]}{\det \left[N_0 \mathbf{I} + \sum_{j \neq i}^{N \cdot N_K} \hat{P}_j \mathbf{h}_j \mathbf{h}_j^H \right]} \right) \\
 \text{s.t.} \quad & \hat{P}_i \geq 0, \quad \forall i \\
 & \hat{P}_i \leq P_{\max}, \quad \forall i \\
 & \sum_{i=1}^{N \cdot N_K} |g_i|^2 \hat{P}_i < Q,
 \end{aligned} \tag{4.44}$$

Burada $\hat{P}_i$, i . antenin gücünü, $\mathbf{h}_i$, i . anten ile İKB arasındaki $N_B \times 1$ boyutlu vektörel kanalı ve g_i 'de i . anten ile BKK arasındaki skaler kanal katsayısını göstermektedir.

Aynı şekilde, güç dağılımı da sıralı girişim giderimi olmayan SIMO sistemdeki gibi Teori 4.3'te gösterilen girişimle düzenlenmiş bir su doldurma çözümüdür ve Algoritma 4.1 ile bulunmaktadır.

4.4 Benzetim Çalışmaları

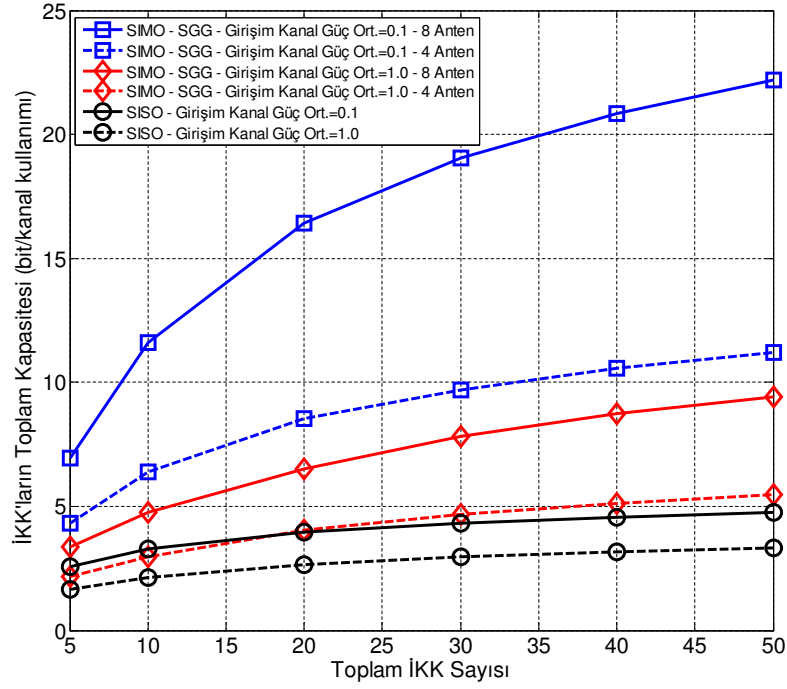
Bu bölümde, çoklu anten senaryolarının veri hızı sonuçları, İKK sayısı, BKK sayısı, girişim kanal güç ortalamaları ve girişim gücü eşik değeri gibi değişkenlere göre değişimi incelenmektedir. Benzetim çalışmalarında hem girişim kanalları (İKK'ler ve BKK'ler arasında) hem de direkt kanallar (İKK'ler ve İKB arasında) Rayleigh sönümlemeli olarak seçilmiştir. Benzetimleri farklı kanal durumlarında gerçekleştirmek basit bir şekilde yapılabilmektedir.

Tüm benzetim çalışmalarında bireysel maksimum güç kısıtı 1 W olarak seçilmiştir. Rayleigh sönümlemeli direkt kanal güç kazançlarının ortalaması tüm simülasyonlarda 1 olacak şekilde sabit tutulmuştur.

4.4.1 Alıcıda Sıralı Girişim Giderimi Olduğu Durumda Güç Dağılımı

İlk olarak tek-girdili çok-çıkıtlı (SIMO) kanal senaryosu incelenmiştir ve alıcıda sıralı girişim giderimi yapılabildiği varsayılmaktadır. İkinci katman baz istasyonunda 4 veya 8 adet anten olduğu varsayılmaktadır. Şekil 4.3'te, hem direkt hem de girişim kanalları Rayleigh sönümlemeli kanallardır. Girişim gücü eşik değeri 0.5 W olarak sabit tutulmuştur. Toplam veri hızı farklı sayıda İKK'ler ve farklı girişim kanalı güç kazancı ortalamaları için hesaplanmıştır. Görüldüğü gibi alıcıdaki anten sayısını arttırmak SISO kanallara göre performans artışı sağlamıştır. Ayrıca, girişim kanal kazançlarının ortalaması arttıkça toplam veri hızı azalmaktadır.

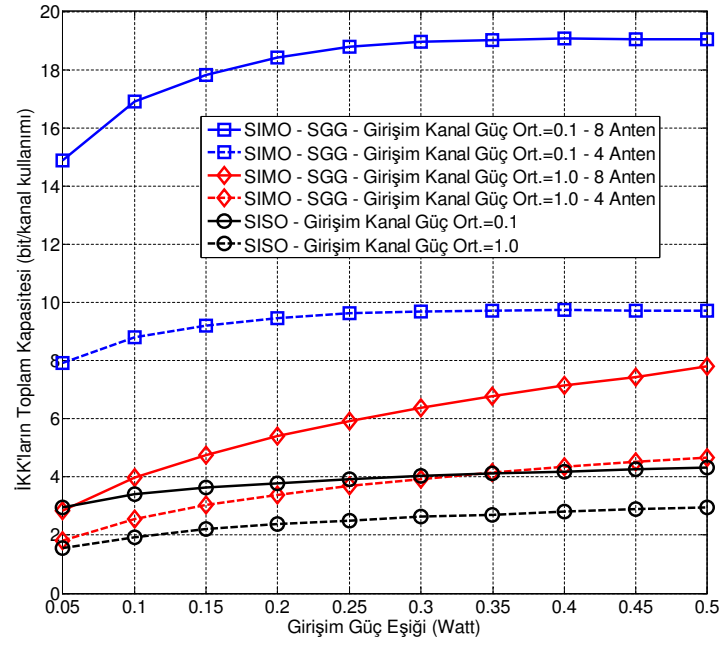
Şekil 4.4'te, toplam veri hızı farklı girişim gücü eşik değerleri ve farklı girişim kanalı güç kazancı ortalamaları için hesaplanmıştır. İkinci katmanda 30 adet İKK bulunmaktadır ve ikinci katman baz istasyonunda 4 veya 8 adet anten olduğu varsayılmaktadır. Hem direkt hem de girişim kanalları Rayleigh sönümlemeli



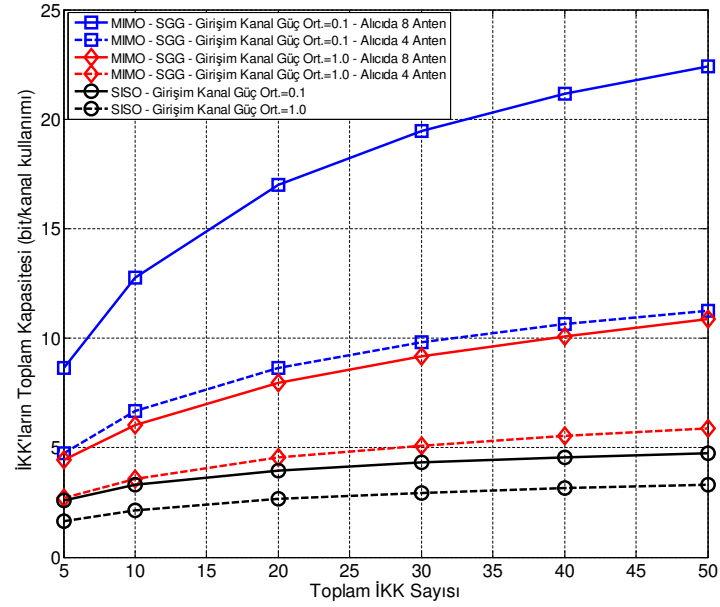
Şekil 4.3. Alıcıda SGG Olduğu Durum - SIMO Kanallar - İKK Sayısına Karşılık Veri Hızı Değişimi

kanallardır. Girişim gücü eşik değeri arttıkça performans artmaktadır ancak belirli bir değerden sonra bu artış durmuştur.

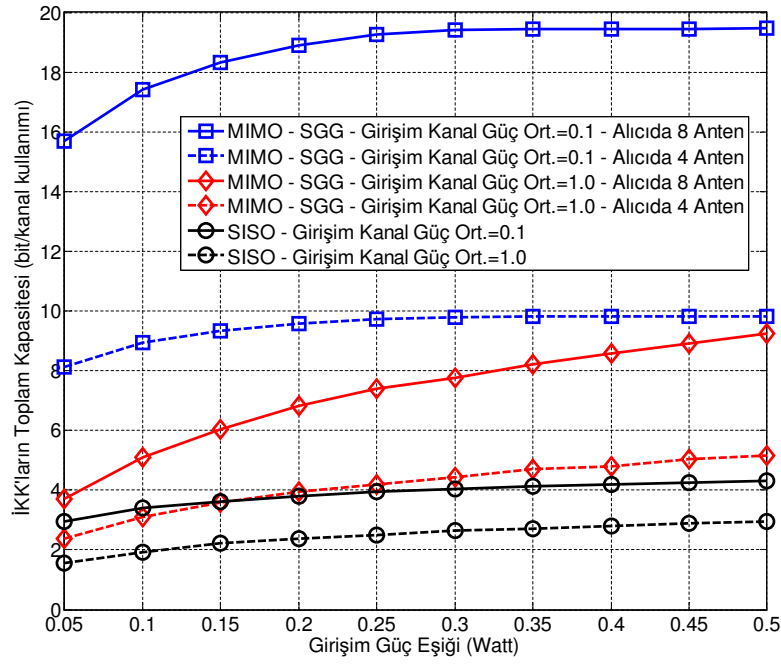
Sonrasında çok-girdili çok-çıkıtlı (MIMO) kanal senaryosu incelenmiştir, tüm vericilerde 2 adet anten olduğu ve alıcıda 4 veya 8 adet anten olduğu varsayılmaktadır. Kullanıcıların veri hızı limitlerinin aşılmaması için anten başına en-büyük verici gücü kısıtı $0.5W$ olarak ayarlanmıştır. Şekil 4.5'te, hem direkt hem de girişim kanalları Rayleigh sönümlmeli kanallardır. Girişim gücü eşik değeri $0.5W$ olarak sabit tutulmuştur. Toplam veri hızı farklı sayıda İKK'ler ve farklı girişim kanalı güç kazancı ortalamaları için hesaplanmıştır. SIMO senaryoda olduğu gibi alıcıdaki anten sayısının arttırılması SISO kanallara göre performans artışı sağlamıştır. Ayrıca, girişim kanal kazançlarının ortalaması arttıkça toplam veri hızı azalmaktadır.



Şekil 4.4. Alıcıda SGG Olduğu Durum - SIMO Kanallar - Girişim Eşik Değerine Karşılık Veri Hızı Değişimi



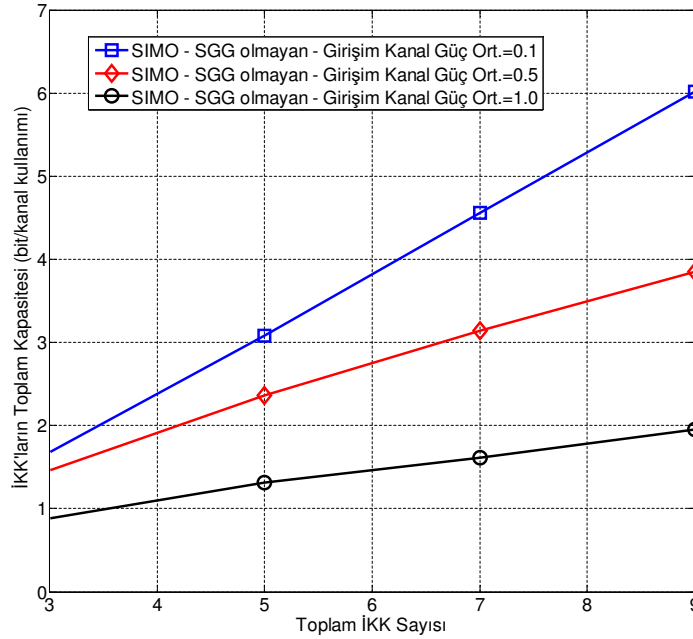
Şekil 4.5. Alıcıda SGG Olduğu Durum - MIMO Kanallar - İKK Sayısına Karşılık Veri Hızı Değişimi



Şekil 4.6. Alıcıda SGG Olduğu Durum - MIMO Kanallar - Girişim Eşik Değerine Karşılık Veri Hızı Değişimi

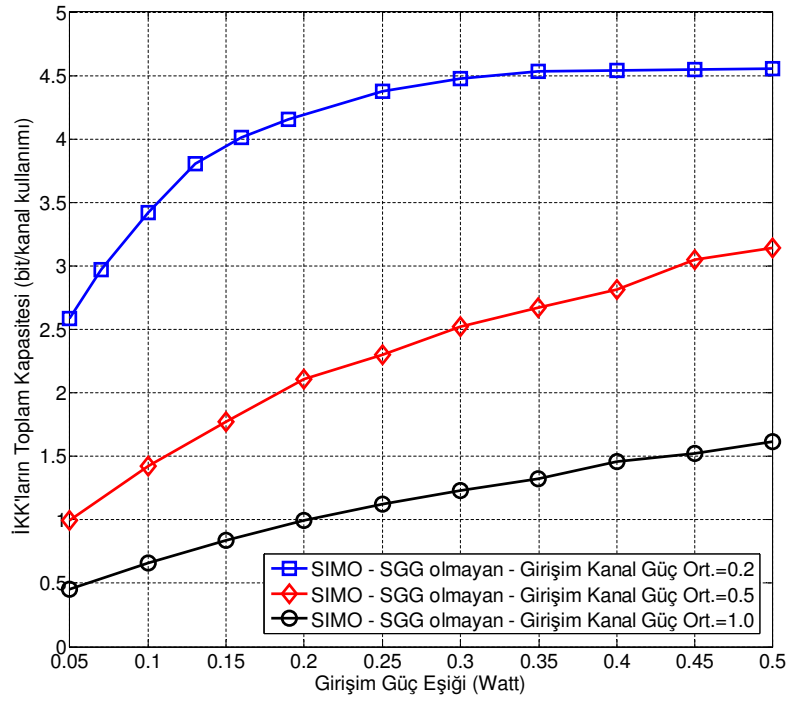
Şekil 4.6'da, MIMO kanal senaryosu için toplam veri hızı farklı girişim gücü eşik değerleri ve farklı girişim kanalı güç kazancı ortalamaları için hesaplanmıştır. Her vericide 2 adet anten olduğu varsayılan sistemde ikinci katmanda 30 adet İKK bulunmaktadır. Kullanıcıların veri hızı limitlerinin aşılmaması için anten başına enbüyük verici gücü kısıtı 0.5W olarak ayarlanmıştır. İkinci katman baz istasyonunda 4 veya 8 adet anten olduğu varsayılmaktadır. Hem direkt hem de girişim kanalları Rayleigh sönümlmeli kanallardır. Girişim gücü eşik değeri veri hızını arttırmaktadır ancak belirli bir değerden sonra satürasyon görülmektedir. Veri hızı artışındaki bu durmanın sebebi girişim gücü eşik arttıkça tüm kullanıcıların iletme tam güçle katılmasıdır. Bu durumda veri hızı daha fazla artmamaktadır.

4.4.2 Alıcıda Sıralı Girişim Giderimi Olmadığı Durumda Güç Dağılımı - Büyükölçek SIMO/MIMO



Şekil 4.7. Alıcıda SGG Olmadığı Durum - SISO Kanallar - İKK Sayısına Karşı-
lık Veri Hızı Değişimi

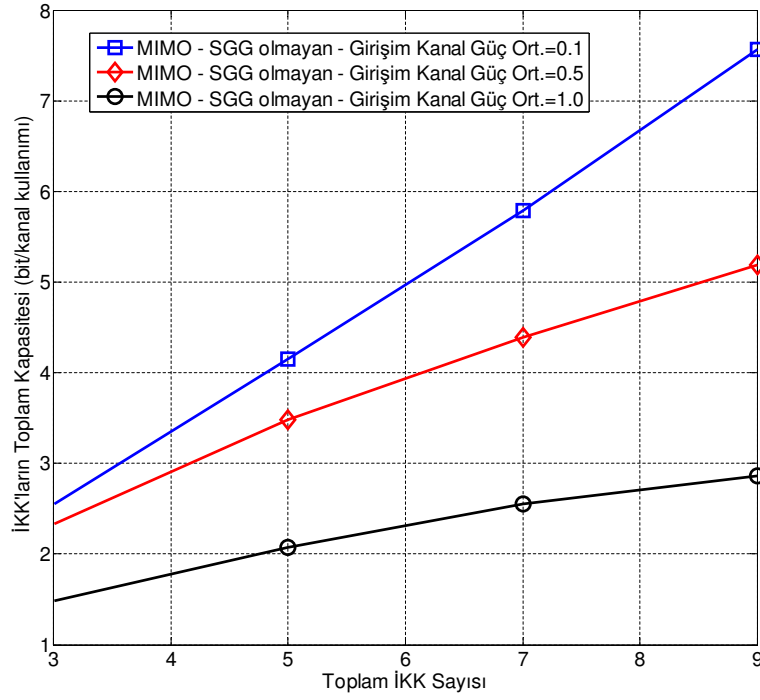
Şekil 4.7’de alıcıda sıralı girişim giderimi yapılamayan senaryoda, ilk olarak SISO kanallar incelenmiştir. Önceki senaryolarda olduğu gibi hem direkt hem de girişim kanalları Rayleigh sönümlenmeli kanallardır. Girişim gücü eşik değeri $0.5W$ olarak sabit tutulmuştur. Alıcıda SGG olmadığı için girişimin ortadan kaldırılabilmesi adına İKB’de fazladan bir alıcı filtresine ihtiyaç duyulmaktadır ve bu alıcı filtresinin oluşturulabilmesi için alıcıda en azından verici sayısı kadar anten kullanılması gerekmektedir. Alıcıda tam olarak verici sayısı kadar anten olduğu varsayılan benzetim çalışmalarında, toplam veri hızı farklı sayıda İKK’ler ve farklı girişim kanalı güç kazancı ortalamaları için hesaplanmıştır. Önceki benzetimlerde olduğu gibi girişim kanal gücü ortalama değerleri arttıkça veri hızı düşmektedir, yani, fiziksel olarak düşünülürse, BKK’ler ve İKK’ler arasındaki uzaklık azaldıkça İKK’lerin etkilediği girişim artmakta ve veri hızı azalmaktadır.



Şekil 4.8. Alıcıda SGG Olmadığı Durum - SIMO Kanallar - Girişim Eşik Değeri Karşılık Veri Hızı Değişimi

Şekil 4.8'de, ikinci katmanda 7 adet İKK bulunmaktadır ve ikinci katman baz istasyonunda da İKK sayısı kadar, yani, 7 adet anten olduğu varsayılmaktadır. Alıcıda sıralı girişim giderimi yapılamayan sistemde toplam veri hızı farklı girişim gücü eşik değerleri ve farklı girişim kanalı güç kazancı ortalamaları için hesaplanmıştır. Hem direkt hem de girişim kanalları Rayleigh sönümlmeli kanallardır. Girişim gücü eşik değeri arttıkça performans artmaktadır ancak belirli bir değerden sonra bu artış durmaktadır.

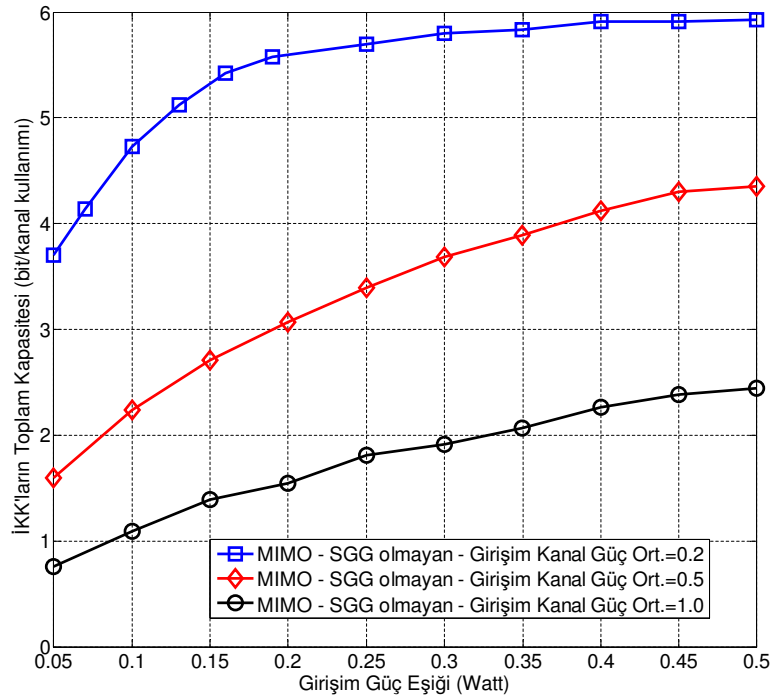
Şekil 4.9'da MIMO kanal senaryosu alıcıda sıralı girişim giderimi yapılamadığı durumda incelenmiştir. Girişim gücü eşik değeri $0.5W$ olarak sabit tutulmuştur. Alıcıda SGG olmadığı için girişimin ortadan kaldırılabilmesi adına SIMO senaryosunda olduğu gibi İKB'de fazladan bir alıcı filtresine ihtiyaç duyulmaktadır ve bu alıcı filtresinin oluşturulabilmesi için alıcıda en azından vericilerdeki toplam anten sayısı kadar anten kullanılması gerekmektedir. Bu sebeple yük-



Şekil 4.9. Alıcıda SGG Olmadığı Durum - MIMO Kanallar - İKK Sayısına Karşılık Veri Hızı Değişimi

sek sayıda çok antenli İKK için bu senaryo büyükölçek MIMO konusuna girmektedir. Alıcıda tam olarak vericilerdeki toplam anten sayısı kadar alıcı anteni olduğu varsayılan benzetim çalışmalarında, toplam veri hızı farklı sayıda İKK'ler ve farklı girişim kanalı güç kazancı ortalamaları için hesaplanmıştır. Kullanıcıların veri hızı limitlerinin aşılmasında için anten başına enbüyük verici gücü kısıtı $0.5W$ olarak ayarlanmıştır. Girişim kanalı gücü ortalama değerleri arttıkça veri hızı düşmektedir.

Şekil 4.10'da, yine SGG olmayan MIMO kanal senaryosunda toplam veri hızı farklı girişim gücü eşik değerleri ve farklı girişim kanalı güç kazancı ortalamaları için hesaplanmıştır. İkinci katmanda 7 adet İKK bulunmaktadır ve her İKK'de de 2 adet anten bulunmaktadır. İkinci katman baz istasyonunda da İKK'lerdeki toplam anten sayısı kadar, yani, 14 adet anten olduğu varsayılmaktadır. Alıcıda SGG olmayan sistemde hem direkt hem de girişim kanalı-

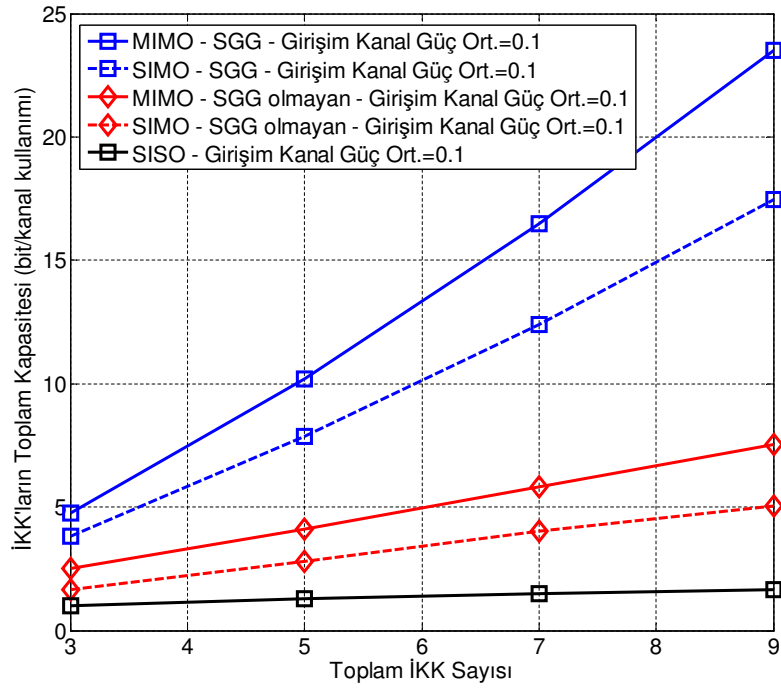


Şekil 4.10. Alıcıda SGG Olmadığı Durum - MIMO Kanallar - Girişim Eşik Değerine Karşılık Veri Hızı Değişimi

ları Rayleigh sönümlmeli kanallardır. Kullanıcıların veri hızı limitlerinin aşılması için anten başına enbüyük verici gücü kısıtı $0.5W$ olarak ayarlanmıştır. Girişim gücü eşik değeri arttıkça performans artmaktadır ancak belirli bir değerden sonra bu artış durmaktadır.

4.4.3 Senaryolar Arası Karşılaştırmalar

Senaryolar arası karşılaştırmalarda SGG olan ve olmayan SIMO ve MIMO senaryolar karşılaştırması yapılmıştır. MIMO senaryolarda vericilerde 2 adet anten bulunmaktadır ve adiliyet açısından anten başına verici gücü limiti SIMO senaryolar için $1W$, MIMO senaryolar içinse $0.5W$ olarak seçilmiştir. SGG olmayan MIMO senaryosunda alıcıdaki anten sayısı vericilerin toplam anten sayısı kadardır, yine adil bir karşılaştırma yapılabilmesi için diğer tüm senaryolarda da alıcı anten sayısı SGG olmayan MIMO senaryosu ile aynı seçil-



Şekil 4.11. İncelenen Çok Antenli Senaryoların Karşılaştırılması

miştir. Şekil 4.11'de İKK'lerin toplam veri hızının İKK sayısına göre değişimi, SISO senaryo ile beraber 5 farklı senaryonun karşılaştırması şeklinde verilmiştir. Beklenildiği gibi SISO senaryo en düşük performansı göstermiştir. Alıcıda anten sayısını arttırmak sistem performansını arttırmıştır hatta vericide de anten sayısı arttırılan MIMO senaryolar SIMO senaryolardan yüksek veri hızları sağlamaktadır. Ayrıca SGG olan senaryo da SGG olmayan senaryoya göre daha yüksek performans göstermektedir. Bu performans farkı da, SGG olmayan senaryoda daha basit bir alıcı kullanılması ve fazladan bir alıcı filtresi kullanımından kaynaklanmaktadır.

5. İKİ KATMANLI AĞ YAPILARI - SISO ÇOK-TAŞIYICILI KANALLARDA ENİYİ GÜÇ DAĞILIMI

Tez kapsamında incelenen üçüncü problem, çok kullanıcı, *çok-taşıyıcılı*, tek-girdili tek-çıkıtlı (SISO) kanallardaki veri hızı enbüyültme problemidir.

Çok-taşıyıcılı senaryoda kullanıcılar dar ve birbirlerine dik frekans bantlarında çalışmaktadırlar, öyle ki bu frekans bantları kendi içlerinde frekans-düz davranmaktadırlar ve ikinci katmanda kullanıcılar arası frekans bantlarında girişim olmamaktadır. Önceki bölümlerde olduğu gibi, ikinci katmandaki kullanıcıların veri hızını, birinci katman kullanıcılarına uygulanan girişim kısıtı altında enbüyültecek bir problem oluşturulmuştur. Bu problemin eniyi güç dağılımı sayısal olarak eniyileme araçları kullanılarak hesaplanmıştır. Eniyi güç dağılımı incelendiğinde, çözümün özyineli su doldurma ve özyineli girişimle düzenlenmiş su doldurma çözümlerinin bir karışımı olduğu görülmektedir. Sonrasında, analitik sonuçlar bulmak adına, eniyi çözüme yakın üst ve alt sınırlar hesaplanmıştır.

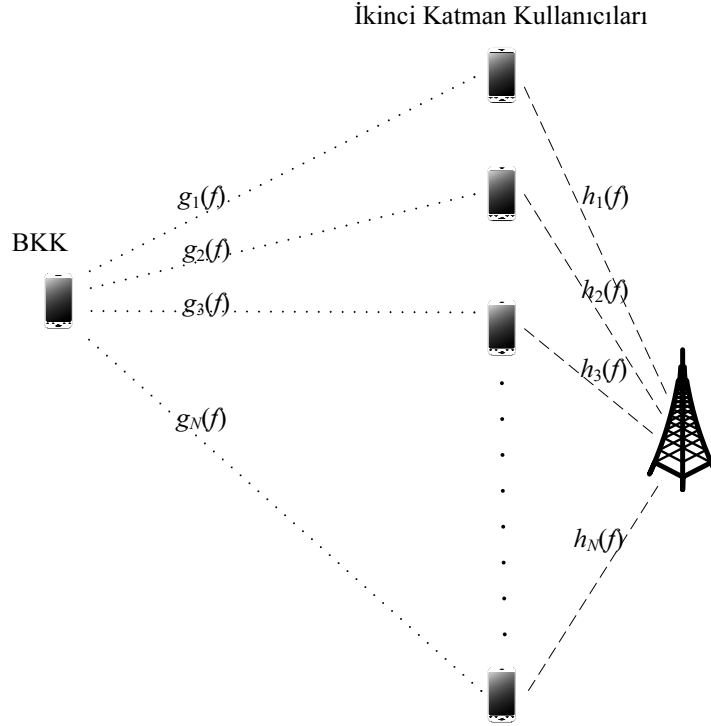
Toplam girişim kısıtı incelendiği durumda BKK sayısının problem formülasyonunu değiştirmedeği önceki senaryolarda gösterilmiştir (bkz. Kısım 3.3 sayfa 54). Anlatım karmaşıklığının azalması açısından sonraki bölümlerde tek aktif birinci katman kullanıcısı olduğu varsayılacaktır.

5.1 İlgili Çalışmalar ve Katkıları

Literatürde çok-taşıyıcılı sistemlerde, çoklu erişim kanalı için kaynak tahsisi uygulayan çalışmalar mevcuttur [108, 109, 111, 112]. Ancak bu çalışmalarda veri hızı eniyilenen kullanıcıların ortamdaki başka kullanıcılara uyguladığı girişim değeri kısıtlanmamıştır ve aynı ortamda farklı kullanıcıların iletişimi eniyileme problemine dahil edilmemiştir. Girişimin de sınırlandırıldığı çok katmanlı iletişim senaryolarını içeren ve aynı zamanda çok-taşıyıcılı çalışmalardan olan Kang'ın [95, 96] çalışmalarının bizim çalışmamızdan farkı, ergodik kapasitenin enbüyültülmesi ve tek ikincil kullanıcı kullanılmasıdır. Bizim çalışmamız birden fazla kullanıcı, alıcılarda ve vericilerde birden çok anten, çok-taşıyıcı

ve geri besleme kısıtları gibi farklı senaryoları kapsamalarıyla farklılıklar göstermektedir. Yine girişimin göz önünde bulundurulduğu Gong'un [97] çalışmasında bizim çalışmamızdan farklı olarak ikincil kullanıcıların birbirlerine girişim yapmayacak şekilde farklı frekans bantlarına atandığı varsayılmıştır. Diğer çalışmalar hakkında detaylı bilgi için literatür taraması kısmına bakınız.

5.2 Sistem Modeli



Şekil 5.1. SISO Çok-Taşıyıcı Kanal Modeli.

Şekil 5.1'de, heterojen bir yapıya sahip iki katmanlı bir senaryo gösterilmektedir. İlk katman, R_c yarıçaplı bir servis alanını kapsayan merkezi bir ağ ve bu katmanın kullanıcılarından, ikinci katman da bu merkezi ağın içerisindeki R_f yarıçaplı servis alanına sahip bir ağ ve bu katmanın kullanıcılarından oluşmaktadır. Senaryoda, aynı kanal kaynaklarını kullanan 1 adet BKK ve N adet İKK vardır. İKK'ler kendi baz istasyonlarıyla haberleşirken, BKK'lere girişimde bulunmaktadırlar. İkinci katman kullanıcıları baz istasyonları ile bir çoklu erişim kanalı oluşturmaktadırlar ve İKB'de sıralı girişim giderimi yapılabilirdiği varsayı-

olarak çoklu erişim kanalında İKK'ler arası girişimin tamamen ortadan kaldırıldığı kabul edilmektedir. Çok-taşıyıcılı sistemde, frekans bandı dar, birbirine dik bantlara ayrılmıştır ve her bir bandın kendi içerisinde frekans-düz sönümlenmeye sahip olduğu varsayılmaktadır. $h_i(f)$ ve $g_i(f)$, sırasıyla, i . İKK ile İKB arasındaki ve i . İKK ile BKK arasındaki f frekans bandındaki kanal katsayılarını göstermektedir. Bu kanal katsayıları sıfır ortalamaya ve birim varyansa sahip kompleks Gauss bağımsız dağılımlardan seçilmişlerdir.

Tam kanal durum bilgisinin tüm kullanıcılarda ve baz istasyonunda bulunduğu varsayılan sistemde toplam veri hızı

$$R_{\text{toplam}} = \sum_f B \log_2 \left(1 + \frac{\sum_{i=1}^N |h_i(f)|^2 P_i(f)}{N_0 B} \right), \quad (5.1)$$

şeklinde. Bireysel güç kısıtları ve BKK'lere yapılan toplam girişim kısıtı altında İKK'lerin veri hızını enbüyütleme problemi de

$$\begin{aligned} \mathbf{P}^* = \arg \max_{\mathbf{P}} \quad & R_{\text{toplam}} = \sum_f B \log_2 \left(1 + \frac{\sum_{i=1}^N |h_i(f)|^2 P_i(f)}{N_0 B} \right) \\ \text{s.t.} \quad & P_i(f) \geq 0, \quad \forall i, \forall f \\ & \sum_f P_i(f) \leq P_{\text{max}}, \quad \forall i \\ & \sum_{i=1}^N \sum_f |g_i(f)|^2 P_i(f) \leq Q, \end{aligned} \quad (5.2)$$

şeklinde. Burada, $\mathbf{P}^* = [\mathbf{p}_1^*(f) \ \dots \ \mathbf{p}_N^*(f)]$ İKK'lerin eniyi güç dağılım matrisini, $\mathbf{p}_i^*(f) = [P_i^*(f_1) \ \dots \ P_i^*(f_F)]^T$ vektörü i . kullanıcının her frekans bandındaki güç değerlerini taşıyan vektörü, $P_i(f)$, i . İKK'nin f frekans bandındaki verici gücünü, N_0 İKB'deki gürültü gücünü, B frekans bantlarının bant genişliğini ve Q toplam girişim gücü eşik değerini göstermektedir.

5.2.1 Güç Dağılımı Algoritması

Denklem (5.2)'deki problemin çözümünün, sıralı girişim giderimi olan SIMO senaryosundaki çözüme benzer bir özyineli güç ve girişimle düzenlenmiş su doldurma çözümü olduğu gösterilmiştir.

Teori 5.1 *Birinci katmanda tek BKK, ikinci katmanda N adet İKK içeren iki katmanlı çok-taşıyıcılı iki katmanlı bir hücresel sistemin, azami güç kısıtları ve birincil katman kullanıcılarına etki eden toplam girişim kısıtı altında eniyi güç dağılımı özyineli güç ve girişimle düzenlenmiş bir su doldurma çözümüdür. Bu su doldurma çözümünün güç dağılımı formülasyonu*

$$P_i^*(f) = \left(\frac{1}{(\mu_i + \lambda |g_i(f)|^2) \ln 2} - \frac{T_i(f)}{|h_i(f)|^2} \right)^+, \forall i, \forall f, \quad (5.3)$$

ile verilir. Burada $T_i(f) = N_0 B + \sum_{j \neq i} |h_j(f)|^2 P_j(f)$ değeridir, $(x)^+ = \begin{cases} x, & x > 0 \\ 0, & \text{diğer} \end{cases}$ işlevidir ve μ_i ve λ sırasıyla kullanıcı başına frekanslar üzerinden toplam güç kısıtı ve toplam girişim kısıtı ile ilgili Lagrange çarpanlarıdır. Lagrange çarpanları ve dolayısıyla su seviyesinin bulunması da toplam güç kısıtı ve toplam girişim kısıtı kullanılarak

$$\sum_f \left(\frac{1}{(\mu_i + \lambda |g_i(f)|^2) \ln 2} - \frac{T_i(f)}{|h_i(f)|^2} \right)^+ \leq P_{\max}, \forall i, \quad (5.4)$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_f |g_i(f)|^2 \left(\frac{1}{(\mu_i + \lambda |g_i(f)|^2) \ln 2} - \frac{T_i(f)}{|h_i(f)|^2} \right)^+ \leq Q, \quad (5.5)$$

ifadeleri ile gerçekleştirilmektedir.

İspat 5.1

Problem (5.2)'ye bakıldığında maliyet işlevinin ve tüm kısıtların dışbükey ve doğrusal oldukları görülmektedir. Bundan yola çıkarak problemin çözümünü bulmak için problemin Lagrangian'ı hesaplanmalı ve Karush-Kuhn-Tucker (KKT) koşulları [30] incelenmelidir. Problemin Lagrangian'ı hesaplanırken (5.2)'de verilen problemin birinci kısıtı şu anda gözardı edilip sonradan çözüme eklenecektir. Bu durumda Lagrangian

$$L(\mu_i, \lambda, P_i(f)) = -\sum_f \log_2 \left(1 + \frac{\sum_{i=1}^N |h_i(f)|^2 P_i(f)}{N_0 B} \right) + \sum_{i=1}^N \mu_i \left(\sum_f P_i(f) - P_{\max} \right) + \lambda \left(\sum_{i=1}^N \sum_f |g_i(f)|^2 P_i(f) - Q \right), \quad (5.6)$$

eşitliği ile hesaplanır. Lagrangian'ın $P_i(f)$ 'e göre türevi alınıp sıfıra eşitlendiğinde

$$\left. \frac{\partial L}{\partial P_i(f)} \right|_{P_i(f)=P_i^*(f)} = -\frac{1}{\ln 2} \frac{|h_i(f)|^2}{N_0 B + |h_i(f)|^2 P_i^*(f) + \sum_{j \neq i} |h_j(f)|^2 P_j(f)} + \mu_i + \lambda |g_i(f)|^2 = 0, \quad (5.7)$$

elde edilir. Bu eşitlikten $P_i(f)$ çekilirse ve problem (5.2)'deki ilk kısıt çözüme eklenirse eniyi güç dağılımı

$$P_i(f) = \left(\frac{1}{(\mu_i + \lambda |g_i(f)|^2) \ln 2} - \frac{T_i(f)}{|h_i(f)|^2} \right)^+, \quad \forall i, \forall f, \quad (5.8)$$

şeklinde son halini alacaktır. Burada $T_i(f) = N_0 B + \sum_{j \neq i} |h_j(f)|^2 P_j(f)$ değeridir,

$$(x)^+ = \begin{cases} x, & x > 0 \\ 0, & \text{diğer} \end{cases} \quad \text{işlevidir. Görüldüğü gibi } i. \text{ kullanıcının } f \text{ frekans bandın-}$$

daki eniyi güç dağılımını bulmak için diğer kullanıcıların tüm frekans bantlarındaki eniyi güç dağılımlarına ihtiyaç vardır. Bu sebeple çözüm özyineli bir yapıdadır. Ayrıca, çözüm incelendiğinde, bir su doldurma çözümü yapısı olduğu da görülmektedir. Su doldurma çözümündeki su seviyesi de kullanıcı başına frekanslar üzerinden toplam güç kısıtı ve toplam girişim kısıtı kullanılarak

$$\sum_f \left(\frac{1}{(\mu_i + \lambda |g_i(f)|^2) \ln 2} - \frac{T_i(f)}{|h_i(f)|^2} \right)^+ \leq P_{\max}, \quad \forall i, \quad (5.9)$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_f |g_i(f)|^2 \left(\frac{1}{(\mu_i + \lambda |g_i(f)|^2) \ln 2} - \frac{T_i(f)}{|h_i(f)|^2} \right)^+ \leq Q, \quad (5.10)$$

bulunacaktır.

Eniyi sonuç incelendiğinde, Teori 5.1'teki çözümün güç-doldurma ve girişim-doldurma çözümlerinin bir karışımı olduğu görülmektedir. Teorideki (5.4) denklemi güç-doldurma sonucunu, (5.5) denklemi de girişim doldurma sonucunu doğurmaktadır. Kısıtların problem üzerindeki baskınlıkları eniyi dağılımın hangi sonuca yakın olacağını belirlemektedir. Geleneksel su doldurma çözümlerinde su seviyesi toplam güç kısıtı kullanılarak bulunur. Oysaki, bizim problemimizde hem toplam güç kısıtı hem de toplam girişim kısıtı kullanılarak (5.4) ve (5.5) formülleri ile bulunmaktadır. Bu sebeple eniyi güç dağılımı çözüme *özyineli* güç ve girişimle düzenlenmiş su doldurma çözümü denilmiştir.

SISO çok-taşıyıcılı senaryo için, eniyi güç dağılımı özyineli güç ve girişimle düzenlenmiş su doldurma çözümünde, su seviyesi sayısal olarak hesaplanmaktadır. Ancak analitik yöntemler kullanılarak eniyiye çok yakın üst ve alt sınırlar bulunabilmektedir.

5.3 Analitik Hesaplanabilen Eniye Yakın Üst ve Alt Sınırlar

5.3.1 Üst Sınır

Problemin maliyet işlevi incelenmiş ve logaritmaların toplamı şeklinde olduğu görülmüştür. Maliyet işlevinin logaritma içerisinde toplama işlemleri şeklinde yazılması daha önceki bölümlerde incelenen maliyet işlevlerine benzer bir hal almasını sağlayacaktır. Geometrik-aritmetik eşitsizlik ilkesi bu durumu sağlayabilmektedir. Geometrik-aritmetik eşitsizlik ilkesine göre

$$\frac{x_1 + \dots + x_n}{n} \geq \sqrt[n]{x_1 \dots x_n}, x_i \in \mathbb{R}^+, \forall i, \quad (5.11)$$

eşitsizliği x_i 'lerin hepsi aynı olduğu durumda eşitlik olarak gerçekleşir. Eşitsizliğin sağ tarafını problem (5.2)'e benzetmek için ilk olarak her iki tarafın logaritması alınarak

$$\log_2 \left(\frac{x_1 + \dots + x_n}{n} \right) \geq \frac{1}{n} \log_2 (x_1 \dots x_n), \quad (5.12)$$

$$\log_2 \left(\frac{x_1 + \dots + x_n}{n} \right) \geq \frac{\log_2 (x_1) + \dots + \log_2 (x_n)}{n}, \quad (5.13)$$

$$n \log_2 \left(\frac{x_1 + \dots + x_n}{n} \right) \geq \log_2 (x_1) + \dots + \log_2 (x_n), \quad (5.14)$$

elde edilecektir. Görüldüğü gibi eşitsizliğin sağ tarafı logaritmaların toplamı sol tarafı da logaritma içerisinde toplama işlemleri halini almıştır. Bu eşitsizlik literatürde logaritmik toplam eşitsizliği olarak geçmektedir. Problem (5.2)'de maliyet işlevi logaritmaların toplamı olduğuna göre, maliyet işlevi logaritma içerisinde

toplama işlemleri halinde yazılarak probleme bir üst sınır

$$\sum_f B \log_2 \left(1 + \frac{\sum_{i=1}^N |h_i(f)|^2 P_i(f)}{N_0 B} \right) \leq FB \log_2 \left(\frac{\sum_f \left(1 + \frac{\sum_{i=1}^N |h_i(f)|^2 P_i(f)}{N_0 B} \right)}{F} \right),$$

şeklinde getirilebilir. Burada, F frekans bantlarının toplam sayısını göstermektedir. Bu durumda üst sınır problemi

$$\begin{aligned} \mathbf{P}^* = \arg \max_{\mathbf{P}} \quad & FB \log_2 \left(\frac{\sum_f \left(1 + \frac{\sum_{i=1}^N |h_i(f)|^2 P_i(f)}{N_0 B} \right)}{F} \right) \\ \text{s.t.} \quad & P_i(f) \geq 0, \quad \forall i, f \\ & \sum_f P_i(f) \leq P_{\max}, \quad \forall i \\ & \sum_i \sum_f |g_i(f)|^2 P_i(f) \leq Q. \end{aligned} \tag{5.15}$$

şeklinde yazılacaktır.

5.3.1.1 Güç Dağılımı Algoritması

Bilindiği gibi, logaritma fonksiyonu tekdüze artan bir fonksiyon olduğu için,

$$FB \log_2 \left(\frac{\sum_f \left(1 + \frac{\sum_{i=1}^N |h_i(f)|^2 P_i(f)}{N_0 B} \right)}{F} \right) \text{ işlevini enbüyüten güç vektörü aynı zamanda}$$

$\sum_{i=1}^N \sum_f |h_i(f)|^2 P_i(f)$ işlevini de enbüyöltecektir. Böylece, problemdeki maliyet işlevi basitleştirilerek $\sum_{i=1}^N \sum_f |h_i(f)|^2 P_i(f)$ şeklinde yazılabilir. Bu durumda problem

$$\begin{aligned} \mathbf{P}^* = & \arg \max_{\mathbf{P}} \sum_{i=1}^N \sum_f |h_i(f)|^2 P_i(f) \\ \text{s.t.} \quad & P_i(f) \geq 0, \quad \forall i, f \\ & \sum_f P_i(f) \leq P_{\max}, \quad \forall i \\ & \sum_{i=1}^N \sum_f |g_i(f)|^2 P_i(f) \leq Q, \end{aligned} \quad (5.16)$$

şeklini alacaktır. Ancak bu problemin de analitik çözümü kolay bir şekilde bulunamadığından dolayı bir rahatlatma daha yapılacaktır. Kullanıcı başına frekanslar üzerinden toplam bir güç kısıtı kullanmak yerine kullanıcılar ve frekanslar üzerinden ayrı güç kısıtları kullanılacaktır. Ancak, $P_{\max}$ değeri değiştirilmeyecektir böylece maliyet işlevinin eniyi değeri yine orijinal maliyet işlevinin üst sınırı olarak kalacaktır. Son olarak SISO çok-taşıyıcılı sistemde İKK'lerin veri hızı üst sınır hesabı problemi

$$\begin{aligned} \mathbf{P}^* = & \arg \max_{\mathbf{P}} \sum_{i=1}^N \sum_f |h_i(f)|^2 P_i(f) \\ \text{s.t.} \quad & P_i(f) \geq 0, \quad \forall i, f \\ & P_i(f) \leq P_{\max}, \quad \forall i, f \\ & \sum_{i=1}^N \sum_f |g_i(f)|^2 P_i(f) \leq Q, \end{aligned} \quad (5.17)$$

ile gösterilecektir. Problemin çözümünün birinci bölümde incelenilen SISO tek-taşıyıcılı senaryodaki gibi basit bir ikili güç tahsisi olduğu aşağıdaki gibi ispatlanabilir.

Teori 5.2 *Tek BKK, N İKK içeren çok-taşıyıcılı iki katmanlı bir hücresel sistemin, kullanıcı ve frekans başına azami güç kısıtları ve BKK'ye uygulanan toplam girişim kısıtı altında eniyi güç dağılımında üç farklı kullanıcı kümesi*

vardır. İlk kümenin (S_1) elemanları maksimum güçle ($P_{\max}$) çalışır, ikinci kümenin (S_2) elemanları kapalı durumdadır ve son kümenin (S_3) en fazla bir tane elemanı olabilir ve bu kullanıcı da tek frekans bandında ($0, P_{\max}$) arasında bir güçle çalışır. Tam güçle çalışan kullanıcıların kanal sinyal girişim oranı $\frac{|h_i(f)|^2}{|g_i(f)|^2}$, ara güçle çalışan kullanıcının kanal sinyal girişim oranından büyüktür ve kapalı kullanıcıların kanal sinyal girişim oranı bu kullanıcıdan küçüktür.

İspat 5.2

Probleme bakıldığında maliyet işlevinin ve tüm kısıtların doğrusal oldukları görülmektedir. Buradan yola çıkarak problemin çözümünü bulmak için problemin Lagrangian'ı hesaplanmalı ve Karush-Kuhn-Tucker (KKT) koşulları [30] incelenmelidir. Problemin Lagrangian'ı

$$L = - \sum_{i=1}^N \sum_f |h_i(f)|^2 P_i(f) + \sum_{i=1}^N \sum_f \mu_i(f) (P_i(f) - P_{\max}) - \sum_{i=1}^N \sum_f \alpha_i(f) P_i(f) + \lambda \left(\sum_{i=1}^N \sum_f |g_i(f)|^2 P_i(f) - Q \right),$$

ve KKT koşulları da

$$\left. \frac{\partial L}{\partial P_i(f)} \right|_{P_i(f)=P_i^*(f)} = |h_i(f)|^2 - \mu_i(f) + \alpha_i(f) - \lambda |g_i(f)|^2 = 0, \quad \forall i, \forall f, \quad (a)$$

$$\mu_i(f) (P_i(f) - P_{\max}) = 0, \quad \forall i, \forall f, \quad (b)$$

$$\alpha_i(f) P_i(f) = 0, \quad \forall i, \forall f, \quad (c)$$

$$\lambda \left(\sum_{i=1}^N \sum_f |g_i(f)|^2 P_i - Q \right) = 0, \quad (d)$$

şeklindedir. Burada $\alpha_i(f)$, $\mu_i(f)$ ve λ sırasıyla asgari güç kısıtı, azami güç kısıtı ve toplam girişim kısıtı ile ilgili Lagrange çarpanlarını göstermektedir ($\forall i, \forall f$). Girişim kısıtının Lagrange çarpanı λ 'nın alabileceği iki farklı değer üzerinden problem ele alınmalıdır.

1. $\lambda = 0$: Bu durumda (a) koşulu $|h_i(f)|^2 = \mu_i(f) - \alpha_i(f)$ şeklini alır. $|h_i(f)|^2$ 'in her kanal durumu için pozitif olduğu ve Lagrange çarpanlarının negatif olamayacağı bilindiğine göre

$$\mu_i(f) - \alpha_i(f) > 0 \implies \mu_i(f) > 0,$$

olacaktır. KKT koşullarına bakıldığında $\mu_i(f) > 0$ eşitsizliği gerçekleştiği durumlarda $P_i(f) - P_{\max} = 0, \forall i, \forall f$ olmak zorundadır. Öyleyse tüm kullanıcılar, tüm frekans bantlarında maksimum güçle çalışmaktadırlar.

2. $\lambda > 0$: Varsayalım ki bir k kullanıcısı vardır ve bu kullanıcı ω frekansında $0 < P_k^*(\omega) < P_{\max}$ gücüyle çalışmaktadır. Bu kullanıcının gücü 0 veya $P_{\max}$ olmadığı için (b) ve (c) koşullarına göre $\mu_k(\omega) = \alpha_k(\omega) = 0$ olduğu görülür. Bu eşitlikler de (a) koşulunu $\lambda = \frac{|h_k(\omega)|^2}{|g_k(\omega)|^2}$ haline getirir. $|h_k(\omega)|^2$ ve $|g_k(\omega)|^2$ sürekli olasılık dağılımlarından seçildiği için $\lambda = \frac{|h_k(\omega)|^2}{|g_k(\omega)|^2}$ eşitliğini sağlayan en fazla bir adet $(|h_k(\omega)|^2, |g_k(\omega)|^2)$ çifti vardır. Bu durumda 0 ile $P_{\max}$ güçleri arasında çalışan en fazla bir adet kullanıcı olabilir ve o kullanıcı da tek frekans bandında o ara güçle çalışmaktadır. Diğer kullanıcılar 0 veya $P_{\max}$ gücünde çalışmaktadırlar. Böylece tüm ikinci katman kullanıcıları içerisinde üç farklı kullanıcı kümesi oluşturulmuştur. S_1 kümesinde maksimum güçle çalışan kullanıcılar, S_2 kümesinde iletişime katılmayan kullanıcılar ve en fazla bir elemanı olan S_3 kümesinde de 0 ve $P_{\max}$ arasında güçle çalışan tek kullanıcı vardır. Şimdi bulunan λ , (a) koşulunda yerine yazılarak

$$|h_i(f)|^2 = \mu_i(f) + \lambda |g_i(f)|^2 = \mu_i(f) + \frac{|h_k(\omega)|^2}{|g_k(\omega)|^2} |g_i(f)|^2, \quad (5.18)$$

$$|g_i(f)|^2 = \frac{|g_k(\omega)|^2}{|h_k(\omega)|^2} (|h_i(f)|^2 - \mu_i(f)), \quad (5.19)$$

formülleri ile $|g_i(f)|^2$ bulunacaktır ve bulunan $|g_i(f)|^2$ terimi (d) koşulunda

yerine yazılarak eniyileme için gerekli koşullar

$$\sum_{i=1}^N \sum_f |g_i(f)|^2 P_i^*(f) = Q, \quad (5.20)$$

$$\sum_i^{S_1} \sum_f |g_i(f)|^2 P_i^*(f) + \sum_i^{S_2} \sum_f |g_i(f)|^2 P_i^*(f) + \sum_i^{S_3} \sum_f |g_i(f)|^2 P_i^*(f) = Q, \quad (5.21)$$

$$P_{\max} \sum_i^{S_1} \sum_f |g_i(f)|^2 + |g_k(\omega)|^2 P_k^*(\omega) = Q, \quad (5.22)$$

$$P_{\max} \sum_i^{S_1} \sum_f \frac{|g_k(\omega)|^2}{|h_k(\omega)|^2} \left(|h_i(f)|^2 - \mu_i(f) \right) + |g_k(\omega)|^2 P_k^*(\omega) = Q, \quad (5.23)$$

$$\underbrace{\sum_i^{S_1} \sum_f P_{\max} |h_i(f)|^2 + |h_k(\omega)|^2 P_k^*(\omega)}_{\text{Toplam Alınan Güç}} = \frac{|h_k(\omega)|^2}{|g_k(\omega)|^2} Q + P_{\max} \sum_i^{S_1} \sum_f \mu_i(f), \quad (5.24)$$

şeklinde elde edilecektir. Yukarıdaki (5.24) formülünde eşitliğin sol tarafına bakıldığında ikincil baz istasyonuna gelen toplam güç ifadesi görülmektedir. Eşitliğin sağ tarafında da sabit olmayan tek eleman $\mu_i(f)$ 'dir. Problemin amacı da alıcıya gelen toplam gücü enbüyütmek olduğu için yukarıdaki eşitliğin sağ tarafını enbüyütmek gerekmektedir, bu da $\mu_i(f)$ 'in pozitif olması gerektiği anlamına gelir. Bu durum da

$$|h_i(f)|^2 = \mu_i(f) + \lambda |g_i(f)|^2, \quad (5.25)$$

$$|h_i(f)|^2 - \frac{|h_k(\omega)|^2}{|g_k(\omega)|^2} |g_i(f)|^2 = \mu_i(f) > 0, \quad (5.26)$$

$$\frac{|h_i(f)|^2}{|g_i(f)|^2} > \frac{|h_k(\omega)|^2}{|g_k(\omega)|^2}, \quad S_1 \text{ kümesi için}, \quad (5.27)$$

eşitsizliğini ortaya çıkaracaktır. Bu sonuca göre bir k kullanıcısı vardır ve bu k kullanıcısı ω frekansında 0 ile $P_{\max}$ arasında bir güçle çalışmaktadır. $\frac{|h_i(f)|^2}{|g_i(f)|^2}$ oranı, bu k kullanıcısının $\frac{|h_k(\omega)|^2}{|g_k(\omega)|^2}$ oranından büyük olan kullanıcılar, kanalları iyi olan kullanıcılar olarak nitelendirilir ve maksimum güçle çalışırlar. $\frac{|h_i(f)|^2}{|g_i(f)|^2}$ oranı, bu k kullanıcısının $\frac{|h_k(\omega)|^2}{|g_k(\omega)|^2}$ oranından küçük olan kullanıcılar da, kanalları kötü olan kullanıcılar olarak nitelendirilir ve iletişime katılmazlar. Böylece Teori 5.2 ispatlanmış olur.

Teori 5.2’de açıklanan eniyi güç tahsisi basit bir algoritmayla hesaplanabilmektedir. Tüm İKK’lerin kanal sinyal girişim oranları ($\text{KSGO}, \frac{|h_i(f)|^2}{|g_i(f)|^2}$) büyükten küçüğe sıralanır ve en büyük KSGO’ya sahip kullanıcıdan başlanarak kullanıcılara sırayla tam güç verilir. Herhangi bir kullanıcıya bir frekans bandında tam güç verildikten sonra toplam girişim kısıtı aşıldığı takdirde o kullanıcının o frekans bandındaki gücü toplam girişim kısıtı eşitlikle sağlanıncaya kadar düşürülür. Bu işlem Algoritma 5.1’de gösterilmektedir.

Algoritma 5.1 SISO - Çok-Taşıyıcılı Senaryo - Veri Hızı Üst Sınırına Ulaşan Güç Dağılımı

Girdi: Direkt kanal katsayısı matrisi $\mathbf{H}(f) \in \mathbb{C}^{|F| \times N}$ ve girişim kanal katsayısı matrisi $\mathbf{G}(f) \in \mathbb{C}^{|F| \times N}$

Çıktı: Eniyi güç dağılımı matrisi $\mathbf{P}^*(\mathbf{H}, \mathbf{G}, f)$

İlk Değerler: İKK’ların kanal sinyal girişim oranlarını, $\frac{|h_i(f)|^2}{|g_i(f)|^2}, 1 \leq i \leq N,$

$f_1 \leq f \leq f_F$, büyükten küçüğe sırala: $\frac{|h_{\pi(1)}(f)|^2}{|g_{\pi(1)}(f)|^2} \geq \dots \geq \frac{|h_{\pi(NF)}(f)|^2}{|g_{\pi(NF)}(f)|^2}.$

$j \geq 2$ için eşitle $P_{\pi(1)}^*(\mathbf{H}, \mathbf{G}, f) = P_{\max}, P_{\pi(j)}^*(\mathbf{H}, \mathbf{G}, f) = 0, Q^{(0)} = 0, Q^{(1)} = |g_{\pi(1)}(f)|^2 P_{\max}$ ve $k = 1$.

while $Q^{(k)} \leq Q$ ve $k < N$

$k = k + 1$

$Q^{(k)} = Q^{(k-1)} + |g_{\pi(k)}(f)|^2 P_{\max}$

$P_{\pi(k)}^*(\mathbf{H}, \mathbf{G}, f) = P_{\max}$

end while

if $Q^{(k)} \leq Q$ **then**

$\mathbf{P}^*(\mathbf{H}, \mathbf{G}, f)$ tüm İKK’lar maksimum güçle çalışacak şekilde seçilir.

else

$$P_{\pi(k)}^*(\mathbf{H}, \mathbf{G}, f) = \frac{Q - Q^{(k-1)}}{|g_{\pi(k)}(f)|^2}$$

end if

Çıktı $\mathbf{P}^*(\mathbf{H}, \mathbf{G}, f)$

5.3.2 Alt Sınır

Uygun bir alt sınır seçiminde dikkat edilecek husus, kullanıcılara ve frekans bantlarına verilecek güçlerin (5.2)'daki problemin kısıtlarına uyması gerekliliğidir. İncelemeler sonucunda analitik olarak hesaplanabilen ve eniyi değere yakın bir alt sınır önerilmiştir.

İKK'lerin eniyi veri hızına alt sınır olacak veri hızı hesabı için önerilen güç dağılımında, kullanıcıların birden fazla frekans bandında çalışması yasaklanmıştır. Kullanıcıların hangi frekansta çalışacaklarına kanal sinyal girişim oranlarına (KSGO, $h_i(f)/g_i(f)$) bakılarak karar verilmektedir. İlgili frekans bandında en yüksek KSGO'ya sahip kullanıcı o frekans bandında yayın yapacaktır. Her kullanıcının hangi frekans bandında çalışacağına karar verildikten sonra güç dağılımı problemi

$$\begin{aligned} \mathbf{P}^* = \arg \max_{\mathbf{P}} \quad & R_{\text{toplaml}} = B \log_2 \left(1 + \frac{\sum_{i=1}^N |h_i(f_i)|^2 P_i(f_i)}{N_0 B} \right) \\ \text{s.t.} \quad & P_i(f_i) \geq 0, \quad \forall i \\ & P_i(f_i) \leq P_{\max}, \quad \forall i \\ & \sum_{i=1}^N |g_i(f_i)|^2 P_i(f_i) \leq Q, \end{aligned} \quad (5.28)$$

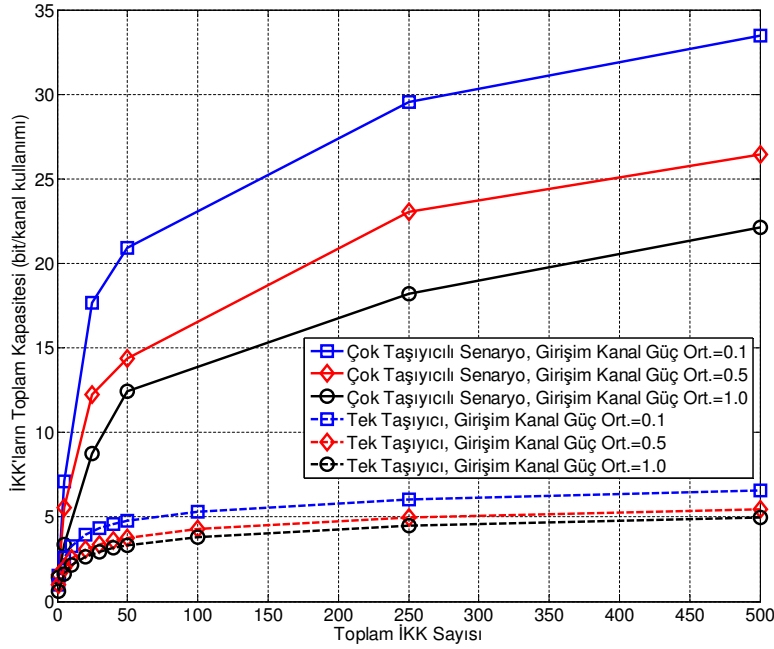
şeklinde olacaktır. Görüldüğü gibi problem formülasyonu birinci bölümde incelenen SISO tek-taşıyıcılı tek BKK'li problemle aynı formülasyona sahiptir. Bu durumda eniyi güç tahsisi de Teori 3.1'deki güç kontrolü yöntemi ile yapılmaktadır. Sonuçta elde edilen güç dağılımı orijinal çok-taşıyıcılı problemin olurlu kümesinin içindedir ve eniyi değere analitik olarak hesaplanabilen bir alt sınırdır.

5.4 Benzetim Çalışmaları

Bu bölümde, incelenen çok-taşıyıcılı senaryo için toplam veri hızı sonuçları belirtilmiştir. Veri hızının İKK sayısı, girişim kanal güç ortalamaları ve girişim

gücü eşik değeri gibi değişkenlere göre değişimi incelenmiştir. Benzetim çalışmaları hem girişim kanalları (İKK'ler ve BKK'ler arasında) hem de direkt kanallar (İKK'ler ve İKB arasında) Rayleigh sönümlmeli olarak seçilmiştir. Benzetimlerin Rayleigh sönümlemeden farklı kanal durumlarında gerçekleştirmesi basit bir şekilde yapılabilmektedir.

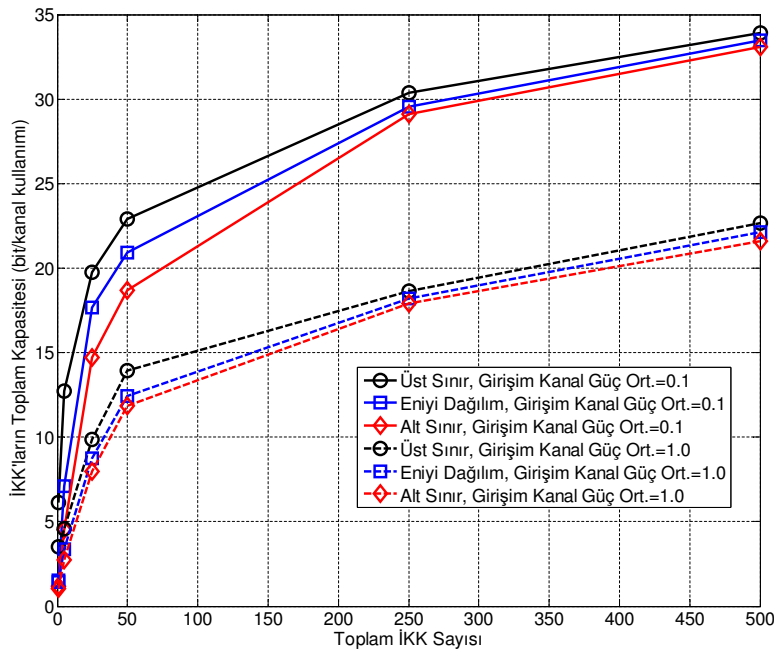
Tüm benzetim çalışmalarında bireysel maksimum güç kısıtı 1 W olarak seçilmiştir. Rayleigh sönümlmeli direkt kanal güç kazançlarının ortalaması tüm simülasyonlarda 1 olacak şekilde sabit tutulmuştur.



Şekil 5.2. Tek ve Çok-Taşıyıcı Senaryolar - SISO Kanallar - İKK Sayısına Karşılık Veri Hızı Değişimi

Şekil 5.2'de birinci katmanda 1 adet kullanıcı vardır, birbirine dik 10 tane frekans bandının kullanıcılar tarafından kullanılabildiği varsayılan sistemde İKK verici güçlerinin eniyi dağılım sonucu elde edilen toplam veri hızına karşılık İKK sayısı eğrisi verilmektedir. Girişim gücü eşik değeri 0.5 olarak sabitlenmiştir. Tek-taşıyıcı senaryo ile çok-taşıyıcı senaryo karşılaştırması yapılmıştır. Adil bir karşılaştırma yapılabilmesi adına çok-taşıyıcı senaryoda her İKK

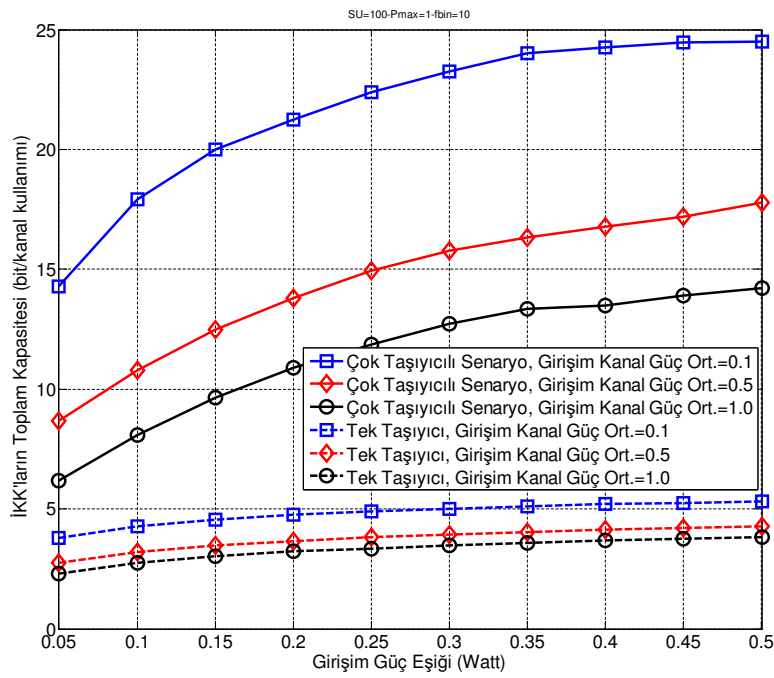
kullanabildiği frekans bantlarında toplam 1 W güç harcayabilmektedir ve tek-taşıyıcılı senaryoda her İKK aynı şekilde 1 W maksimum güçle çalışabilmektedir. Sayısal olarak hesaplanan çok-taşıyıcılı senaryo veri hızları, tek-taşıyıcılı senaryo veri hızlarından çok daha yüksektir. Birbirine dik birden çok-taşıyıcılı kullanılması, kullanıcıların daha iyi kanallar seçebilmesi fırsatını sağladığı için elde edilen bu sonuç mantıklıdır. Ayrıca, frekans-düz kanallarda olduğu gibi, girişim kanallarının ortalama değerinin artması BKK'deki girişimi arttırmakta ve veri hızı kaybına sebep olmaktadır.



Şekil 5.3. Çok-Taşıyıcılı Senaryo - Eniyi Dağılım ve Sınır Eğrileri - İKK Sayısına Karşılık Veri Hızı Değişimi

Yine toplam veri hızına karşılık İKK sayısının verildiği Şekil 5.3'te çok-taşıyıcılı senaryo için üst ve alt sınırların eniyi dağılım sonucu veri hızıyla karşılaştırması görülmektedir. Önceki benzetimde olduğu gibi birinci katmanda 1 adet kullanıcı vardır, birbirine dik 10 tane frekans bandının kullanıcılar tarafından kullanılabildiği varsayılmaktadır, girişim gücü eşik değeri 0.5 olarak sabitlenmiştir. Görüldüğü gibi sınır eğrileri eniyi sonuç eğrisine çok yakındır. Hatta

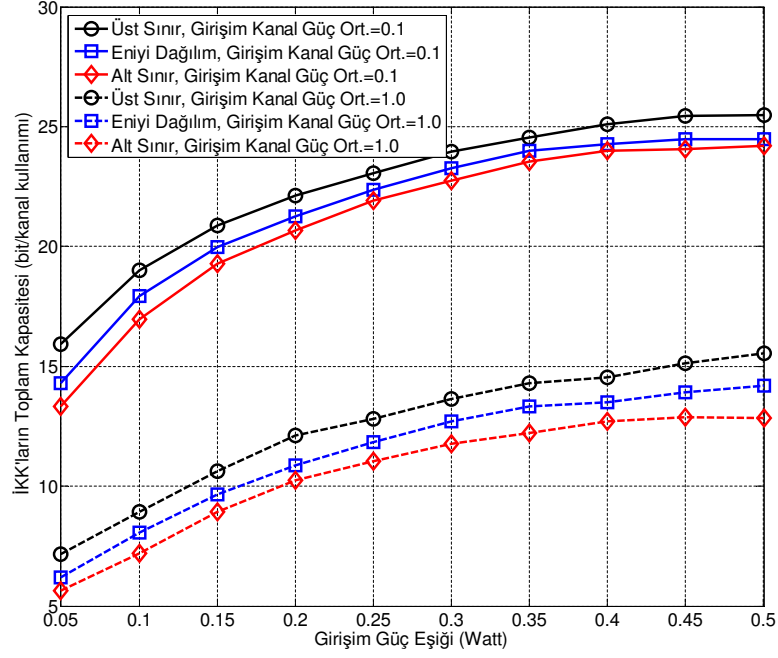
sayısal hesaplamaların yapılmasının istenmediği durumlarda üst sınır ve alt sınır veri hızlarının ortalaması eniyi dağılım veri hızına seçilebilecek çok iyi bir kestirim olabilecektir. Sayısal olarak hesaplanan eniyi sonuç ile analitik olarak hesaplanan üst ve alt sınırların verildiği grafikte, frekans-düz kanallarda olduğu gibi, girişim kanallarının ortalama değerinin artması BKK'deki girişimi arttırmaktadır. Ayrıca girişim kanallarının ortalama değeri arttıkça üst sınırın eniyi değere yaklaştığı görülmektedir. Aynı şekilde girişim kanallarının ortalama değeri arttıkça alt sınırın eniyi değere yaklaştığı görülmektedir.



Şekil 5.4. Tek ve Çok-Taşıyıcılı Senaryolar - SISO Kanallar - Girişim Eşik Değerine Karşılık Veri Hızı Değişimi

Şekil 5.4'te girişim güç eşik değerine karşılık toplam veri hızı çok-taşıyıcılı ve tek taşıyıcılı senaryolarda karşılaştırılmıştır. Birinci katmanda 1 adet kullanıcı, ikinci katmanda ise birbirine dik 10 adet frekans bandına erişebilen 100 adet kullanıcı vardır. Girişim güç eşik değeri arttıkça kullanıcılar daha fazla güçle çalışabildikleri için tüm senaryolarda veri hızının arttığı görülmektedir. Ancak çok-taşıyıcılı senaryolarda veri hızı artışı çok daha fazladır. Bu durum da yine kul-

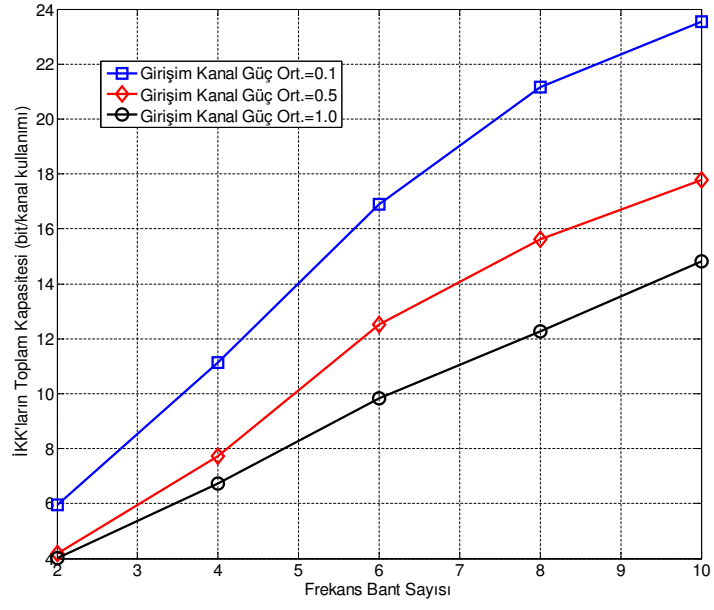
lanıcıların kanal seçeneğinin daha fazla olmasından ve kullanıcıların daha iyi kanalları seçmesinden kaynaklanmaktadır.



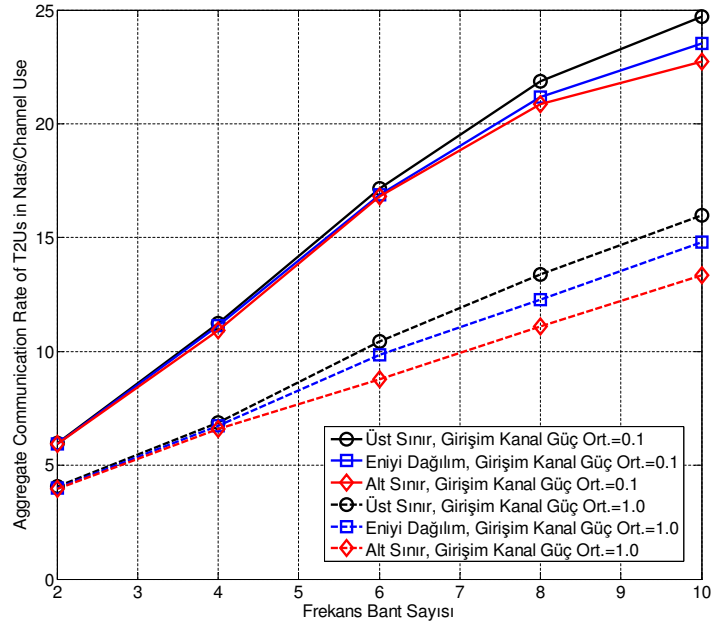
Şekil 5.5. Çok-Taşıyıcılı Senaryo - Eniyi Dağılım ve Sınır Eğrileri - Girişim Eşik Değerine Karşılık Veri Hızı Değişimi

Toplam veri hızına karşılık girişim gücü eşik değerinin verildiği Şekil 5.5'te çok-taşıyıcılı senaryo için üst ve alt veri hızı sınırlarının eniyi dağılım sonucu veri hızıyla karşılaştırması görülmektedir. Birinci katmanda 1 adet kullanıcı, ikinci katmanda ise birbirine dik 10 adet frekans bandına erişebilen 100 adet kullanıcı vardır. Önceki benzetimlerle aynı şekilde analitik olarak hesaplanan sınır değerleri eniyi sonuca oldukça yakındır.

Şekil 5.6'da birinci katmanda 1 adet kullanıcı, ikinci katmanda ise birbirine dik 10 adet frekans bandına erişebilen 100 adet kullanıcı vardır. Girişim gücü eşik değeri 0.5 olarak sabitlenmiştir. Toplam veri hızına karşılık birbirine dik frekans bant sayısının verildiği çalışmada bant sayısı arttıkça kullanıcıların toplam veri hızı sabit tutulmasına rağmen veri hızı artışı görülmektedir.



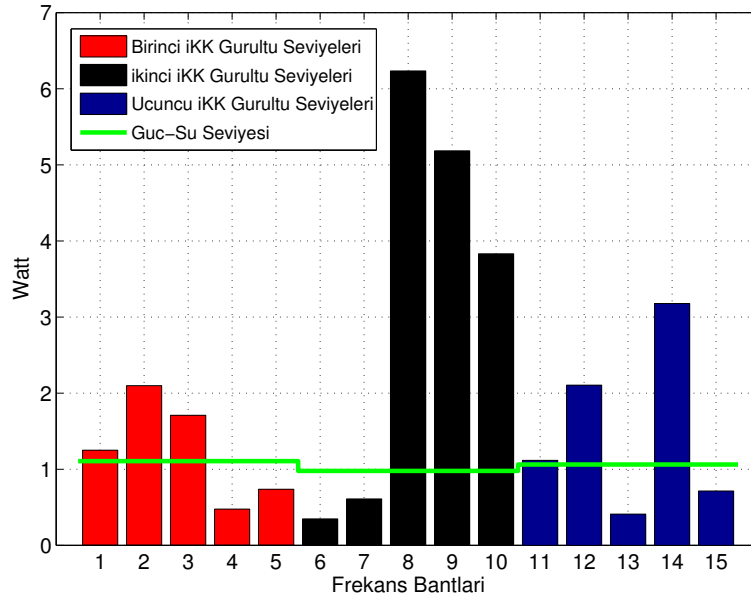
Şekil 5.6. Tek ve Çok-Taşıyıcılı Senaryolar - SISO Kanallar - Frekans Bant Sayısına Karşılık Veri Hızı Değişimi



Şekil 5.7. Çok-Taşıyıcılı Senaryo - Eniyi Dağılım ve Sınır Eğrileri - Girişim Eşik Değerine Karşılık Veri Hızı Değişimi

Toplam veri hızına karşılık frekans bant sayısının verildiği Şekil 5.7’de çok-taşıyıcılı senaryo için veri hızı üst ve alt sınırlarının eniyi dağılım sonucu veri hızıyla karşılaştırması görülmektedir. Birinci katmanda 1 adet kullanıcı, ikinci katmanda ise birbirine dik 10 adet frekans bandına erişebilen 100 adet kullanıcı vardır. Girişim gücü eşik değeri 0.5 olarak sabitlenmiştir. Frekans bant sayısı arttıkça sınırlar eniyi sonuçtan uzaklaşmaktadır.

Daha önce de belirtildiği gibi Teori 5.3’teki sonuç güç-doldurma ve girişim-doldurma çözümlerinin bir karışımıdır. Bu durumu inceleyebilmek için güç ve girişim kısıtlarının etkileri sırayla problemten kaldırılmıştır ve güç dağılımları birbirine dik 5 frekans bantlı 3 İKK’li bir senaryo için incelenmiştir. Şekillerde kırmızı, siyah ve mavi bloklar sırasıyla birinci, ikinci ve üçüncü kullanıcıların frekans bantlarındaki gürültü seviyelerini göstermektedir. Yeşil çizgiler de su seviyelerini vermektedir.

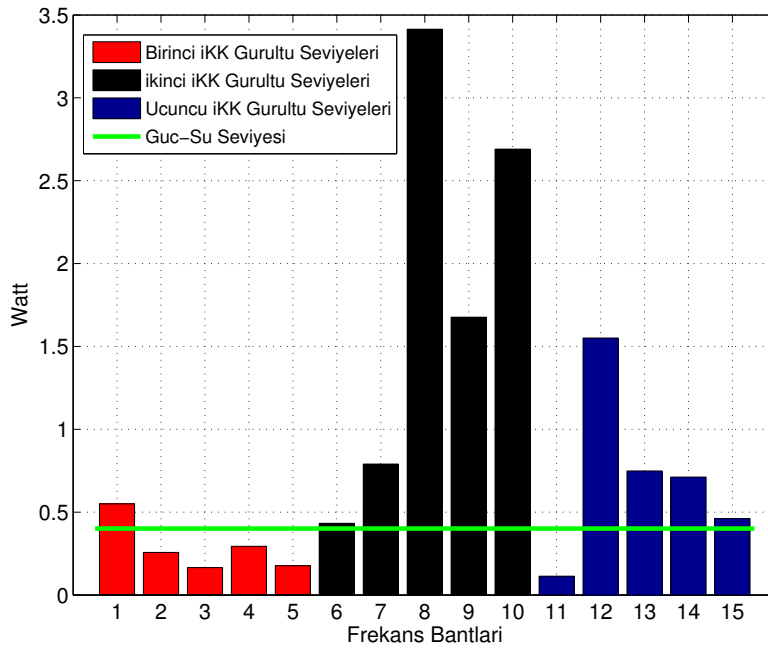


Şekil 5.8. Frekans-Seçici Senaryo - Güç-Su Doldurma Örneği

İlk olarak Şekil 5.8’deki çalışmada girişim kısıtı sonsuz limite arttırılarak etkisi ortadan kaldırılmıştır ve sadece güç kısıtları problemin olurlu kümesini şekil-

lendirmektedir. (5.9) denkleminde gürültü seviyeleri $\left(\frac{T_i(f)}{|h_i(f)|^2} \right)$ ve eniyi çözüm sonucu oluşan güç-su seviyesi $\left(\frac{1}{\mu_i \ln 2} \right)$ verilmektedir. Görüldüğü gibi her kullanıcı için bir güç-su seviyesi vardır ve bu seviyenin üzerinde kalan frekans bantlarında kullanıcılar güç alamazken altında kalan frekans bantlarında kullanıcılar $\frac{1}{\mu_i \ln 2} - \frac{T_i(f)}{|h_i(f)|^2}$ seviyesinde güç almaktadırlar.

İkinci olarak güç kısıtı sonsuz limite arttırılarak etkisi ortadan kaldırılmıştır ve sadece girişim kısıtları problemin olurlu kümesini şekillendirmektedir. (5.10) denkleminde gürültü seviyeleri $\left(\frac{T_i(f) |g_i(f)|^2}{|h_i(f)|^2} \right)$ ve eniyi çözüm sonucu oluşan güç-su seviyesi $\left(\frac{1}{\lambda \ln 2} \right)$ Şekil 5.9'da verilmektedir. Görüldüğü gibi tüm kullanıcılar için tek girişim-su seviyesi vardır ve bu seviyenin üzerinde kalan frekans bantları güç alamazken altındaki frekans bantları da $\frac{1}{\lambda \ln 2} - \frac{T_i(f) |g_i(f)|^2}{|h_i(f)|^2}$ seviyesinde güç almaktadırlar.



Şekil 5.9. Frekans-Seçici Senaryo - Girişim-Su Doldurma Örneği

6. İKİ KATMANLI AĞ YAPILARI - SISO TEK-TAŞIYICILI KANALLARDA GERİ BEŞLEME KISITLARI ALTINDA ENİYİ GÜÇ DAĞILIMI

İncelenen dördüncü problem, çok kullanıcı, tek-taşıyıcı, tek-girdili tek-çıkıtlı (SISO) kanallardaki *geri besleme kısıtları altında* veri hızı enbüyültme problemidir. Önceki kısımlardaki senaryolarda ikinci katman baz istasyonunun (İKB), İKK-İKB arasındaki kanalların ve İKK-BKK arasındaki kanalların durum bilgilerini (CSI) tam olarak bildiği varsayılmaktadır. Ancak girişim kanal bilgilerinin İKB’de tam olarak bilinmediği durumların da pratik sistemler için incelenmesi gerekmektedir. Amaç, ikinci katman kullanıcılarının (İKK) veri hızını, İKK’lerin azami ve asgari güç kısıtları, birinci katman kullanıcılarına (BKK) yapılan toplam girişim güç kısıtı ve çeşitli *geri besleme kısıtları* altında enbüyültmektir.

İki farklı geri besleme kısıtı incelenmiştir. İlk durumda BKK geri besleme kanalını kullanarak kısıtlı sayıda İKK’nin girişim kanal katsayılarını göndermektedir. İkinci durumda da BKK girişim kanal katsayılarını nicemlendirir [50] ve tüm İKK’lerin kanal katsayılarının hangi nicemeleme aralığında olduğunun bilgisini İKB’ye gönderir.

Geri besleme kanalının tüm ikinci katman kullanıcılarının kanal durum bilgilerini tam olarak iletme kapasitesi olmadığı durumlardaki performansın incelenmesi için iki farklı geri besleme senaryosu incelenmiştir. İlk senaryoda, probleme birinci katman baz istasyonunun geri besleme kanalından sadece K tane kullanıcının ($K \leq N$, N : ikinci katmandaki toplam kullanıcı sayısı) kanal durum bilgisinin ikinci katman baz istasyonuna iletebilmesi kısıtı eklenmiştir. Amacın ikinci katman kullanıcılarının veri hızını enbüyültmek olduğu problem incelendiğinde çözümün önceki çözümlerden farkı olmadığı görülmüştür sadece eniyileme işlemine katılacak kullanıcı sayısı N ’den K ’ya düşmüştür. Bu durum da performans düşüklüğüne yol açmıştır. Bu performans düşmesinin önüne nasıl geçilebileceği üzerine de çalışmalar yapılmıştır.

İkinci bir geri besleme senaryosu olarak, geri beslenecek olan girişim kanal

durum bilgilerinin önce nicemlenmesi ve sonrasında ikinci katman baz istasyonuna gönderilmesi düşünülmüştür. Bu sayede tüm kullanıcıların girişim kanal durum bilgileri gönderilmektedir, ancak, nicemleme hataları performans düşüklüğüne yol açacaktır. Bir önceki geri besleme senaryosunda olduğu gibi bu senaryoda da problem formülasyonu değişmediği için eniyi güç dağılımı çözümü önceki çözümlerle aynı şekilde bulunabilecektir. Nicemleme hatalarının neden olduğu performans düşüklüklerinin incelenmesi ve düşürülebilmesi adına değişik nicemleme yöntemleri çalışılmıştır.

Toplam girişim kısıtı incelendiği durumda BKK sayısının problem formülasyonunu değiştirmede önceki senaryolarda gösterilmiştir (bkz. Kısım 3.3 sayfa 54). Anlatım karmaşıklığının azalması açısından sonraki bölümlerde tek aktif birinci katman kullanıcısı olduğu varsayılacaktır.

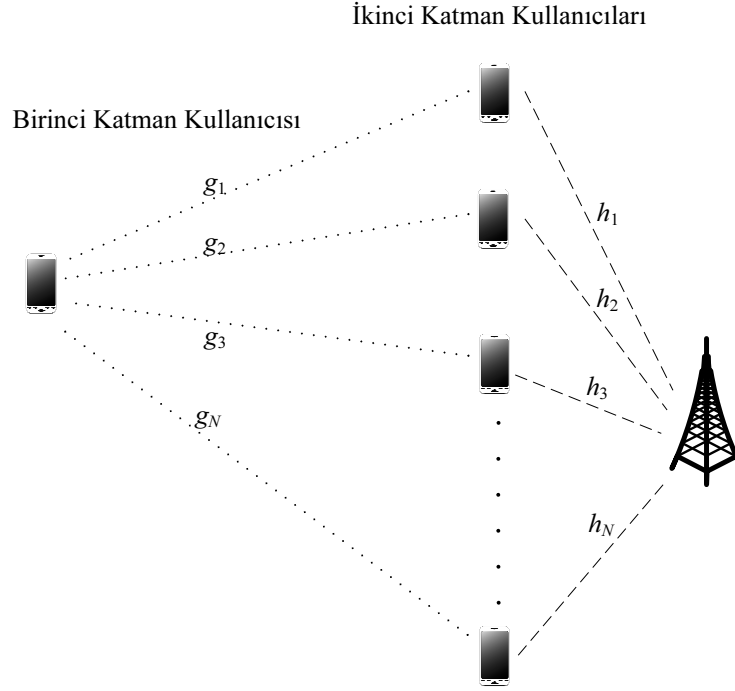
6.1 İlgili Çalışmalar ve Katkılar

Literatürde geri besleme kısıtlı sistemlerde kaynak tahsisi uygulayan çalışmalar mevcuttur [85–87, 129]. Ancak bu çalışmalarda da veri hızı eniyilenen kullanıcıların ortamdaki başka kullanıcılara uyguladığı girişim değeri kısıtlanmamıştır ve aynı ortamda farklı kullanıcıların iletişimi eniyilemeye dahil edilmemiştir. Diğer çalışmalar hakkında detaylı bilgi için literatür taraması kısmına bakınız.

6.2 Kısıtlı Sayıda İKK'nin Girişim Kanal Bilgisinin Tam Geri Beslemesi

Şekil 6.1'de, heterojen bir yapıya sahip iki katmanlı bir senaryo gösterilmektedir. İlk katman, R_c yarıçaplı bir servis alanını kapsayan merkezi bir ağ ve bu katmanın kullanıcılarından, ikinci katman da bu merkezi ağın içerisindeki R_f yarıçaplı servis alanına sahip bir ağ ve bu katmanın kullanıcılarından oluşmaktadır. Senaryoda, aynı kanal kaynaklarını kullanan bir adet BKK ve N adet İKK vardır. İKK'ler kendi baz istasyonlarıyla haberleşirken, BKK'lere girişimde bulunmaktadırlar. İkinci katman kullanıcıları baz istasyonları ile bir çoklu erişim kanalı oluşturmaktadır ve İKB'de sıralı girişim giderimi [65] yapılabilirdiği

varsayılarak çoklu erişim kanalında İKK'ler arası girişimin tamamen ortadan kaldırıldığı kabul edilmektedir. h_i ve g_i , sırasıyla, i . İKK ile İKB arasındaki direkt kanal katsayılarını ve i . İKK ile BKK arasındaki girişim kanal katsayılarını göstermektedir. Bu katsayılar sıfır ortalamaya ve birim varyansa sahip kompleks Gauss bağımsız dağılımlardan seçilmişlerdir.



Şekil 6.1. SISO Kanal Modeli

Şekil 6.1'de gösterildiği gibi, birinci katman kullanıcısı ile İKB arasında bir geri besleme kanalı vardır. Önceki senaryolarda bu geri besleme kanalının tüm İKK'lerin girişim kanal durumlarının tam geri beslemesine izin verdiği varsayılmaktadır. Bu bölümde, probleme geri besleme kısıtları konularak, BKK'nin geri besleme kanal ile K adet İKK'nin ($K \leq N$) girişim kanal katsayılarını İKB'ye iletebildiği varsayılmaktadır.

Tüm h_i kanal katsayılarının kanal durum bilgilerinin İKB'de bulunduğu varsayılan sistemde bireysel güç kısıtları, BKK'lere yapılan toplam girişim kısıtı ve

geribesleme kanal kısıtı altında İKK'lerin veri hızını enbüyültme problemi

$$\begin{aligned}
 \mathbf{p}^* = \arg \max_{\mathbf{p}} \quad & R_{\text{toplaml}} = \log_2 \left(1 + \frac{\sum_{i=1}^N |h_i|^2 P_i}{N_0} \right) \\
 \text{s.t.} \quad & P_i \geq 0, \quad \forall i \\
 & P_i \leq P_{\max}, \quad \forall i \\
 & \sum_{i=1}^N |g_i|^2 P_i \leq Q \\
 & P_i = 0, \quad i \in S_{\text{int}},
 \end{aligned} \tag{6.1}$$

şeklindedir. Burada P_i , i . İKK'nin verici gücünü, R_{toplaml} , İKK'lerin toplam veri hızını, N_0 İKB'deki gürültü gücünü, Q toplam girişim gücü eşik değerini ve $\mathbf{p}^* = [P_1^* \ P_2^* \ \dots \ P_N^*]$ eniyi güç dağılımı vektörünü göstermektedir. Problemdeki dördüncü kısıt **Geri Besleme Kısıtı** olarak adlandırılmaktadır ve sadece girişim kanalı geri beslemesi gerçekleştirilen kullanıcıların iletme katılabilmesine izin verileceğini garanti altına almak için kullanılır. S_{int} girişim kısıtı geri beslenemeyen kullanıcıların kümesini ve S kümesi de girişim kısıtı geri beslenen kullanıcıların kümesini göstermektedir. Geri besleme kısıtı problemin maliyet işlevi ve toplam girişim kısıtının içerisine yerleştirilerek problem formülasyonu

$$\begin{aligned}
 \mathbf{p}^* = \arg \max_{\mathbf{p}} \quad & R_{\text{toplaml}} = \log_2 \left(1 + \frac{\sum_{i \in S} |h_i|^2 P_i}{N_0} \right) \\
 \text{s.t.} \quad & P_i \geq 0, \quad \forall i \in S \\
 & P_i \leq P_{\max}, \quad \forall i \in S \\
 & \sum_{i \in S} |g_i|^2 P_i \leq Q,
 \end{aligned} \tag{6.2}$$

şeklinde tekrar yazılabilir.

Görüldüğü gibi (6.2)'deki problem formülasyonu birinci kısımda incelenen SISO tek-taşıyıcılı tek BKK'li problemle aynı formülasyona sahiptir. Sadece eniyileme algoritmasına girmesi gereken kullanıcı sayısı N 'den K 'ya çekilmiştir, yani, eniyileme işlemine sadece S kümesinin elemanları katılmıştır. Bunun haricinde problem çözümü birinci bölümde incelenen Teori 3.1'deki güç kontrolü yöntemi ile yapılmaktadır. Eniyi güç dağılımında üç farklı kullanıcı kümesi vardır. İlk kümenin (S_1) elemanları maksimum güçle ($P_{\max}$) çalışır, ikinci kümenin (S_2) elemanları kapalı durumdadır ve son kümenin de (S_3) en fazla bir tane elemanı olabilir ve bu kullanıcı $(0, P_{\max})$ arasında bir güçle çalışır.

Geri besleme kısıtı sebebiyle iletişime katılmayacak kullanıcıların seçimi için üç farklı yöntem önerilmektedir.

- Birinci yöntemde BKB en düşük K adet girişim kanal katsayısını ve bu kullanıcıların endekslerini İKB'ye göndermektedir. Bu yöntem en düşük g yöntemi denilmektedir.
- İkinci yöntemde İKB en yüksek direkt kanallara sahip K adet kullanıcının endekslerini BKB'ye göndermektedir ve BKB'de bu kullanıcıların girişim kanal katsayılarını İKB'ye geri beslemektedir. Bu yöntem en yüksek h yöntemi denilmektedir.
- Üçüncü yöntemde ise BKB en düşük $K/2$ adet girişim kanal katsayısını ve bu kullanıcıların endekslerini İKB'ye göndermektedir, ayrıca, İKB en yüksek direkt kanallara sahip $K/2$ adet kullanıcının endekslerini BKB'ye göndermektedir ve BKB'de bu kullanıcıların girişim kanal katsayılarını İKB'ye geri beslemektedir. Bu yöntem de ortak h - g yöntemi denilmektedir.

Probleme geri besleme kısıtı eklemek sistem performansını düşürecektir. Ancak kullanıcı sayısı arttıkça tüm kanal bilgilerinin İKB'ye iletilmesi pratiklikten uzaklaşacaktır. Yapılması gereken, performans düşüklüğü ile geri besleme

kanal kapasitesi arasında bir denge sağlamaktır. Bu sebeple S kümesinin eleman sayısının ve S kümesinin elemanlarının seçim yöntemlerinin performansa etkileri benzetim çalışmaları bölümünde detaylı olarak incelenmiştir.

6.3 Tüm İKK'lerin Nicemlendirilmiş Girişim Kanal Bilgilerinin Geri Beslemesi

Heterojen bir yapıya sahip senaryo bir önceki geri besleme senaryosu ile aynıdır ve Şekil 6.1'de gösterilmiştir. Ancak, bu sefer BKK girişim kanal güç kazançlarını nicemlendirmekte ve İKB'ye tüm İKK'lerin kanal kazançlarının hangi nicemleme aralığında olduğunun bilgisini geri beslemektedir. İKB de kendisindeki nicemleme tablosunu kullanarak tüm İKK'lerin nicemlenmiş kanal güç kazançları bilgisine ulaşabilmektedir.

Tüm h_i kanal katsayılarının tam kanal durum bilgilerinin ve tüm g_i kanal katsayılarının nicemlendirilmiş kanal durum bilgilerinin İKB'de bulunduğu varsayılan sistemde bireysel güç kısıtları ve BKK'lere yapılan toplam girişim kısıtı altında İKK'lerin veri hızını enbüyültme problemi

$$\begin{aligned} \mathbf{p}^* = \arg \max_{\mathbf{p}} \quad & R_{\text{toplaml}} = \log_2 \left(1 + \frac{\sum_{i=1}^N |h_i|^2 P_i}{N_0} \right) \\ \text{s.t.} \quad & P_i \geq 0, \quad \forall i \\ & P_i \leq P_{\max}, \quad \forall i \\ & \sum_{i=1}^N \hat{g}_i P_i \leq Q, \end{aligned} \quad (6.3)$$

şeklindedir. Burada P_i , i . İKK'nin verici gücünü, R_{toplaml} , İKK'lerin toplam veri hızını, N_0 İKB'deki gürültü gücünü, Q toplam girişim gücü eşik değeri kısıtını, $\mathbf{p}^* = [P_1^* \ P_2^* \ \dots \ P_N^*]$ eniyi güç dağılımı vektörünü ve $\hat{g}_i$ nicemlendirilmiş girişim kanal güç kazançlarını göstermektedir. Nicemlendirilmiş girişim kanal güç kazançları $\hat{g}_i = q(|g_i|^2, L)$ işlevi ile bulunmaktadır. Burada L nicemleme

düzeyi sayısını belirtmektedir.

Önceki geri besleme senaryosunda olduğu gibi bu senaryoda da problem çözümü birinci bölümde incelenen Teori 3.1'deki güç kontrolü yöntemi ile yapılabilmektedir. Eniyi güç dağılımında üç farklı kullanıcı kümesi vardır. İlk kümenin (S_1) elemanları maksimum güçle ($P_{\max}$) çalışır, ikinci kümenin (S_2) elemanları kapalı durumdadır ve son kümenin de (S_3) en fazla bir tane elemanı olabilir ve bu kullanıcı ($0, P_{\max}$) arasında bir güçle çalışır.

Nicemleme işlevi için iki farklı yöntem önerilmektedir.

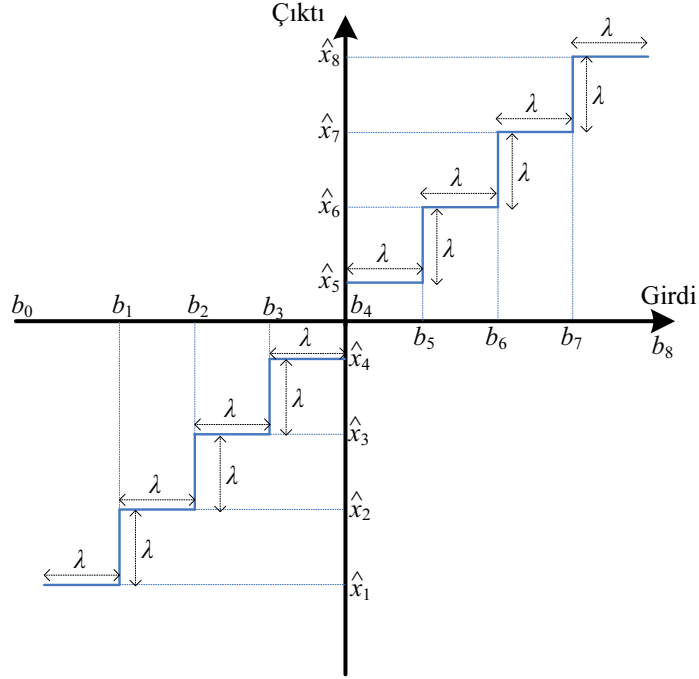
- Birinci yöntemde birbiçimli nicemleme ile girişim kanal güç kazançları nicemlendirilmektedir.
- İkinci yöntemde birbiçimli olmayan nicemleme ile girişim kanal güç kazançları nicemlendirilmektedir.

Girişim kanal güç kazançlarının orijinal değerlerinin yerine nicemlendirilmiş değerlerinin kullanılması veri hızı performansında düşüklüğe sebep olacaktır. Yapılması gereken performans düşüklüğü ile geri besleme kanal kapasitesi arasında bir denge sağlamaktır. Bu sebeple nicemleme işlevinin ($q(\cdot)$) ve nicemleme düzey sayısının farklı seçimlerinin performansa etkileri benzetim çalışmaları bölümünde detaylı olarak incelenmiştir.

6.3.1 Birbiçimli Nicemleme

Nicemleme teknikleri içerisinde en kolay uygulanan teknik birbiçimli nicemlemedir. Bu nicemleyicinin karar sınırları eşit aralıklıdır, bu yüzden karar aralıkları sabit ve aynı uzunluktadır ve nicemleme adımı ile temsil edilmektedirler. Şekil 6.2'de birbiçimli bir nicemleyici giriş-çıkış karakteristiği örneği gösterilmektedir.

Burada Δ nicemleme adımını, b_k karar aralıklarını $\hat{x}_k$ 'da nicemleme düzeylerini göstermektedir.



Şekil 6.2. Birbiçimli Nicemleyici Giriş-Çıkış Karakteristiği

Birbiçimli nicemleyici tasarlarken ilk olarak nicemleme adımı hesaplanır. Nicemleme düzey sayısı L , nicemleyici girdisi rasgele değişken X ise ve bu rasgele değişkenin en küçük ve en büyük değerleri sırasıyla $X_{\min}$ ve $X_{\max}$, ise nicemleme adımı

$$\Delta = \frac{X_{\max} - X_{\min}}{L}, \quad (6.4)$$

şeklinde hesaplanır. Karar sınırları nicemleme adımı kullanılarak

$$b_k = X_{\min} + \Delta \cdot k, \quad k = 0, 1, \dots, L. \quad (6.5)$$

formülü ile bulunur. Nicemleme düzeyleri nicemleme işlemi sonrasında oluşan çıktıdır, $q(x) = \hat{x}_k$, $b_{k-1} \leq x < b_k$, ve genel olarak

$$\hat{x}_k = X_{\min} + \Delta \cdot k - 0.5\Delta, \quad k = 1, \dots, L, \quad (6.6)$$

formülü ile hesaplanır. Görüldüğü gibi, yukarıdaki şekilde hesaplanan bir nicemleme çıktısı karar aralığının orta noktasıdır.

BKK'de yapılan birbiçimli nicemleme işleminin girdisi girişim kanalı güç kazançlarıdır. Çıktıları da $\hat{g}_i = q(|g_i|^2)$ işlemiyle bulunur. Ancak nicemleme düzeyleri (6.6) formülü ile hesaplandığında bazı durumlarda orijinal $|g_i|^2$ değerleri nicemlenmiş $\hat{g}_i$ değerlerinden daha büyük olabilmektedir. Bu da $P_i |g_i|^2 > P_i \hat{g}_i$ durumuna sebep olacağı için (6.3) probleminin çözümü girişim gücü eşik değerinin aşımına sebep olabilmektedir. Bu durumun önüne geçebilmek için nicemleme düzeylerinin

$$\hat{x}_k = X_{\min} + \Delta \cdot k, \quad k = 1, \dots, L, \quad (6.7)$$

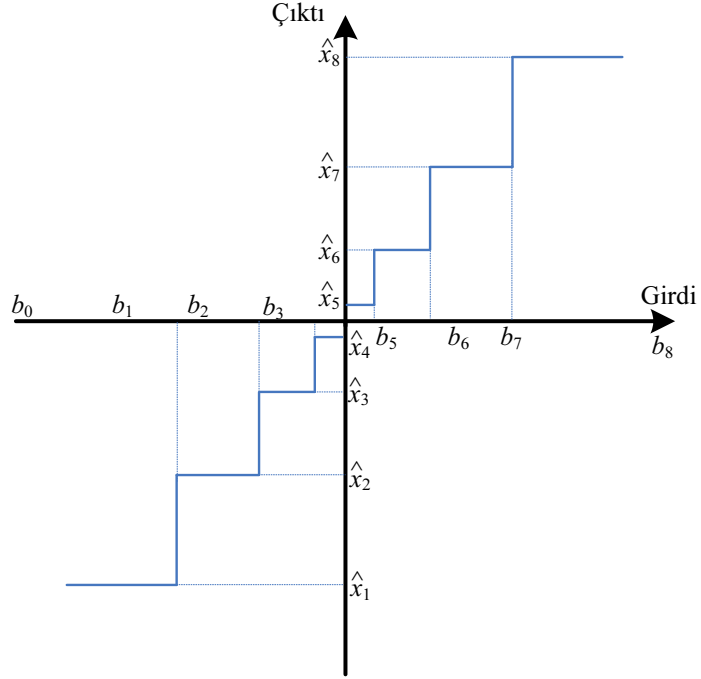
şeklinde seçilmesi önerilmiştir. Böylece her durumda $\hat{g}_i \geq |g_i|^2, \forall i$ olacağı için girişim gücü eşik değeri aşımı yaşanmayacaktır.

6.3.2 Birbiçimli Olmayan Nicemleme

Bu nicemleyicinin karar sınırları eşit aralıklı değildir ve dolayısıyla nicemleme adımları her nicemleme düzeyi için farklı değerler alabilmektedir. Şekil 6.3'te birbiçimli olmayan bir nicemleyici giriş-çıkış karakteristiği örneği gösterilmektedir.

Burada Δ_k k . düzey için nicemleme adımını, b_k karar aralıklarını $\hat{x}_k$ 'da nicemleme düzeylerini göstermektedir.

Birbiçimli nicemleyici tasarlarken nicemleyici girdisi rasgele değişken X 'in dağılımı göz önüne alınmalıdır. Bizim çalışmamızda girişim kanalları Rayleigh sönümlmeli kanallardan seçildiği için kanal güç kazançları üstel rasgele değişkenlerdir. Üstel dağılım incelendiğinde düşük değerli kanal güç kazancı sayısının yüksek değerliye göre daha fazla olduğu görülmektedir. Bu durumda düşük değerlerde daha fazla nicemleme düzeyi bulundurmak mantıklıdır. Bu da nicemleme adımlarının k arttıkça uzaması anlamına gelir. Bu sebeple, bu



Şekil 6.3. Birbiçimli Olmayan Nicemleyici Giriş-Çıkış Karakteristiği

çalışmada nicemleme adımlarının

$$\Delta_k = \Delta_0 \left(\sum_{l=k-1}^k l^a \right), \quad k = 1, \dots, L, \quad (6.8)$$

şeklinde seçilmesi önerilmiştir. Burada a kullanıcı tarafından ayarlanabilen üstel değişkendir ve Δ_0 da sabit bir ilk adım değeridir. Her nicemleme adımının değerine karar verildikten sonra karar sınırları

$$b_k = X_{\min} + \sum_{l=1}^k \Delta_l, \quad k = 0, 1, \dots, L, \quad (6.9)$$

eşitliğiyle seçilmektedir. Daha önce bahsedildiği gibi girişim gücü eşik değerinin aşılması için nicemleme işlemi sonrasında oluşan nicemleme düzeyleri karar sınırları kullanılarak

$$\hat{x}_k = b_k, \quad k = 1, \dots, L, \quad (6.10)$$

şeklinde hesaplanması önerilmiştir.

6.3.3 Eniyi Nicemleme - Lloyd-Max Algoritması

Nicemleme işlemi sonucunda nicemlenmiş çıktı orijinal değerlerden farklı olmaktadır. Nicemleme işlevinin farklı yöntemlerle seçilmesi nicemleme çıktısının orijinal veriye daha çok benzemesine veya orijinal veriden uzaklaşmasına sebep olabilmektedir. Uygun bir maliyet işlevi seçildiği takdirde karar aralıklarının ve nicemleme düzeylerinin seçilmesi bir eniyileme problemidir. Literatürde genel olarak kullanılan bir maliyet işlevi ortalama karesel nicemleme hatasıdır (MSQE).

Nicemleme işlemi sonrasındaki hata, nicemleme çıktısı ile orijinal veri arasındaki farktır ve

$$e(x) = Q(x) - x, \quad (6.11)$$

eşitliği ile bulunmaktadır. Ortalama karesel nicemleme hatası da

$$\begin{aligned} \sigma_q^2 &= \int_{-\infty}^{\infty} |e(x)|^2 p(x) dx \\ &= \int_{b_0}^{b_L} |e(x)|^2 p(x) dx \\ &= \sum_{k=1}^L \int_{b_{k-1}}^{b_k} (\hat{x}_k - x)^2 p(x) dx, \end{aligned} \quad (6.12)$$

formülüyle hesaplanır. Burada $p(x)$ orijinal girdi verisinin olasılık dağılım işlevini göstermektedir. Eniyi nicemleme için MSEQ değerini enküçültecek nicemleme düzeylerinin, $\hat{x}_k$, ve karar aralıklarının, b_k , bulunması için MSEQ'nun sırasıyla $\hat{x}_k$ ve b_k 'ya göre türevlerinin sıfıra eşitlenmesi gerekmektedir. İlk olarak

$\hat{x}_k$ 'ya göre türev alınıp sıfıra eşitlenirse

$$\left. \frac{\partial \sigma_q^2}{\partial \hat{x}_k} \right|_{\hat{x}_k = \hat{x}_k^*} = 2 \int_{b_{k-1}}^{b_k} (\hat{x}_k^* - x) p(x) dx = 0,$$

$$\hat{x}_k^* \int_{b_{k-1}}^{b_k} p(x) dx = \int_{b_{k-1}}^{b_k} x p(x) dx,$$

$$\hat{x}_k^* = \frac{\int_{b_{k-1}}^{b_k} x p(x) dx}{\int_{b_{k-1}}^{b_k} p(x) dx}, \quad (6.13)$$

elde edilir. (6.13) formülü incelenirse eniyi nicemleme düzeyinin ilgili karar aralığının olasılıksal orta noktası olduğu görülmektedir. Bundan dolayı bazı durumlarda, önceden tartışılan, $|g_i|^2 > \hat{g}_i \implies P_i |g_i|^2 > P_i \hat{g}_i$ durumu gerçekleşecektir ve nicemlenen kanal güç kazançlarıyla veri hızı eniyileme işlemi yapıldığında girişim gücü eşik değeri aşılabilecektir. Eniyi nicemlemenin yapılmasının istendiği durumlarda bu duruma katlanmak gerekecektir, yani, eniyi nicemleme ile girişim kısıtının aşılması arasında bir ödünleşim vardır.

Üstel rasgele değişkenler için $p(x) = \lambda e^{-\lambda x}$ olduğuna göre nicemleme düzeyleri

$$\begin{aligned} \hat{x}_k^* &= \frac{\int_{b_{k-1}}^{b_k} x \lambda e^{-\lambda x} dx}{\int_{b_{k-1}}^{b_k} \lambda e^{-\lambda x} dx} = \frac{[-x e^{-\lambda x} - \frac{1}{\lambda} e^{-\lambda x}]_{b_{k-1}}^{b_k}}{[-e^{-\lambda x}]_{b_{k-1}}^{b_k}} \\ &= \frac{-b_k e^{-\lambda b_k} - \frac{1}{\lambda} e^{-\lambda b_k} + b_{k-1} e^{-\lambda b_{k-1}} + \frac{1}{\lambda} e^{-\lambda b_{k-1}}}{-e^{-\lambda b_k} + e^{-\lambda b_{k-1}}}, \\ \hat{x}_k^* &= \frac{e^{-\lambda b_{k-1}} (b_{k-1} + \frac{1}{\lambda}) - e^{-\lambda b_k} (b_k + \frac{1}{\lambda})}{e^{-\lambda b_{k-1}} - e^{-\lambda b_k}} \end{aligned} \quad (6.14)$$

şeklinde hesaplanacaktır. İkinci olarak, MSEQ'nun b_k 'ya göre türevi alınıp sıfıra eşitlenirse

$$\left. \frac{\partial \sigma_q^2}{\partial b_k} \right|_{b_k=b_k^*} = (\hat{x}_k - b_k^*)^2 p(b_k^*) - (\hat{x}_{k+1} - b_k^*)^2 p(b_k^*) = 0,$$

$$(\hat{x}_k - b_k^*)^2 p(b_k^*) = (\hat{x}_{k+1} - b_k^*)^2 p(b_k^*),$$

$$b_k^* = \frac{1}{2} (\hat{x}_{k+1} + \hat{x}_k), \quad (6.15)$$

elde edilecektir. (6.15) formülü de karar aralık değerlerinin komşu nicemleme düzey değerlerinin ortalaması olduğunu göstermektedir.

Eşitlik (6.14) ve eşitlik (6.15)'den anlaşıldığı gibi eniyi nicemleme düzeyinin hesabı için eniyi karar aralıklarının bilinmesi ve eniyi karar aralıklarının hesabı için de eniyi nicemleme düzeylerinin bilinmesi gerekmektedir. Bu sebeple eniyi değerlerin hesabı için özyineli bir algoritma gerekmektedir. Lloyd-Max Algoritması [130] bu işlem için önerilen hızlı ve yakınsayan bir algoritmadır. Bu yöntem Algoritma 6.1'te verilmiştir.

Böylece ortalama karesel nicemleme hatasını enküçülten eniyi nicemleyici tasarımı tamamlanmıştır.

6.4 Benzetim Çalışmaları

Bu bölümde, incelenen geri besleme kısıtlı senaryo için toplam veri hızı sonuçları belirtilmiştir. Veri hızının İKK sayısı, girişim gücü eşik değeri ve farklı geri besleme senaryoları için değişimi incelenmiştir. Benzetim çalışmalarında hem girişim kanalları (İKK'ler ve BKK'ler arasında) hem de direkt kanallar (İKK'ler ve İKB arasında) Rayleigh sönümlmeli olarak seçilmiştir. Benzetimleri Rayleigh sönümlmeden farklı kanal durumlarında gerçekleştirmek basit bir şekilde yapılabilir.

Algoritma 6.1 Eniyi Nicemleme için Karar Aralıkları ve Nicemleme Düzeyleri Hesaplanması

Girdi: Nicemleme Düzeyi Sayısı L , girdi rasgele değişkenleri x ve girdi rasgele değişkenlerinin olasılık dağılım fonksiyonu $p(x)$.

Çıktı: Eniyi nicemleme için eniyi nicemleme düzeyleri $\hat{x}_k^*$, $k = 1 : L$, ve eniyi karar aralıkları b_k^* , $k = 0 : L$.

İlk Değerler: $b_0 = x_{\min}$, $b_L = x_{\max}$ ve $i = 0$.

Başla:

Gelişigüzel nicemleme düzeyleri seç $\hat{x}_k$, $k = 1 : L$.

while $|\sigma_q^2(i-1) - \sigma_q^2(i)| < 10^{-5}$

$i = i + 1$.

for $k = 1 : (L - 1)$

(6.15) formülü ile karar aralıklarını hesapla, b_k .

b_k 'ları kullanarak (6.13) formülü ile nicemleme düzeylerini güncelle, $\hat{x}_k$.

end for

(6.12) formülü ile MSEQ'nun bu adımdaki değerini hesapla $\sigma_q^2(i)$.

end while

Çıktı $\hat{x}_k^*$, $k = 1 : L$ ve b_k^* , $k = 0 : L$.

Tüm benzetim çalışmalarında bireysel maksimum güç kısıtı $1 W$ olarak seçilmiştir. Rayleigh sönümlmeli direkt kanal güç kazançlarının ortalaması tüm simülasyonlarda 1, girişim kanal güç ortalamaları da 0.3 olacak şekilde sabit tutulmuştur.

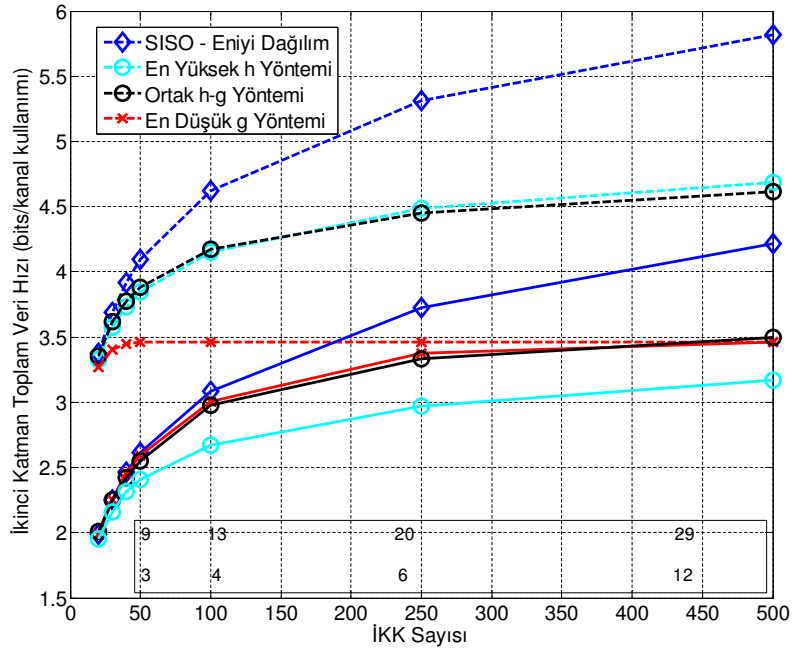
6.4.1 Kısıtlı Sayıda İKK'nin Girişim Kanal Bilgisinin Tam Geri Beslemesi

İlk olarak kısıtlı sayıda İKK'nin tam kanal durum bilgisinin geri beslemesinin yapılabilirdiği senaryoda benzetimler yapılmıştır. Kanal durum bilgileri geri beslenen kullanıcıların bulunduğu S kümesinin eleman sayılarının farklı değerleri için incelediğimiz sistemlerin performansları incelenmiştir.

Benzetimlerdeki değişkenler toplam İKK sayısı, toplam geri beslenen İKK sayısı ve toplam girişim güç kısıtıdır. Bu değişkenlerin farklı değerlerine göre İKK'lerin toplam veri hızları hesaplanmıştır.

Geri besleme kısıtı sebebiyle iletişime katılmayacak kullanıcıların seçimi için 3 farklı yöntem önerilmektedir.

- Birinci yöntemde BKB en düşük K adet girişim kanal katsayısını ve bu kullanıcıların endekslerini İKB'ye göndermektedir. Bu yöntem en düşük g yöntemi denilmektedir.
- İkinci yöntemde İKB en yüksek direkt kanallara sahip K adet kullanıcının endekslerini BKB'ye göndermektedir ve BKB'de bu kullanıcıların girişim kanal katsayılarını İKB'ye geri beslemektedir. Bu yöntem en yüksek h yöntemi denilmektedir.
- Üçüncü yöntemde ise BKB en düşük $K/2$ adet girişim kanal katsayısını ve bu kullanıcıların endekslerini İKB'ye göndermektedir, ayrıca, İKB en yüksek direkt kanallara sahip $K/2$ adet kullanıcının endekslerini BKB'ye göndermektedir ve BKB ise bu kullanıcıların girişim kanal katsayılarını İKB'ye geri beslemektedir. Bu yöntemde de ortak h - g yöntemi denilmektedir.

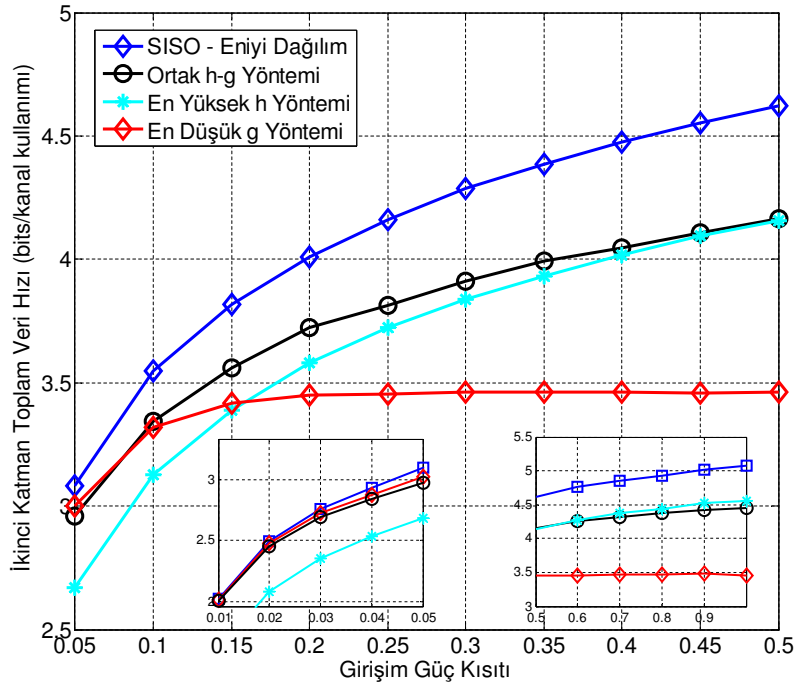


Şekil 6.4. Tek ve Çok-Taşıyıcılı Senaryolar - SISO Kanallar - İKK Sayısına Karşılık Veri Hızı Değişimi

Şekil 6.4'te, hem direkt hem de girişim kanalları Rayleigh sönümlmeli kanallardır. Geri besleme kısıtı sadece $K = 10$ kullanıcının kanal güç kazançlarının iletimine izin vermektedir. Toplam veri hızı farklı sayıda İKK'ler ve farklı girişim kısıtları için hesaplanmıştır. Kesikli eğriler girişim kısıtının $0.5W$ olduğu, kesikli olmayan eğriler girişim kısıtının $0.05W$ olduğu durumların eğrileridir. Altta kutucukta da geri besleme kısıtı olmadığı durumda çalışan İKK sayıları verilmiştir. Beklenildiği gibi, geri besleme kısıtı performans düşüklüğüne sebep olmuştur. Ve ikinci katman kullanıcı sayısı arttıkça her yöntem için toplam veri hızı artmaktadır. Bunun sebebi çok kullanıcı çeşitliliğidir çünkü ikinci katman kullanıcı sayısı arttıkça direkt kanal güç kazancı yüksek ve girişim kanal güç kazancı düşük kullanıcılar ortaya çıkmaktadır.

En düşük g yöntemi düşük girişim kısıtı için en yüksek h yönteminden daha iyi sonuçlar vermekte ve yüksek girişim kısıtı için de daha kötü sonuçlar vermektedir. Bunun sebebi direkt kanal güç kazancının büyüklüğü girişim kanal

güç kazancının düşüklüğünden daha önemli olan kullanıcıların etkisidir. Girişim gücü eşik değeri düşük olduğu durumda İKK'lerin girişim kanal güç değerlerinin düşük olması genel sistem performansı bakımından daha önemliyken, girişim gücü eşik değeri yükseltildiği durumlarda problemin girişim tarafından kısıtlanması azalacağı için veri hızını arttıracak olan direkt kanal güç kazançları önem kazanmaktadır. Ortak h-g yöntemi her iki durumda da iyi performans sergilemektedir.

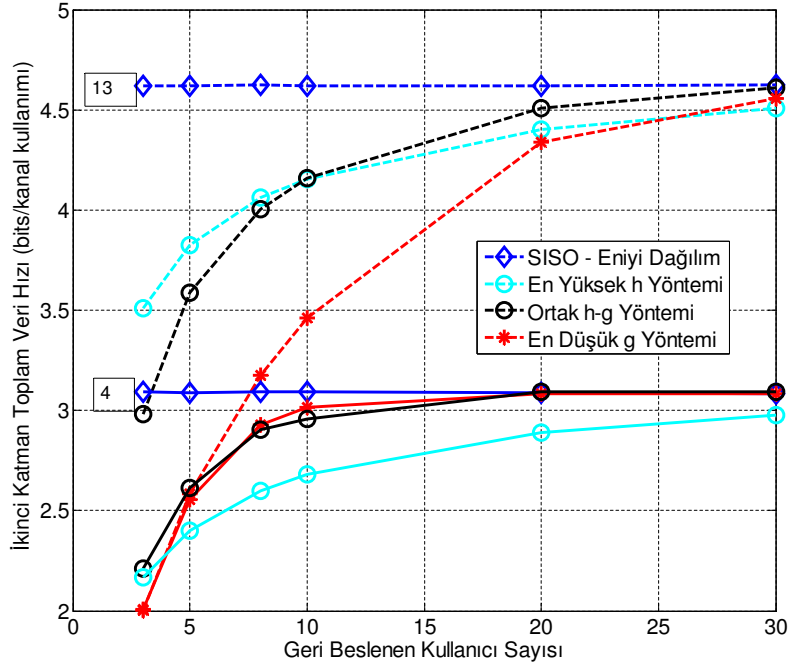


Şekil 6.5. Tek ve Çok-Taşıyıcılı Senaryolar - SISO Kanallar - Girişim Gücü Eşik Değerine Karşılık Veri Hızı Değişimi

Şekil 6.5'te, geri besleme kısıtı sadece $K = 10$ kullanıcının kanal güç kazançlarının iletimine izin vermektedir. İkinci katmanda toplam 100 kullanıcı bulunmaktadır. Toplam veri hızı farklı girişim kısıtları için hesaplanmıştır. Önceki gibi, geri besleme kısıtı performans düşüklüğüne sebep olmuştur.

Önceki benzetimde de görüldüğü gibi, en düşük g yöntemi düşük girişim kısıtı için en yüksek h yönteminden daha iyi sonuçlar vermekte ve yüksek girişim

kısıtı için de daha kötü sonuçlar vermektedir. Bunun sebebi de önceki benzetimdeki gibi direkt kanal güç kazancının büyüklüğü girişim kanal güç kazancının düşüklüğünden daha önemli olan kullanıcıların etkisidir. Ortak h-g yöntemi genel olarak yüksek performans sağlamaktadır. Sadece Küçük sekillerde gösterilen çok küçük Q ve çok yüksek Q durumlarında diğer yöntemlerin altında kalmaktadır.



Şekil 6.6. Tek ve Çok-Taşıyıcılı Senaryolar - SISO Kanallar - Geri Beslenen Kullanıcı Sayısına Karşılık Veri Hızı Değişimi

Şekil 6.6'da, toplam veri hızı farklı sayıda geribeslemesi yapılan İKK sayısı ve farklı girişim kısıtları için hesaplanmıştır. Ortamda 100 adet İKK olan sistemde, kesikli eğriler girişim kısıtının 0.5 olduğu, kesikli olmayan eğriler ise girişim kısıtının 0.05 olduğu durumların eğrileridir. Kutucuklarda da geribesleme kısıtı olmadığı eniyi durumda çalışan İKK sayıları verilmiştir. Daha önce olduğu gibi, geri besleme kısıtı performans düşüklüğüne sebep olmuştur.

Geri beslenen kullanıcı sayısı arttıkça her yöntem optimum senaryoya veri hızı performansı yönünden yaklaşmıştır ve belirli bir noktadan sonra aynı perfor-

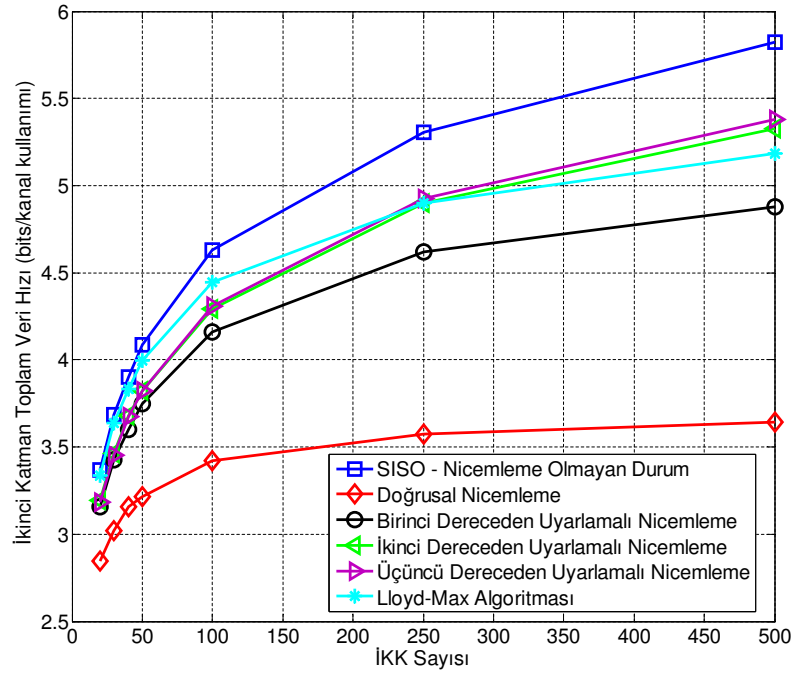
mansı göstermeye başlamışlardır. Bunun sebebi geri beslenen kullanıcı sayısı arttıkça bu kullanıcı kümesinin içerisinde optimum durumda çalışan kullanıcıların giriyor olmasıdır.

Yine en düşük g yöntemi düşük girişim kısıtı için en yüksek h yönteminden daha iyi sonuçlar vermekte ve yüksek girişim kısıtı için de daha kötü sonuçlar vermektedir. Bunun sebebi de önceki benzetimlerdeki gibi direkt kanal güç kazancının büyüklüğünün girişim kanal güç kazancının düşüklüğünden daha önemli olan kullanıcıların etkisidir. Ortak h-g yöntemi genel olarak yüksek performans sağlamaktadır.

6.4.2 Tüm İKK'lerin Nicemlendirilmiş Girişim Kanal Bilgilerinin Geri Beslemesi

İkinci olarak BKK'nin tüm İKK'lerin nicemlendirilme aralıklarının geri beslemesinin yapıldığı senaryoda benzetimler yapılmıştır. Benzetimlerdeki değişkenler toplam İKK sayısı, nicemleme düzey sayısı ve toplam girişim güç eşik değeri kısıtıdır. Bu değişkenlerin farklı değerlerine göre İKK'lerin toplam veri hızları hesaplanmıştır.

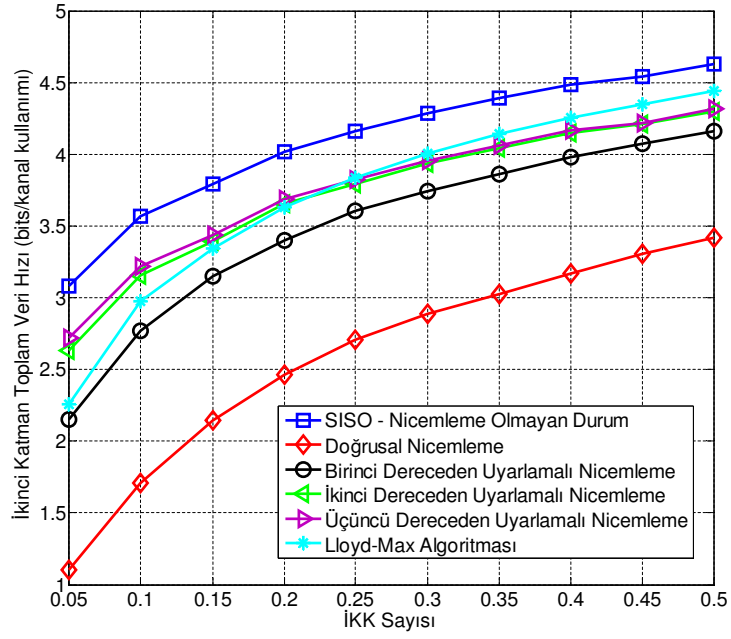
Şekil 6.7'de, hem direkt hem de girişim kanalları Rayleigh sönümlmeli kanallardır. Girişim gücü eşik değeri 0.5 olarak sabitlenmiştir. Nicemleme işlevi 3 bit ile yapılmaktadır, yani, 8 adet nicemleme seviyesi bulunmaktadır. Toplam veri hızı farklı sayıda İKK'ler ve farklı girişim kısıtları için hesaplanmıştır. Önceki geri besleme kısıtlı senaryoda olduğu gibi, probleme eklenen geri besleme kısıtı performans düşüklüğüne sebep olmuştur. İKB, nicemlendirilmiş kanal bilgilerini kullanmakta ve nicemlendirme sonucu oluşan bilgi kaybı performans düşüklüğüne sebep olmuştur. İkinci katmanda az sayıda kullanıcı bulunduğu durumlarda, nicemleme hatasının karesini enküçülten Lloyd-Max algoritması eniyi duruma en yakın performansı sergilemektedir. İKK sayısı arttıkça üçüncü dereceden uyarlamalı nicemleme daha iyi sonuçlar vermektedir. En kötü performans doğrusal nicemleme sonucu yaşanmaktadır. Bunun sebebi girişim



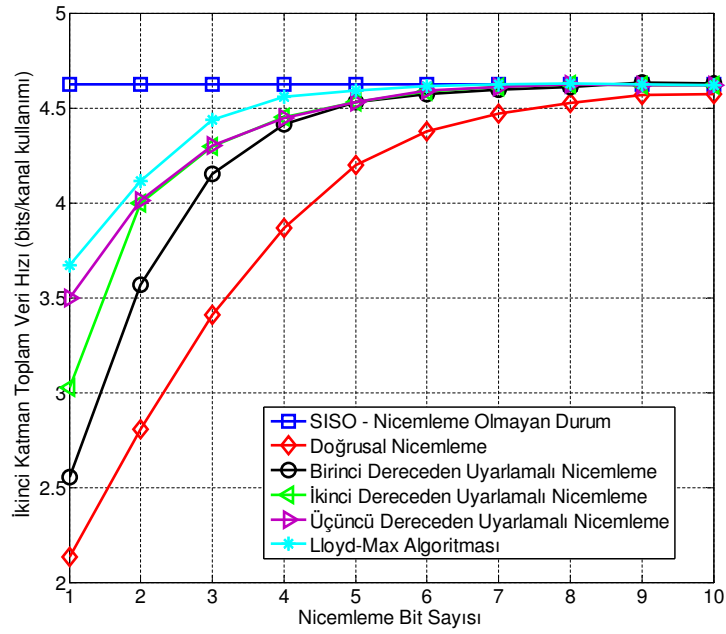
Şekil 6.7. Tam ve Kısıtlı Geri Beslemeli Senaryolar - İKK Sayısına Karşılık Veri Hızı Değişimi

kanal güç kazançlarının doğrusal bir dağılıma sahip olmamasıdır. Nicemleme aralıklarının dizilimi girişim güç kazançlarının dağılımına ne kadar yakınsa nicemleme sonucu o kadar iyi olacaktır.

Toplam veri hızının farklı girişim kısıtları için hesaplandığı Şekil 6.8’de İKK sayısı 100 olarak alınmıştır. Nicemleme işlevi 3 bit ile yapılmaktadır, yani, 8 adet nicemleme seviyesi bulunmaktadır. Bir önceki benzetimde olduğu gibi, probleme eklenen geri besleme kısıtı performans düşüklüğüne sebep olmuştur. Düşük girişim gücü eşik değerleri için en iyi performansı üçüncü dereceden uyarlamalı nicemleme senaryosu elde ederken yüksek girişim gücü eşik değerleri için Lloyd-Max algoritması öne çıkmaktadır. Daha basit bir nicemleme yapılması istendiği durumlarda doğrusal nicemleme tercih edilmektedir ancak bu durumda da en düşük veri hızları elde edilmektedir.



Şekil 6.8. Tam ve Kısıtlı Geri Beslemeli Senaryolar - Girişim Gücü Eşik Değere Karşılık Veri Hızı Değişimi



Şekil 6.9. Tam ve Kısıtlı Geri Beslemeli Senaryolar - Tıbbi besleme Bit Sayısına Karşılık Veri Hızı Değişimi

Şekil 6.9'da, hem direkt hem de girişim kanalları Rayleigh sönümlmeli kanallardır. Girişim gücü eşik değeri 0.5 olarak sabitlenmiştir. İkinci katmanda 100 adet kullanıcı bulunmaktadır. Toplam veri hızı farklı nicemleme bit sayıları için, farklı nicemleme yöntemleriyle hesaplanmıştır. Nicemleme bit sayısı arttıkça geribesleme kısıtlı senaryolar eniyi çözüme yaklaşmaktadır. İKB, nicemlendirilmiş kanal bilgilerini kullanmakta ve nicemlendirme sonucu oluşan bilgi kaybı performans düşüklüğüne sebep olmuştur. İkinci katmanda az sayıda kullanıcı bulunduğu durumlarda, nicemleme hatasının karesini enküçülten Lloyd-Max algoritması eniyi duruma en yakın performansı sergilemektedir. İKK sayısı arttıkça üçüncü dereceden uyarlamalı nicemleme daha iyi sonuçlar vermektedir. En kötü performans doğrusal nicemleme sonucu yaşanmaktadır. Bunun sebebi girişim kanal güç kazançlarının doğrusal bir dağılıma sahip olmamasıdır. Nicemleme aralıklarının dizilimi girişim güç kazançlarının dağılımına ne kadar yakınsa nicemleme sonucu o kadar iyi olacaktır.

7. SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, iki katmanlı bir senaryo incelenmiştir. İlk katman, R_c yarıçaplı bir servis alanını kapsayan merkezi bir ağ ve bu katmanın kullanıcılarından, ikinci katman da bu merkezi ağın içerisindeki R_f yarıçaplı servis alanına sahip bir ağ ve bu katmanın kullanıcılarından oluşmaktadır. Sistemdeki tüm kullanıcıların aynı kaynakları kullandığı varsayılan sistem hem heterojen ağ yapılarını hem de bilişsel ağ yapılarını kapsayan bir çerçeve niteliğindedir. İki katmanlı senaryodaki birinci katman heterojen ağlardaki makro-ağ yapısına ve ikinci katmanda femto-ağ yapılarına denk gelmektedir. Ayrıca bilişsel ağlardaki birincil kullanıcılar iki katmanlı senaryodaki birinci katman kullanıcılarıyla (BKK) ve ikincil kullanıcılar da ikinci katman kullanıcılarıyla (İKK) örtüşmektedir. Çalışmadaki amaç, İKK'lerin oluşturduğu çoklu erişim kanalı veri hızını enbüyülmektir. Ancak, geleneksel güç kısıtı gereksinimlerinin yanısıra, farklı iletişim ağlarının aynı ortamda belirli bir servis kalitesini (QoS) sağlayacak şekilde çalışabilmesini de temin etmek gerekmektedir.

İlgili gereksinimler ve kısıtlar kapsamında birbirinden farklı 4 senaryo incelenmiştir. İlk olarak, problem en basit haliyle ele alınarak çok kullanıcı, tek-taşıyıcılı, tek-girdili tek-çıkıtlı (SISO) kanallardaki veri hızı enbüyültme problemi incelenmiştir. İkinci olarak, ikinci katman kullanıcıları ve ikinci katman baz istasyonundaki anten sayıları artırılarak çok kullanıcı, tek-taşıyıcılı, tek-girdili çok-çıkıtlı (SIMO) ve çok-girdili çok-çıkıtlı (MIMO) kanallarda veri hızını enbüyültecek güç dağılımı bulunmaya çalışılmıştır. Sonrasında, anten sayıları tekrar tek antene düşürülmüştür ve birden çok birbirine dik frekans bantları kullanılarak çok-taşıyıcılı sistemlerin incelenmesi adına çok kullanıcı, çok-taşıyıcılı, SISO kanallardaki veri hızı enbüyültülmeye çalışılmıştır. Son olarak, tüm kanalların alıcılarda tam durum bilgilerinin bulunması varsayımı kaldırılarak geribesleme kısıtı altında çok kullanıcı, tek-taşıyıcılı, SISO kanallardaki veri hızı enbüyültme problemi incelenmiştir.

İncelenen ilk problem, çok kullanıcı, tek-taşıyıcılı, SISO kanallardaki veri hızı

enbüyültme problemidir. Temel amaç, ikinci katman kullanıcılarının veri hızını, İKK'lerin azami ve asgari güç kısıtları ve birinci katman kullanıcılarına yapılan toplam girişim güç kısıtı altında enbüyültmektir. Tek-taşıyıcılı, tek-girdili tek-çıkıtlı senaryoda birinci ve ikinci katmanlarda birden çok kullanıcı olduğu varsayılmaktadır. Amaç, İKK'lerin veri hızını, İKK'lerin azami ve asgari güç kısıtları ve BKK'lere yapılan toplam girişim güç kısıtı altında enbüyültmektir. Bu yapı için eniyi güç dağılımına analitik bir çözüm bulunmuştur. Eniyi güç dağılımında üç farklı ikinci katman kullanıcı kümesi vardır. İlk kümenin (S_1) elemanları maksimum güçle ($P_{\max}$) çalışır, ikinci kümenin (S_2) elemanları kapalı durumdadır ve en fazla bir tane elemanı olan üçüncü kümedeki (S_3) kullanıcı da $(0, P_{\max})$ aralığında bir güçle çalışır. Bu sonuca göre, bir k kullanıcısı vardır ve bu k kullanıcısı 0 ile $P_{\max}$ arasında bir güçle çalışmaktadır. Kanal sinyal girişim oranı bu kullanıcıdan büyük olan kullanıcılar tam güçle çalışırken kanal sinyal girişim oranı daha düşük olan kullanıcılar kapalı durumda kalırlar.

Özel bir durum olarak, birinci katmanda ilgili iletişim diliminde aynı anda *tek aktif BKK* olduğu durum incelenmiştir, literatürde sıklıkla kullanılan bu varsayım [122] herhangi bir iletişim aralığında en iyi kanala sahip kullanıcının iletişimine izin verilerek veri hızını arttırmak için kullanılır. Bir önceki durumdaki gibi eniyi güç dağılımı analitik olarak hesaplanabilmektedir ve yine sadece bir adet İKK $(0, P_{\max})$ aralığında bir güçle çalışırken diğer kullanıcılar ya tam güçle çalışacaktır ya da kapalı durumda kalacaktır.

İkinci bir özel durum olarak, birinci katmanda birden çok kullanıcı olduğu senaryoda, toplam girişim güç kısıtı yerine, BKK'lerin *bireysel girişim gücü eşik değerlerine* sahip oldukları varsayılmaktadır. Kullanıcıların farklı servis kalitesi gereksinimlerine sahip olduğu senaryolarda kullanılacak bu sistemde problem formülasyonunda girişim kısıtı sayısı 1'den fazla olacaktır (tam olarak BKK sayısı kadar olacaktır). Bu probleme bir analitik çözüm bulunamamıştır ancak yapısı gereği dışbükey eniyileme araçları kullanılarak evrensel eniyi güç dağılımı bulunabilmektedir. Bu sayısal çözümlemenin yanısıra, eniyi güç dağılımı-

nın analitik olarak bulunabilmesi için bizi sezgisel bir çözüm yoluna yönlendireceğine inandığımız teori elde edilmiştir. Bu teoriye göre, eniyi güç dağılımında üç farklı ikinci katman kullanıcı kümesi vardır. İlk kümenin (S_1) elemanları maksimum güçle ($P_{\max}$) çalışır, ikinci kümenin (S_2) elemanları kapalı durumdadır ve en fazla bireysel girişim kısıtı sayısı kadar elemanı olan üçüncü kümedeki (S_3) kullanıcılar da $(0, P_{\max})$ aralığında bir güçle çalışırlar. Bu senaryo için ayrıca toplam girişim senaryosu eniyi güç dağılımı çözümünde bulunan yöntemler kullanılarak analitik olarak hesaplanabilen çok yakın üst ve alt veri hızı sınırları hesaplanmıştır.

İncelenen ikinci problemde İKK'lerde ve İKB'de anten sayıları artırılarak çok kullanıcı, tek-taşıyıcı, SISO kanallardaki ve MIMO kanallardaki veri hızı enbüyütme problemi çözülmüştür. İncelenen ikinci problemde, amaç İKK'lerin veri hızını, BKK'lere uygulanan girişim kısıtı altında enbüyütmektir. Problem SISO kanallarda, alıcıda sıralı girişim giderme (SGG) yönteminin olduğu ve olmadığı (alıcıda sadece doğrusal filtre kullanılabilen) durumlarda incelenmiş ve çözülmüştür. Çözümün alıcıda SGG olduğu durumda *özyineli* bir girişimle düzenlenmiş su doldurma çözümü olduğu görülmüştür. Özyineli girişimle düzenlenmiş su doldurma çözümünün yakınsama analizi yapılmıştır ve algoritmanın olurlu çözüm kümesinden başladığı takdirde evrensel eniyi güç dağılımı noktasına yakınsadığı ispatlanmıştır. İKK'lerde de anten sayısı artırılarak problem MIMO kanallarda incelenmiş ve daha kapsamlı bir senaryo çalışılmıştır. Ancak, problem formülasyonu incelendiğinde, çözümün alıcıda SGG yapılabilen tek-girdili çok-çıkıtlı kanal eniyi çözüm ile aynı olduğu gösterilmiştir.

Alıcıda SGG olmadığı durumda problemin kolaylaştırılması ve ikinci katman baz istasyonundaki (İKB) girişimin tamamen ortadan kaldırılması için İKB'de doğrusal bir alıcı filtresi kullanılarak kanallar paralel kanallara ayrılmıştır. Bu paralel kanallar üzerinden veri hızı enbüyütme problemi yenilenmiştir. Bu yeni problem formülasyonu incelendiğinde modifiye edilmiş bir su doldurma problemi olduğu ortaya çıkmıştır ve su doldurma problemi çözümüyle eniyileme

yapılarak güç tahsisi sağlanmıştır. SGG olan senaryoda olduğu gibi İKK'lerde de anten sayısı artırılarak problem MIMO kanallarda incelenmiştir. Aynı şekilde, MIMO problem formülasyonu incelendiğinde, çözümün SGG olmayan tek-girdili çok-çıkıtlı kanal ile benzer şekilde çözülebileceği gösterilmiştir. Sonuçlarda beklenildiği gibi anten sayısını arttırmanın sistem performansını arttırdığı görülmektedir.

Alıcıda SGG olduğu durumda kullanıcılar üzerinde herhangi bir varsayıma gerek kalmazken, SGG olmadığı durumda önemli bir varsayım yapılmaktadır. SGG olmadığı durumda, alıcıdaki filtrenin girişimi tamamen ortadan kaldırabilmesi için alıcıdaki anten sayısının femto-ağdaki toplam kullanıcıların toplam anten sayısına eşit veya fazla olması gereklidir. Bu durumda alıcıya tüm kullanıcıları destekleyecek sayıda anten konulmalıdır. Literatürde çok sayıda anten kullanılması büyükölçek SISO/MIMO olarak adlandırılmaktadır ve önerdiğimiz çözüme uygulanabilmesi beklenmektedir.

Üçüncü incelenen senaryoda çok kullanıcı, *çok-taşıyıcılı*, SISO kanallardaki veri hızı enbüyültme problemi çalışılmıştır. Ayrıca, eniyi çözüme yakın üst ve alt sınırlar hesaplanmıştır. Çok-taşıyıcılı senaryoda kullanıcılar dar ve birbirlerine dik frekans bantlarında çalışmaktadırlar, öyle ki bu frekans bantları kendi içlerinde frekans-düz davranmaktadırlar ve ikinci katmanda kullanıcılar arası frekans bantlarında girişim olmamaktadır. Yine, ikinci katmandaki kullanıcıların veri hızını, birinci katman kullanıcılarına uygulanan girişim kısıtı altında enbüyültecek bir problem oluşturulmuştur. Bu problemin sayısal olarak eniyi güç dağılımı eniyileme araçları kullanılarak hesaplanmıştır. Eniyi güç dağılımı incelendiğinde, çözümün özyineli su doldurma ve özyineli girişimle düzenlenmiş su doldurma çözümlerinin bir karışımı olduğu görülmektedir. Sonrasında, analitik sonuçlar bulmak adına, eniyi çözüme yakın üst ve alt sınırlar hesaplanmıştır.

İncelenen tüm senaryolarda İKB'nin, İKK-İKB arasındaki kanalların (direkt kanallar olarak adlandırılacaktır) ve İKK-BKK arasındaki kanalların (girişim kanalları olarak adlandırılacaktır) durum bilgilerini (CSI) tam olarak bildiği varsayı-

maktadır. Ancak girişim kanal bilgilerinin İKB’de tam olarak bilinmesi, İKK kullanıcı sayısı arttıkça, geri besleme kanal kısıtları sebebiyle pratikliğini kaybetmektedir. Bu durumun önüne geçilebilmesi için, son olarak, çok kullanıcı, tek taşıyıcı, SISO kanallardaki *geri besleme kısıtları altında* veri hızı enbüyültme problemi incelenmiştir. Amaç, İKK’ların veri hızını, İKK’lerin azami ve asgari güç kısıtları, BKK’lara yapılan toplam girişim güç kısıtı ve çeşitli *geri besleme kısıtları* altında enbüyültmektir.

İki farklı geri besleme kısıtı incelenmiştir. İlk durumda BKK, geri besleme kanalını kullanarak kısıtlı sayıda İKK’nin girişim kanal katsayılarını göndermektedir. İKB geri besleme kanalından girişim kanal katsayılarını aldığı kullanıcılar üzerinden güç dağılımını gerçekleştirmektedir. Bu senaryoda BKK’nin hangi kullanıcıların girişim kanal katsayılarını göndereceği veri hızı performansını değiştirecektir. İlk senaryoda, probleme birinci katman baz istasyonunun geri besleme kanalından sadece K tane kullanıcının ($K \leq N$, N : ikinci katmandaki toplam kullanıcı sayısı) kanal durum bilgisinin ikinci katman baz istasyonuna iletebilmesi kısıtı eklenmiştir. Amacın ikinci katman kullanıcılarının veri hızını enbüyültmek olduğu problem incelendiğinde çözümün önceki çözümlerden farkı olmadığı görülmüştür sadece eniyileme işlemine katılacak kullanıcı sayısı N ’den K ’ya düşmüştür. Bu durum da performans düşüklüğüne yol açmıştır.

İkinci durumda da BKK girişim kanal katsayılarını nicemlendirir ve tüm İKK’lerin kanal katsayılarının hangi nicemleme aralığında olduğunu bilgisini İKB’ye gönderir. İKB de kendisindeki nicemleme tablosunu kullanarak tüm İKK’lerin nicemlenmiş kanal güç kazançlarını elde etmiş olur. Bu senaryoda da nicemleme hataları performans düşüklüğüne yol açacaktır. Nicemleme metodu ve nicemlemede kullanılacak bit sayısı veri hızı performansını değiştirecektir. Bir önceki geri besleme senaryosunda olduğu gibi bu senaryoda da problem formülasyonu değişmediği için eniyi güç dağılımı çözümü önceki çözümlerle aynı şekilde bulunabilecektir. Nicemleme hatalarının neden olduğu performans düşüklüğüne

lüklerinin incelenmesi ve düşürülebilmesi adına değişik nicemleme yöntemleri çalışılmıştır.

Önerilen tez, hem heterojen ağ yapılarını hem de bilişsel ağ yapılarını kapsayan genel bir çerçeveye niteliğindedir ve birçok farklı senaryo incelenerek literatüre katkıda bulunulmuştur. Tez çalışmasının devamı olarak incelenebileceği düşünülen konular aşağıda sıralanmıştır.

- Üçüncü, beşinci ve altıncı kısımlarda incelenilen SISO kanal senaryolarında, ikinci katmanda sıralı girişim giderimi gerçekleştiremeyen bir alıcı kullanıldığı durumda eniyi güç dağılımının nasıl bir yapıda olduğu bilinmemektedir ve açık bir konu olarak düşünülmektedir.
- Ayrıca, incelenilen tüm senaryolarla ilgili olarak, İKB’de eksik sıralı girişim giderimi gerçekleştirildiği bir durumda sistem performansının ne kadar etkileneceğinin araştırılmasının da ilginç bir çalışma olması beklenmektedir.
- Bu tez çalışmasında iki katmanlı bir senaryo incelenmiştir. Ancak, gelecek nesil sistemlerde aynı ortamda ikiden fazla katman bulunabileceği düşünülmektedir. Aynı ortamda bulunan başka katmanlardan, incelediğimiz ikinci katman baz istasyonuna gelebilecek olan girişim bu tezde gübrültü olarak kabul edilmiştir. Gelecek çalışmalarda komşu katmanlardan gelebilecek olan girişim de göz önüne alınarak yeni güç tahsisi çözümleri elde edilmesi ilgili tezin geliştirilebileceği alanlar arasında görülmektedir.
- Dördüncü kısımda incelenilen SIMO/MIMO kanal senaryolarında, alıcıda sıralı girişim giderimi yapılamadığı durumda önerilen doğrusal alıcı filtresi yapısal kısıtlara sahiptir. Bu alıcıdaki anten sayısının ikinci katmandaki kullanıcıların toplam anten sayısından fazla olması gerekmektedir. Farklı bir alıcı yapısı kullanılarak ilgili yapısal kısıtın ortadan kaldırılması ve eniyi çözümün analitik olarak hesaplanması gerçekleştirilebilecek çalışmalar arasında yer almaktadır.

- Çok-taşıyıcı senaryo için veri hızını enbüyöltecek eniyi güç dağılımı sonucu, nümerik olarak, eniyileme araçları kullanılarak bulunmuştur. Problem maliyet işlevinde basitleştirmeler yapılarak kapalı formda çözülebilen ve analitik olarak hesaplanabilen üst ve alt sınırlar bulunmuştur. Maliyet işlevinde basitleştirme yapılmadan orijinal problemin analitik çözümü açık bir problemdir ve gelecekte çalışılabilecek bir konudur.

Önceden bahsedildiği gibi ilgili tez çalışması birçok farklı senaryoyu içermekte ve böylece literatüre katkıda bulunmaktadır. Ayrıca, gelecekte gerçekleştirilebilecek birçok çalışmaya da temel teşkil etmekte ve yeni araştırma konularının ortaya çıkmasını sağlamaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] Cisco, Visual Networking Index, Global mobile data traffic forecast update 2014–2019, *Cisco Public Information*, **2015**.
- [2] Spencer, Q. H., Haardt, M., diğerleri, The cellular concept, *Bell System Technical Journal*, **1979**.
- [3] Goldsmith, A., *Wireless Communications*, Cambridge University Press, **2005**.
- [4] Tse, D. N. C., Viswanath, P., *Fundamentals of Wireless Communications*, Cambridge University Press, New York, NY, USA, **2005**.
- [5] Schiller, J. H., *Mobile Communications*, Pearson Education, **2003**.
- [6] Han, Z., Liu, K. J. R., *Resource Allocation for Wireless Networks: Basics, Techniques, and Applications*, Cambridge University Press, **2008**.
- [7] Lawrey, E., Multiuser OFDM, in *International Symposium on Signal Processing and Its Applications*, 99, 761–764, **1999**.
- [8] Wong, C. Y., Cheng, R. S., Lataief, K. B., Murch, R. D., Multiuser OFDM with adaptive subcarrier, bit, and power allocation, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 17, 10, 1747–1758, **1999**.
- [9] Rhee, W., Cioffi, J. M., Increase in capacity of multiuser OFDM system using dynamic subchannel allocation, in *IEEE Vehicular Technology Conference*, 2, 1085–1089, **2000**.
- [10] Jang, J., Lee, K. B., Transmit power adaptation for multiuser OFDM systems, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 21, 2, 171–178, **2003**.
- [11] HostMadsen, A., Zhang, J., Capacity bounds and power allocation for wireless relay channel, *IEEE Transactions on Information Theory*, 25, 572–584, Sept., **1979**.
- [12] Caire, G., Taricco, G., Biglieri, E., Optimum power control over fading channels, *IEEE Transactions on Information Theory*, 45, 1468–1489, July, **1999**.
- [13] Li, L., Jindal, N., Goldsmith, A., Outage capacities and optimal power allocation for fading multiple-access channels, *IEEE Transactions on Information Theory*, 51, 1326–1347, Apr., **2005**.
- [14] Gunduz, D., Erkip, E., Opportunistic cooperation by dynamic resource allocation, *IEEE Transactions on Communications*, 6, 1446–1454, Apr., **2007**.

- [15] Kandukuri, S., Boyd, S., Optimal power control in interference-limited fading wireless channels with outage-probability specifications, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 1, 1, 46–55, **2002**.
- [16] Lin, Y. P., Phoong, S. M., BER minimized OFDM systems with channel independent precoders, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 51, 9, 2369–2380, **2003**.
- [17] Lee, K. D., Leung, V., Fair allocation of subcarrier and power in an OFDMA wireless mesh network, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 24, 11, 2051–2060, **2006**.
- [18] Han, Z., Ji, Z. J., Liu, K. J., Fair multiuser channel allocation for OFDMA networks using Nash bargaining solutions and coalitions, *IEEE Transactions on Communications*, 53, 8, 1366–1376, **2005**.
- [19] Haykin, S., Cognitive radio: brain-empowered wireless communications, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 23, 2, 201–220, **2005**.
- [20] Ghasemi, A., Sousa, E. S., Fundamental limits of spectrum-sharing in fading environments, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 6, 2, 649–658, Feb., **2007**.
- [21] Nekouei, E., Inaltekin, H., Dey, S., Throughput scaling in cognitive multiple access with average power and interference constraints, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 60, 2, 927–946, **2012**.
- [22] Shannon, C. E., A mathematical theory of communication, *Bell System Technical Journal*, 379–423, 623–656, **1948**.
- [23] Telatar, I. E., diğerleri, Capacity of multi-antenna gaussian channels, *European Transactions on Telecommunications*, 10, 6, 585–595, **1999**.
- [24] Cover, T. M., Thomas, J. A., *Elements of Information Theory*, John Wiley & Sons, **2012**.
- [25] Damnjanovic, A., Montojo, J., Wei, Y., Ji, T., Luo, T., Vajapeyam, M., Yoo, T., Song, O., Malladi, D., A survey on 3GPP heterogeneous networks, *IEEE Wireless Communications*, 18, 3, 10–21, **2011**.
- [26] Chandrasekhar, V., Andrews, J. G., Gatherer, A., Femtocell networks: A survey, *IEEE Communications Magazine*, 46, 9, 59–67, **2008**.
- [27] Wang, B., Liu, K. J., Advances in cognitive radio networks: A survey, *IEEE Journal on Selected Topics in Signal Processing*, 5, 1, 5–23, **2011**.

- [28] Mitola, J., Cognitive radio—An integrated agent architecture for software defined radio, **2000**.
- [29] Commission, Federal Communications, diğerleri, Facilitating opportunities for flexible, efficient, and reliable spectrum use employing cognitive radio technologies, notice of proposed rule making and order, FCC 03-322,” Tech. Rep., **2003**.
- [30] Boyd, S., Vandenberghe, L., *Convex Optimization*, Cambridge University Press, New York, NY, USA, **2004**.
- [31] Aein, J. M., Power balancing in systems employing frequency reuse, *COMSAT Technical Review*, 3, 2, 277–300, **1973**.
- [32] Zander, J., Performance of optimum transmitter power control in cellular radio systems, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 41, 1, 57–62, **1992**.
- [33] Viterbi, A. J., Viterbi, A. M., Zehavi, E., Other-cell interference in cellular power-controlled CDMA, *IEEE Transactions on Communications*, 42, 234, 1501–1504, **1994**.
- [34] Yates, R. D., A framework for uplink power control in cellular radio systems, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 13, 7, 1341–1347, **1995**.
- [35] Hanly, S. V., Capacity and power control in spread spectrum macro-diversity radio networks, *IEEE Transactions on Communications*, 44, 2, 247–256, **1996**.
- [36] Bambos, N., Toward power-sensitive network architectures in wireless communications: Concepts, issues, and design aspects, *IEEE Personal Communications*, 5, 3, 50–59, June, **1998**.
- [37] Yu, W., Rhee, W., Boyd, S., Cioffi, J. M., Iterative water-filling for Gaussian vector multiple access channels, *IEEE Transactions on Information Theory*, 50, 1, 145–152, **2004**.
- [38] Soysal, A., Ulukus, S., Optimum power allocation for single-user MIMO and multi-user MIMO-MAC with partial CSI, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 25, 7, 1402–1412, **2007**.
- [39] Inaltekin, H., Hanly, S. V., Optimality of binary power control for the single cell uplink, *IEEE Transactions on Information Theory*, 58, 10, 6484–6498, Oct., **2012**.
- [40] Naeem, M., Pareek, U., Lee, D. C., Interference-aware joint user selection and quantised power control schemes for uplink cognitive multiple-input multiple-output system, *IET Communications*, 5, 16, 2266–2274, **2011**.

- [41] Chandrasekhar, V., Andrews, J. G., Spectrum allocation in tiered cellular networks, *IEEE Transactions on Communications*, 57, 10, 3059–3068, **2009**.
- [42] Chandrasekhar, V., Andrews, J. G., Muharemovic, T., Shen, Z., Gatherer, A., Power control in two-tier femtocell networks, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 8, 8, 4316–4328, **2009**.
- [43] Foschini, G. J., Layered space-time architecture for wireless communication in a fading environment when using multi-element antennas, *Bell Labs Technical Journal*, 1, 2, 41–59, **1996**.
- [44] Foschini, G. J., Gans, M. J., On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas, *Wireless Personal Communications*, 6, 3, 311–335, **1998**.
- [45] Zheng, L., Tse, D. N. C., Diversity and multiplexing: a fundamental tradeoff in multiple-antenna channels, *IEEE Transactions on Information Theory*, 49, 5, 1073–1096, **2003**.
- [46] Cimini Jr., L. J., Analysis and simulation of a digital mobile channel using orthogonal frequency division multiplexing, *IEEE Transactions on Communications*, 33, 7, 665–675, **1985**.
- [47] Lapidoth, A., Shamai, S., Wigger, M., On the capacity of fading MIMO broadcast channels with imperfect transmitter side-information, *arXiv preprint cs/0605079*, **2006**.
- [48] Love, D. J., Heath Jr., R. W., Lau, V. K. N., Gesbert, D., Rao, B. D., Andrews, M., An overview of limited feedback in wireless communication systems, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 26, 8, 1341–1365, **2008**.
- [49] Yoo, T., Jindal, N., Goldsmith, A., Multi-antenna downlink channels with limited feedback and user selection, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 25, 7, 1478–1491, **2007**.
- [50] Proakis, J. G., *Digital Communications*, McGraw-Hill Series in Electrical and Computer Engineering: Communications and Signal Processing. McGraw-Hill, **2001**.
- [51] Alavi, H., Nettleton, R. W., Downstream power control for a spread spectrum cellular mobile radio system, in *IEEE Global Telecommunications Conference*, 82, 84–88, **1982**.
- [52] Nettleton, R. W., Alavi, H., Power control for a spread spectrum cellular mobile radio system, in *IEEE Vehicular Technology Conference*. IEEE, 33, 242–246, **1983**.

- [53] Rashid-Farrokhi, F., Tassiulas, L., Liu, K. J., Joint optimal power control and beamforming in wireless networks using antenna arrays, *IEEE Transactions on Communications*, 46, 10, 1313–1324, **1998**.
- [54] Rashid-Farrokhi, F., Liu, K. J., Tassiulas, L., Transmit beamforming and power control for cellular wireless systems, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 16, 8, 1437–1450, **1998**.
- [55] Julian, D., Chiang, M., O'Neill, D., Boyd, S., QoS and fairness constrained convex optimization of resource allocation for wireless cellular and ad hoc networks, in *Twenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM)*, 2, 477–486, **2002**.
- [56] Schubert, M., Boche, H., Solution of the multiuser downlink beamforming problem with individual SINR constraints, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 53, 1, 18–28, **2004**.
- [57] Mohseni, M., Zhang, R., Cioffi, J. M., Optimized transmission for fading multiple-access and broadcast channels with multiple antennas, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 24, 8, 1627–1639, **2006**.
- [58] Pischella, M., Belfiore, J. C., Distributed resource allocation for rate-constrained users in multi-cell OFDMA networks, *IEEE Communications Letters*, 12, 4, 250–252, **2008**.
- [59] Wang, X., Giannakis, G. B., Power-efficient resource allocation for time-division multiple access over fading channels, *IEEE Transactions on Information Theory*, 54, 3, 1225–1240, **2008**.
- [60] Qu, Q., Milstein, L. B., Vaman, D. R., Cognitive radio based multi-user resource allocation in mobile ad hoc networks using multi-carrier CDMA modulation, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 26, 1, 70–82, **2008**.
- [61] Liu, K., Tang, B., Liu, Y. A., Adaptive power loading based on unequal-BER strategy for OFDM systems, *IEEE Communications Letters*, 13, 7, 474–476, **2009**.
- [62] Tölili, A., Pennanen, H., Komulainen, P., Decentralized minimum power multi-cell beamforming with limited backhaul signaling, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 10, 2, 570–580, **2011**.
- [63] Lu, X., Tölili, A., Tran, L. N., Juntti, M., Resource allocation in coordinated uplink multicell multicarrier systems, *IEEE Transactions on Communications*, 61, 12, 4922–4933, **2013**.

- [64] Knopp, R., Humblet, P.A., Information capacity and power control in single-cell multiuser communications, in *International Conference on Communications*, 1, 331–335, June, **1995**.
- [65] Goldsmith, A. J., Varaiya, P. P., Capacity of fading channels with channel side information, *IEEE Transactions on Information Theory*, 43, 6, 1986–1992, **1997**.
- [66] Tse, D. N. C., Hanly, S. V., Multiaccess fading channels - part I: Polymatroid structure, optimal resource allocation and throughput capacities, *IEEE Transactions on Information Theory*, 44, 7, 2796–2815, Nov., **1998**.
- [67] Biglieri, E., Proakis, J., Shamai, S., Fading channels: Information-theoretic and communications aspects, *IEEE Transactions on Information Theory*, 44, 6, 2619–2692, **1998**.
- [68] Chiang, M., Hande, P., Lan, T., Tan, C. W., Power control in wireless cellular networks, *Foundations and Trends in Networking*, 2, 4, 381–553, **2008**.
- [69] Luo, Z.-Q., Zhang, S., Dynamic spectrum management: Complexity and duality, *IEEE Journal on Selected Topics in Signal Processing*, 2, 1, 57–73, **2008**.
- [70] Li, L., Goldsmith, A. J., Capacity and optimal resource allocation for fading broadcast channels. I. Ergodic capacity, *IEEE Transactions on Information Theory*, 47, 3, 1083–1102, **2001**.
- [71] Luo, J., Yates, R., Spasojevic, P., Service outage based capacity and optimum power allocation for parallel fading channels, in *IEEE International Symposium on Information Theory*, 108, **2002**.
- [72] Luo, J., Lin, L., Yates, R., Spasojevic, P., Service outage based power and rate allocation, *IEEE Transactions on Information Theory*, 49, 1, 323–330, Jan., **2003**.
- [73] Luo, J., Yates, R., Spasojević, P., Service outage based power and rate allocation for parallel fading channels, *IEEE Transactions on Information Theory*, 51, 7, 2594–2611, **2005**.
- [74] Yu, W., Lui, R., Cendrillon, R., Dual optimization methods for multiuser orthogonal frequency division multiplex systems, in *IEEE Global Telecommunications Conference*, 1, 225–229, **2004**.
- [75] Palomar, D. P., Fonollosa, J. R., Practical algorithms for a family of waterfilling solutions, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 53, 2, 686–695, **2005**.

- [76] Lozano, A., Tulino, A. M., Verdú, S., Mercury/waterfilling: Optimum power allocation with arbitrary input constellations, in *IEEE International Symposium on Information Theory*, 1773–1777, **2005**.
- [77] Lozano, A., Tulino, A. M., Verdú, S., Optimum power allocation for parallel gaussian channels with arbitrary input distributions, *IEEE Transactions on Information Theory*, 52, 7, 3033–3051, **2006**.
- [78] Lozano, A., Tulino, A. M., Verdú, S., Multiuser mercury/waterfilling for downlink OFDM with arbitrary signal constellations, in *Proceedings in International Symposium on Spread Spectrum Technologies and Applications*, **2006**.
- [79] Oh, S. J., Soong, A. C. K., QoS-constrained information-theoretic sum capacity of reverse link CDMA systems, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 5, 1, 3–7, **2006**.
- [80] Wang, X., Giannakis, G. B., Yu, Y., Channel-adaptive optimal OFDMA scheduling, in *41st Annual Conference on Information Sciences and Systems*. IEEE, 536–541, **2007**.
- [81] Shum, K. W., Leung, K. K., Sung, C. W., Convergence of iterative waterfilling algorithm for Gaussian interference channels, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 25, 6, 1091–1100, **2007**.
- [82] Bhaskaran, S. R., Hanly, S. V., Badruddin, N., Evans, J. S., Maximizing the sum rate in symmetric networks of interfering links, *IEEE Transactions on Information Theory*, 56, 9, 4471–4487, Sept., **2010**.
- [83] Quek, T. Q. S., Win, M. Z., Chiani, M., Robust power allocation algorithms for wireless relay networks, *IEEE Transactions on Communications*, 58, 7, 1931–1938, **2010**.
- [84] Gjendemsjø, A., Gesbert, D., Oien, G. E., Kiani, S. G., Binary power control for sum rate maximization over multiple interfering links, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 7, 8, 3164–3173, **2008**.
- [85] Qin, X., Berry, R., diğerleri, Distributed approaches for exploiting multiuser diversity in wireless networks, *IEEE Transactions on Information Theory*, 52, 2, 392–413, **2006**.
- [86] Marsch, P., Fettweis, G., A framework for optimizing the uplink performance of distributed antenna systems under a constrained backhaul, in *International Conference on Communications*. IEEE, 975–979, **2007**.
- [87] Nekouei, E., Inaltekin, H., Dey, S., Power control and asymptotic throughput analysis for the distributed cognitive uplink, *IEEE Transactions on Communications*, 62, 1, 41–58, **2014**.

- [88] Suraweera, H., Gao, J., Smith, P. J., Shafi, M., Faulkner, M., diğerleri, Channel capacity limits of cognitive radio in asymmetric fading environments, in *International Conference on Communications*. IEEE, 4048–4053, **2008**.
- [89] Musavian, L., Aïssa, S., Capacity and power allocation for spectrum-sharing communications in fading channels, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 8, 1, 148–156, **2009**.
- [90] Zhang, R., Shuguang, C., Liang, Y. C., On ergodic sum capacity of fading cognitive multiple-access and broadcast channels, *IEEE Transactions on Information Theory*, 55, 11, 5161–5178, Nov., **2009**.
- [91] Zhang, R., Liang, Y. C., Cui, S., Dynamic resource allocation in cognitive radio networks, *IEEE Signal Processing Magazine*, 27, 3, 102–114, May, **2010**.
- [92] Zhang, R., Liang, Y. C., Exploiting multi-antennas for opportunistic spectrum sharing in cognitive radio networks, *IEEE Journal on Selected Topics in Signal Processing*, 2, 1, 88–102, **2008**.
- [93] Zhang, R., On peak versus average interference power constraints for protecting primary users in cognitive radio networks, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 8, 4, 2112–2120, **2009**.
- [94] Zhang, R., Liang, Y. C., Investigation on multiuser diversity in spectrum sharing based cognitive radio networks, *IEEE Communications Letters*, 14, 2, 133–135, Feb., **2010**.
- [95] Kang, X., Liang, Y. C., Nallanathan, A., Garg, K., Zhang, R., Optimal power allocation for fading channels in cognitive radio networks: Ergodic capacity and outage capacity, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 8, 2, 940–950, **2009**.
- [96] Kang, X., Zhang, R., Liang, Y. C., Garg, H. K., Optimal power allocation for cognitive radio under primary user's outage loss constraint, in *International Conference on Communications*. IEEE, 1–5, **2009**.
- [97] Gong, X., Vorobyov, S., Tellambura, C., diğerleri, Optimal bandwidth and power allocation for sum ergodic capacity under fading channels in cognitive radio networks, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 59, 4, 1814–1826, **2011**.
- [98] Naeem, M., Pareek, U., Lee, D. C., Anpalagan, A., Power allocation and relay assignment for shared-band nonregenerative relaying in cognitive radio systems, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 62, 6, 2853–2859, **2013**.

- [99] Javan, M. R., Sharafat, A. R., Distributed joint resource allocation in primary and cognitive wireless networks, *IEEE Transactions on Communications*, 61, 5, 1708–1719, **2013**.
- [100] Jorswieck, E. A., Boche, H., Performance analysis of capacity of MIMO systems under multiuser interference based on worst-case noise behavior, *EURASIP Journals on Wireless Communications and Networking*, 2004, 2, 273–285, **2004**.
- [101] Yu, D. D., Cioffi, J. M., Iterative water-filling for optimal resource allocation in OFDM multiple access and broadcast channels, in *IEEE Global Telecommunications Conference*. IEEE, 1–5, **2006**.
- [102] Kobayashi, M., Caire, G., An iterative water-filling algorithm for maximum weighted sum-rate of gaussian MIMO-BC, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 24, 8, 1640–1646, **2006**.
- [103] Kobayashi, M., Caire, G., Iterative waterfilling for weightedrate sum maximization in MIMO-MAC, IEEE, 1–5, **2006**.
- [104] Scutari, G., Palomar, D. P., Barbarossa, S., The MIMO iterative waterfilling algorithm, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 57, 5, 1917–1935, **2009**.
- [105] Soysal, A., Ulukus, S., Joint channel estimation and resource allocation for MIMO systems-part I: Single-user analysis, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 9, 2, 624–631, **2010**.
- [106] Soysal, A., Ulukus, S., Joint channel estimation and resource allocation for MIMO systems-part II: Multi-user and numerical analysis, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 9, 2, 632–640, **2010**.
- [107] Adian, M. G., Aghaeinia, H., Optimal resource allocation in heterogeneous MIMO cognitive radio networks, *Wireless Personal Communications*, 76, 1, 23–39, **2014**.
- [108] Yu, W., Ginis, G., Cioffi, J. M., Distributed multiuser power control for digital subscriber lines, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 20, 5, 1105–1115, **2002**.
- [109] Etkin, R., Parekh, A., Tse, D., Spectrum sharing for unlicensed bands, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 25, 3, 517–528, **2007**.
- [110] Wong, I. C., Evans, B. L., Optimal downlink OFDMA resource allocation with linear complexity to maximize ergodic rates, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 7, 3, 962–971, **2008**.

- [111] Scutari, G., Palomar, D. P., Barbarossa, S., Asynchronous iterative water-filling for gaussian frequency-selective interference channels, *IEEE Transactions on Information Theory*, 54, 7, 2868–2878, **2008**.
- [112] Hayashi, S., Luo, Z.-Q., Spectrum management for interference-limited multiuser communication systems, *IEEE Transactions on Information Theory*, 55, 3, 1153–1175, **2009**.
- [113] Ma, Y., Kim, D. I., Rate-maximization scheduling schemes for uplink OFDMA, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 8, 6, 3193–3205, **2009**.
- [114] Elmusrati, M., El-Sallabi, H., Koivo, H., Applications of multi-objective optimization techniques in radio resource scheduling of cellular communication systems, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 7, 1, 343–353, **2008**.
- [115] Zhao, L., Mark, J. W., Joint rate and power adaptation for radio resource management in uplink wideband code division multiple access systems, *IET communications*, 2, 4, 562–572, **2008**.
- [116] Papandriopoulos, J., Dey, S., Evans, J. S., Optimal and distributed protocols for cross-layer design of physical and transport layers in manets, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 16, 6, 1392–1405, **2008**.
- [117] Papandriopoulos, J., Evans, J. S., Scale: a low-complexity distributed protocol for spectrum balancing in multiuser dsl networks, *IEEE Transactions on Information Theory*, 55, 8, 3711–3724, **2009**.
- [118] Yu, Y., Hua, Y., Power allocation for a mimo relay system with multiple-antenna users, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 58, 5, 2823–2835, **2010**.
- [119] Sorooshyari, S., Tan, C. W., Chiang, M., Power control for cognitive radio networks: Axioms, algorithms, and analysis, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 20, 3, 878–891, **2012**.
- [120] Liang, X., Ding, Z., Xiao, C., Optimized power allocation for packet re-transmissions of non-gaussian inputs through sequential awgn channels, *IEEE Transactions on Communications*, 60, 7, 1889–1902, **2012**.
- [121] Cai, D. W. H., Quek, T. Q. S., Tan, C. W., Low, S. H., Max-min SINR coordinated multipoint downlink transmission-duality and algorithms, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 60, 10, 5384–5395, **2012**.
- [122] Viswanath, P., Tse, D. N. C., Laroia, R., Opportunistic beamforming using dumb antennas, *IEEE Transactions on Information Theory*, 48, 6, 1277–1294, **2002**.

- [123] Strang, G., *Linear Algebra and Its Applications*, Thomson Brooks/Cole, **2006**.
- [124] Horn, R. A., Johnson, C. R., *Matrix Analysis*, Cambridge University Press, **2012**.
- [125] Gesbert, D., Kountouris, M., Heath, R. W., Chae, C., Salzer, T., Shifting the MIMO paradigm, *IEEE Signal Processing Magazine*, 24, 5, 36–46, **2007**.
- [126] Soysal, A., Ulukus, S., Optimality of beamforming in fading MIMO multiple access channels, *IEEE Transactions on Communications*, 57, 4, 1171–1183, **2009**.
- [127] Spencer, Q. H., Haardt, M., diğerleri, Zero-forcing methods for down-link spatial multiplexing in multiuser MIMO channels, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 52, 2, 461–471, **2004**.
- [128] Heath, R. W., Airy, M., Paulraj, A. J., Multiuser diversity for MIMO wireless systems with linear receivers, in *Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, CA, USA*, 2, 1194–1199, **2001**.
- [129] Zakhour, R., Gesbert, D., Optimized data sharing in multicell mimo with finite backhaul capacity, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 59, 12, 6102–6111, **2011**.
- [130] Gallager, R. G., *Information Theory and Reliable Communication*, 2, Springer, **1968**.

ÖZGEÇMİŞ

Kimlik Bilgileri

Adı Soyadı : BARIŞ YÜKSEKKAYA
Doğum Yeri : Ankara
Medeni Hali : Evli
E-posta : barisyuksekkaya@yahoo.com
Adresi : Güzeltepe Mahallesi 747. Sokak Park Vadi Evleri
Sit. A5 Blok No:84 Çankaya / ANKARA

Eğitim

Lisans : Hacettepe Üniversitesi
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Böl., ANKARA
Yüksek Lisans : Hacettepe Üniversitesi
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Böl., ANKARA
Doktora : Hacettepe Üniversitesi
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Böl., ANKARA

Yabancı Dil ve Düzeyi

İngilizce : Çok İyi
İspanyolca : Başlangıç

İş Deneyimi

Aralık 2006-... : Araştırma Görevlisi, Hacettepe Üniversitesi
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Böl., ANKARA

Deneyim Alanları

Kablosuz haberleşme, MIMO iletişim, heterojen ağlarda ve bilişsel ağlarda iletişim teknikleri, 4G ve sonrası iletişim sistemlerinde kaynak tahsisi.

Tezden Üretilmiş Projeler ve Bütçesi

TÜBİTAK (Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu), Türkiye,
Evrena1010, Proje no:112E024,
Gelecek Nesil Kablosuz Haberleşme Sistemleri İçin Dinamik Radyo Kaynak
İdaresi ve Tahsisi, 330.000TL.

TÜBİTAK (Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu), Türkiye,
2214-A, Yurt Dışı Doktora Sırası Araştırma Burs Programı
Yeni Nesil Kablosuz Ağlarda Radyo Kaynak İdaresi, 12.400USD.

Tezden Üretilmiş Yayınlar

Yüksekkaya, B., İnaltekin, H., Toker, C., Yanıkömeroğlu, H.,
Optimum Power Control for Two-Tier Uplink Under Sum and Individual Interfe-
rence Constraints,
IEEE Transactions on Wireless Communications dergisine Ocak 2016'da gön-
derilmiştir.

Tezden Üretilmiş Tebliğ ve/veya Poster Sunumu ile Katıldığı Toplantılar

Yüksekkaya, B., İnaltekin, H., Toker, C., Yanıkömeroğlu, H.,
Near-Optimum Power Control for Two-Tier SIMO Uplink Under Power and In-
terference Constraints,
IEEE 16. International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless
Communications (SPAWC-2015), 2015.

Yüksekkaya, B., İnaltekin, H., Toker, C., Yanıkömeroğlu, H.,
İki Katmanlı TGÇÇ-ÇGÇÇ Çoklu Erişim Kanalları için Girişim Kısıtları Altında
Güç Kontrolü,
IEEE 23. Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı (SİU-2015), 2015.

Yüksekkaya, B., İnaltekin, H., Toker, C.,
Optimum Uplink Power Control Under Power and Interference Constraints,
IEEE 78. Vehicular Technology Conference Fall (VTC 2013-Fall), 2013.