

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BİLİŞSEL RADYO AĞLARINDA ÇOK ÖLÇÜTLÜ KARAR VERME
YÖNTEMLERİNE DAYALI YENİ BİR SPEKTRUM YÖNETİM MODELİ

DOKTORA TEZİ

Zhaleh SADREDDİNİ

MAYIS 2018
TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce

Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /

Tezin Savunma Tarihi : / /

Tez Danışmanı :

Trabzon

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalında
Zhaleh SADREDDİNİ Tarafından Hazırlanan**

**BİLİŞSEL RADYO AĞLARINDA ÇOK ÖLÇÜTLÜ KARAR VERME
YÖNTEMLERİNE DAYALI YENİ BİR SPEKTRUM YÖNETİM MODELİ**

başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 10 /04/2018 gün ve 1748 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
DOKTORA TEZİ
olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

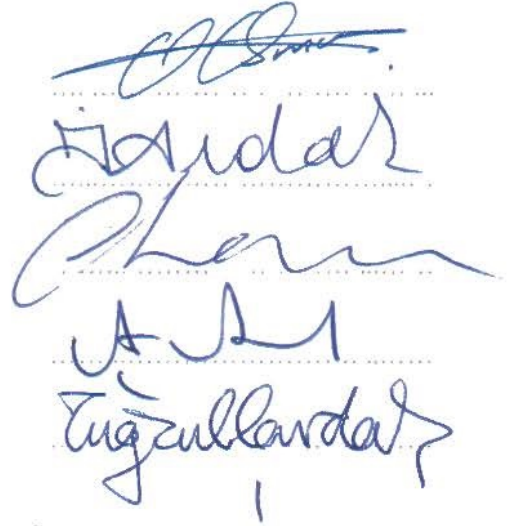
Başkan : Prof. Dr. Onur OSMAN

Üye : Prof. Dr. İsmail Hakkı ÇAVDAR

Üye : Prof. Dr. Cemal KÖSE

Üye : Doç. Dr. Ayşegül ALAYBEYOĞLU

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Tuğrul ÇAVDAR



The image shows four handwritten signatures in blue ink, each written over a dotted line. The signatures are: 1. Onur Osman (Chairman), 2. İsmail Hakkı Çavdar, 3. Cemal Köse, and 4. Ayşegül Alaybeyoğlu. The signature of Tuğrul Çavdar is not visible in the image.

Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ
Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Son yıllarda kablosuz teknoloji alandaki uygulamaların artmasıyla birlikte spektrum bandına olan talep giderek önem kazanmıştır. Gelişen Lisanslı Paylaşım Erişim çerçevesi ve bilişsel radyo teknolojisi, gezgin ağlarda aynı frekans bandlarına erişen sınırlı sayıda kullanıcı arasında esnek spektrum paylaşımına olanak tanır. Bu tezde, bilişsel radyo ağlarında esnek spektrum yönetimi için kullanıcı memnuniyeti ile uyumlu bir spektrum yönetimi stratejisi önerilmiştir.

Çalışmalarında danışmanlığımı üstlenen ve katkılarıyla çalışmamı yönlendiren çok değerli danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Tuğrul ÇAVDAR'a teşekkürlerimi sunarım.

Çalışma sürecinde değerli görüş ve katkılarını esirgemeyen sayın Prof. Dr. İsmail Hakkı ÇAVDAR'a ve Prof. Dr. Cemal KÖSE'ye teşekkür ederim. Çalışmalarımın son aşamasında manevi destekleriyle yanımdan olan arkadaşım Arş. Gör. Özge AYDOĞDU'ya, Öğr. Gör. Erkan GÜLER'e, Arş. Gör. Faruk Baturalp GÜNAY'a, ve Rauf Tacettin HOLDUR'a teşekkürlerimi sunarım.

Doktora döneminde Erasmus+ program süresi boyunca, devamında tez çalışmamda değerli görüş ve önerileriyle çalışmalarında yol gösteren, Brno University of Technology, Çek Cumhuriyeti'nde bulunan 3GPP LTE-A kapalı hücreli sistemde gerçekleştirilen ölçüm setini kullanmama izin veren ve gerekli simülasyon bilgilerini temin eden Sayın Doç. Dr. Jiří HOŠEK'e, Yrd. Doç. Dr. Pavel MAŠEK'e ve ayrıca değerli arkadaşlarım Aslıhan KARTÇI'ya ve Ing. Jiří POKORNÝ'e teşekkürlerimi sunarım. Doktora tez süresi boyunca tez konusu ile ilgili yayınlarda değerli görüş ve katkılarını esirgemeyen Sayın Doç. Dr. Sergey ANDREEV'e teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımın her aşamasında özellikle öğrenim hayatım boyunca buralara gelmemi sağlayan sevgili babama, anneme ve kardeşime sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.

Zhaleh SADREDDİNİ
Trabzon 2018

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum ‘‘Bilişsel Radyo Ağlarında Çok Ölçütlü Karar Verme Yöntemlerine Dayalı Yeni Bir Spektrum Yönetim Modeli’’ başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Tuğrul ÇAVDAR’ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.11/05/2018

Zhaleh SADREDDİNİ

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VIII
SUMMARY	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ	X
TABLolar DİZİNİ.....	XIII
SEMBOLLER DİZİNİ	XIV
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş.....	1
1.1.1. Mevcut Çalışmalar	3
1.1.2. Motivasyon	8
2. BİLİŞSEL RADYO AĞLARI	11
2.1. Bilişsel Radyo İşlevleri	14
2.1.1. Spektrum Sezme	15
2.1.2. Spektrum Yönetimi	16
2.1.3. Spektrum Paylaşımı	17
2.1.4. Spektrum Hareketliliği.....	19
3. LİSANSLI PAYLAŞIMLI ERİŞİM	20
3.1. Spektrum Paylaşım Modeli.....	20
3.1.1. LSA Mimarisi	21
4. GENEL YÖNETİM TEKNİKLERİ	23
4.1. Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri	23
4.1.1. Analitik Hiyerarşi Süreci Yöntemi	25
4.1.2. Basit Ağırlıklı Toplama Yöntemi	32
5. REZERVASYON TEKNİKLERİ	33
5.1. Fazladan Rezervasyon Tekniği	33
5.1.1. Riske Dayalı Yöntem	34
5.1.2. Olasılığa Dayalı Yöntem.....	36
5.1.3. Servis Seviyesine Dayalı Yöntem.....	36
6. FİYATLANDIRMA TEKNİKLERİ	38

6.1.	LTE Teknoloji Ayarları	38
6.1.1.	Trafik Veya QoS Sınıfı	38
6.1.2.	Kullanıcı Sınıfı.....	39
6.2.	Ağ Yüküne Dayalı Fiyatlandırma	40
6.3.	QoS Profili Ve Teklif Tabanlı Fiyatlama.....	41
6.4.	Farklılaştırılmış Trafik Fiyatlandırma.....	42
6.5.	Abone Sınıfına Dayalı Fiyatlandırma	43
6.5.1.	G Tipi Kullanıcılar İçin Fiyatlandırma	43
6.5.2.	S Tipi Kullanıcılar İçin Fiyatlandırma	44
6.5.3.	B Tipi Kullanıcılar İçin Fiyatlandırma.....	44
7.	OPTİMİZASYON TEKNİKLERİ.....	46
7.1.	Parçacık Sürü Optimizasyonu	47
8.	YAPILAN ÇALIŞMALAR	51
8.1.	Kullanıcıların Tanımlanması	52
8.2.	Bilişsel Radyo Ağlarda Fazladan Rezervasyon Modeli.....	53
8.2.1.	Bilişsel Radyo Ağlarda Fazladan Rezervasyon Modelinin Kavram Tanımı	55
8.2.1.1.	Kullanıcıların Modellemesi	58
8.2.2.	Bilişsel Radyo Ağlarda Fazladan Rezervasyon Çerçeve Yapısı.....	59
8.2.3.	Bilişsel Radyo Ağlarda Fazladan Rezervasyon Modelinin Fiyatlandırma Yöntemleri	63
8.2.3.1.	Sabit Fiyatlama Politikası.....	63
8.2.3.2.	Esnek Fiyatlandırma Politikası.....	63
8.2.3.3.	Uyarlanır Fiyatlandırma Politikası	63
8.2.3.4.	Hizmet Kalitesine Dayalı Fiyatlandırma Politikası.....	64
8.2.4.	Bilişsel Radyo Ağlarda Fazladan Rezervasyon Modelinin Fazladan Rezervasyon Yöntemleri	65
8.2.5.	RSU'lar İçin Hizmet Reddetme Politikaları	67
8.2.6.	ASU'lar İçin Atılma Politikası.....	69
8.3.	Rezervasyon Stratejisi.....	71
8.3.1.	Ön-Rezervasyon Yönetim Modelinin Ağ Mimarisi	71
8.3.2.	Spektrum Karar Mekanizmasındaki Durumların Belirlenmesi	72
8.3.3.	Ön-Rezervasyon Yönetim Modelinin Hiyerarşisi.....	73
8.3.4.	Ön-Rezervasyon Yönetim Modelinin İşlevleri	77
8.3.4.1.	Rezervasyon Fonksiyonu.....	77

8.3.4.2.	Anlık Kullanıcı Fonksiyonu	81
8.3.4.3.	Değişim Fonksiyonu.....	83
8.3.4.4.	Reddedilme Fonksiyonu	84
8.4.	Spektrum El Değiştirme Mekanizması	85
8.4.1.	Spektrum El Değiştirme Mekanizmasının Sistem Modeli.....	86
8.4.2.	Spektrum El Değiştirme Mekanizmasının Prosedürü.....	89
9.	BULGULAR VE İRDELEME	93
9.1.	PU ve SU Farklı Faaliyet Oranlarına Göre Performans Analizi.....	93
9.2.	Fiyatlandırma ve Ret Politikalarında ASU Öncelik Düzeylerine Dayalı Performans Analizi	98
9.3.	IOFCR Diğer Performans Sonuçları.....	101
9.4.	IOFCR PSO Performans Analizi	102
9.5.	PU Faaliyet Oranına Göre RSU Seçimi.....	106
9.6.	El Değiştirme Prosidürünün Performans Analizi.....	108
9.7.	Önerilen Farklı Fiyatlandırma Politikalarının Performans Analizi	113
9.8.	QoS-Driven, Esnek ve Uyarlanır Fiyatlandırma Politikalarının SCP'e Karşı Performans Analizi	116
9.9.	MNO Kararına Dayalı Uygun ASU'yu Reddetme Fonksiyonunun Performans Analizi.....	119
9.9.1.	Kullanıcı Faaliyet Oranına Dayalı Spektrum Kullanım Oranı.....	120
9.9.2.	ASU Reddedilme Fonksiyonunun Performans Analizi	123
9.10.	Fazladan Rezervasyon Sınırı ve Gelir Performans Analizi	126
9.11.	Ön Rezervasyon Yönetim Sisteminin (PRMS) Performans Analizi	127
9.12.	Pareto Analizi.....	137
9.13.	Önerilen Rezervasyon Yönetim Sisteminin Hesaplama Karmaşıklığı	139
10.	SONUÇLAR	141
11.	ÖNERİLER.....	143
12.	KAYNAKLAR	144
13.	EKLER.....	151

ÖZGEÇMİŞ

Doktora Tezi

ÖZET

BİLİŞSEL RADYO AĞLARINDA ÇOK ÖLÇÜTLÜ KARAR VERME YÖNTEMLERİNE DAYALI YENİ BİR SPEKTRUM YÖNETİM MODELİ

Zhaleh SADREDDİNİ

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Tuğrul ÇAVDAR
2018, 153 Sayfa

Son yıllarda kablosuz teknolojilerin gelişmesi ve bu alandaki uygulamaların artmasıyla birlikte spektrum bandına olan talep kullanıcılar tarafından artarak spektrum yönetim teknikleri önemli hale gelmektedir. Gelişen Lisanslı Paylaşımlı Erişim çerçevesi ve Bilişsel Radyo (CR) teknolojisi, gezgin ağlarda aynı frekans bandlarına erişen kullanıcılar arasında esnek spektrum paylaşımına olanak tanımaktadırlar. Böylelikle birincil kullanıcı ile ikincil bir kullanıcı arasındaki spektrumun kontrollü bir şekilde paylaşılmasına izin verilir. Bu tezde, CR ağlarında esnek spektrum yönetimi için kullanıcı memnuniyeti ile uyumlu bir spektrum yönetimi stratejisi önerilmiştir. Önerilen çerçevede, fiyatlandırma ve reddetme kurallarına dayanarak, birincil kullanıcının aktif olmadığı durumlarda ikincil kullanıcının nasıl hizmet alabileceği Çok Ölçütlü Karar Verme yöntemleri ile belirlenmektedir. Öte yandan, birincil kullanıcıların aktif olduğu zamanlarda ikincil kullanıcıların işgal ettikleri lisanslı spektrum bandların boşaltması yerine spektrum el değiştirme prosedürünü etkin bir şekilde uygulamak ve kullanıcıların memnuniyetini artırarak toplam hizmet süresini, spektrum kullanımını ve deneyim kalitesini en üst düzeye çıkarmak için bir karar verme modeli önerilmiştir. Simülasyon modeli için girdi olarak, 3GPP LTE-A kapalı hücreli sistemde gerçekleştirilen ölçüm seti kullanılmıştır. Simülasyon sonuçları, uygun politikaların seçilmesinin, kullanıcıları spektrum bandı fiyatı hakkında adil bir şekilde değerlendirmesine ve kullanıcı faaliyet oranına göre ağ gelir verimliliğini artırırken kullanıcıların daha az servis dışı olması ve böylelikle kullanıcı memnuniyetinin sağlanmasına neden olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Spektrum yönetimi, Lisanslı Paylaşımlı Erişim, Bilişsel Radyo Ağları, fiyatlandırma yöntemleri, spektrum el değiştirme, fazladan rezervasyon teknikleri, çok ölçütlü karar verme yöntemleri.

PhD. Thesis

SUMMARY

A NOVEL SPECTRUM MANAGEMENT MODEL BASED ON MULTI CRITERIA DECISION MAKING METHODS IN COGNITIVE RADIO NETWORKS

Zhaleh SADREDDİNİ

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Computer Engineering Graduate Program
Supervisor: Assist. Dr. Tuğrul ÇAVDAR
2018, 153 pages

Motivated by a steadily increasing demand for efficient spectrum utilization, it becomes crucial to revise the existing radio spectrum management techniques. The emerging Licensed Shared Access (LSA) regulatory framework and Cognitive Radio (CR) technology enable flexible spectrum sharing in HetNet which allows for controlled sharing of spectrum between a Primary User (PU) and a Secondary User (SU). In this thesis, an advanced user satisfaction-aware spectrum management strategy for dynamic spectrum management in CR Networks (CRNs) is proposed. The proposed frameworks are based on the Mobile Network Operators (MNOs) decision policy that combines both pricing and rejection rules via Multi Criteria Decision Making (MCDM) methods which decide how a SU can get a service when PU is inactive. On the other hand, one of the issues to be solved is the need to move SUs from the rented spectrum band whenever the PU needs it. The potential solution for this problem is represented by spectrum handoff, which aims to help SUs to find suitable network resources to resume the unfinished transmissions somewhere else. Inspired by this, we propose a decision making model in order to efficiently implement the handoff procedure and treat SUs to maximize total service time, spectrum utilization and the Quality of Experience (QoE) by increasing the users' satisfaction. As an input for our simulation model, we have used the set of measurements performed in real 3GPP LTE-A indoor cellular system. Simulation results illustrate that the selecting appropriate policy leads to charge SUs fairly and decrease the number of eliminated SUs while improving spectrum utilization and increasing network revenue efficiency in both off-peak and peak hours.

Keywords: Spectrum management, Licensed Shared Access, Cognitive Radio Networks, Pricing Policy, Spectrum handoff, Overbooking, Multi Criteria Decision Making methods.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 2.1. Spektrum tahsisi [62].....	12
Şekil 2.2. Spektrum boşlukları ve dinamik spektrum erişimi	14
Şekil 2.3. Bilişsel çevrimi [11]	16
Şekil 2.4. Kablosuz bilişsel radio ağ ortamı	18
Şekil 3.1. Spektrum paylaşım çeşitleri	20
Şekil 3.2. LSA mimarisi [79]	22
Şekil 4.1. Tipik bir MCDM Problemi [81].....	23
Şekil 4.2. Analitik Hiyerarşi Süreci.....	26
Şekil 4.3. Örnek bir ikili karşılaştırma matrisinin oluşturulması	28
Şekil 5.1. Fazladan rezervasyon yönteminin modeli [27]	34
Şekil 7.1. PSO parametrelerinin vektör olarak gösterimi [108]	49
Şekil 7.2. Hareket kontrolü için PSO akış diyagramı [108]	50
Şekil 8.1. Tasarlanan spektrum yönetim çerçevesinin akış şeması	51
Şekil 8.2.Kullanıcı türleri ve aralarındaki iletişim	53
Şekil 8.3. Bilişsel radyo (CR) ağlarda fazladan rezervasyon sistem modeli [109]	54
Şekil 8.4.Spektrum tahsisi	54
Şekil 8.5.Zaman aralığı.....	55
Şekil 8.6. Önerilen Sistem modelinde AHP hiyerarşisi [110].....	74
Şekil 8.7. Ön-rezervasyon yönetim sisteminin işlevleri [110]	78
Şekil 8.8. LSA sistem modeli	87
Şekil 8.9. 3GPP LTE-A testbed [113]	88
Şekil 8.10. El değişimi mekanizmasının sistem model şeması	89
Şekil 8.11. El değiştirme mekanizmasının ayrıntılı sistem modeli	92
Şekil 9.1. Kullanıcı faaliyet oranına dayalı IOFCR performansı	94
Şekil 9.2. Fiyatlandırma politikalarına dayalı TNR ve CC	99
Şekil 9.3. SL eşiği ve farklı fiyatlandırma politikaları, farklı kullanıcı faaliyet oranı ve farklı spektrum bandı sayısına dayalı TNR değerleri	101
Şekil 9.4. PU ve ASU faaliyet oranları %15 olduğunda RSU talep oranına dayanarak dayanarak fazladan rezervasyon fiyatı	104

Şekil 9.5. PU ve ASU faaliyet oranları %15 olduğunda RSU talep oranına dayanarak CC oranı	104
Şekil 9.6. PU ve ASU faaliyet oranları %85 olduğunda RSU talep oranına dayanarak fazladan rezervasyon fiyatı	105
Şekil 9.7. PU ve ASU faaliyet oranları %85 olduğunda RSU talep oranına dayanarak CC oranı	105
Şekil 9.8. Farklı PU ve ASU ve RSU faaliyet ve talep oranlarına dayanılarak elde edilen gelir.....	106
Şekil 9.9. RSU'ların yoğun ve yoğun olmayan saatlerde kabul oranı	107
Şekil 9.10. PU faaliyet oranına göre spektrum kullanımı	110
Şekil 9.11. Tüm hücrelerde spektrum kullanımına genel bakış	111
Şekil 9.12. Cell11'de spektrum kullanımı	112
Şekil 9.13. Cell12'de spektrum kullanımı	112
Şekil 9.14. Cell22'de spektrum kullanımı	112
Şekil 9.15. 10 simülasyon zaman aralığı için farklı fiyatlandırma politikalarının sapma (SD) değeri	113
Şekil 9.16. PU ve ASU faaliyet oranına bağlı spektrum kullanımı	117
Şekil 9.17. Dört farklı fiyatlandırma politikası ile fiyat hesaplaması	118
Şekil 9.18. Yoğun olmayan ve yoğun olan saatlerde spektrum kullanımı	121
Şekil 9.19. ASU'ların servis süresi ve bir sonraki hizmet talebinde ödeyecekleri fiyat....	122
Şekil 9.20. Hizmet alan kullanıcıların seçim fonksiyonselliği	123
Şekil 9.21. Yoğun olmayan saatlerde fazladan rezervasyon sınır tahsisi	126
Şekil 9.22. Yoğunluğun fazla olduğu saatlerde fazladan rezervasyon sınır tahsisi.....	126
Şekil 9.23. ASU ve PU faaliyet oranına dayanarak spektrum kullanım oranı	129
Şekil 9.24. Yoğun olmayan saatlerde PRSU kabul oranı	130
Şekil 9.25. Yoğun olan saatlerde PRSU kabul oranı	130
Şekil 9.26. Ön Rezervasyon yönteminde (PRMS) yoğun olmayan saatlerde zaman dilimine dayalı TNR	131
Şekil 9.27. Ön Rezervasyon yönteminde (PRMS) yoğun olan saatlerde zaman dilimine dayalı TNR	131
Şekil 9.28. IOFCR yönteminde yoğun olmayan saatlerde zaman dilimine dayalı TNR...	132
Şekil 9.29. IOFCR yönteminde yoğun olan saatlerde zaman dilimine dayalı TNR.....	132
Şekil 9.30. SCP yönteminde yoğun olmayan saatlerde zaman dilimine dayalı TNR	133
Şekil 9.31. SCP yönteminde yoğun olan saatlerde zaman dilimine dayalı TNR	133
Şekil 9.32. IOFCR, PRMS v SCP için seçili zaman dilimindeki TNR	134

Şekil 9.33. PRMS Spektrum kullanımı	137
Şekil 9.34. Pareto analizi ile yoğun olmayan saatlerde kullanıcı memnuniyeti	138
Şekil 9.35. Pareto analizi ile yoğun saatlerde kullanıcı memnuniyeti.....	138



TABLULAR DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 4.1. AHP'de tercihler için ikili karşılaştırma ölçeği	27
Tablo 4.2. RI değerleri [11, 19]	30
Tablo 6.1. LTE ağlarında belirli bir bantgenişliği için PRB sayısı [55].....	39
Tablo 6.2. Kullanıcı kategorisi [55].....	39
Tablo 6.3. Farklı trafik sınıfları için olası bir QoS özniteliği değerleri [53]	41
Tablo 6.4. LTE için kullanıcının QoS profili örneği [54]	42
Tablo 8.1. RSU'nun Fiyatlandırma Özellikleri İçin Çift-Bazlı Karşılaştırma Matrisi	82
Tablo 8.2. Karar matrisi.....	91
Tablo 9.1. IOFCR çerçevesinde PSO performans analizi	103
Tablo 9.2. Karar kriterlerinin AHP metodundaki önem dereceleri	107
Tablo 9.3. 17'inci simülasyon zaman aralığındaki RSU parametre değerleri.....	108
Tablo 9.4. Simulation parametereleri	109
Tablo 9.5. t_{60} zaman aralığında el değişimi oranı ($HRASU(t_{60})$)	109
Tablo 9.6. PU ve SU faaliyet oranına dayalı TNR	114
Tablo 9.7. t_{100} 'de ARSU'nun ödeğeceği fiyat	114
Tablo 9.8. t_{100} 'de ARSUs öznitelikleri	114
Tablo 9.9. PU faaliyet oranına göre TNR.....	119
Tablo 9.10. Simülasyon Parametereleri.....	120
Tablo 9.11. Yoğun olan ve yoğun olmayan saatlere göre kullanıcı sayısı	121
Tablo 9.12. AHP metoduna göre özniteliklerin önem derecesi.....	124
Tablo 9.13. t_2 'de ASU listesi ve öznitelikleri.....	125
Tablo 9.14. t_2 'de servis dışı olacak ASU'lerin sıralaması	125
Tablo 9.15. RSU fiyatlandırma öznitelikleri için çift-bazlı karşılaştırma matrisi	128
Tablo 9.16. RSU fiyatlandırma öznitelikleri için ağırlık değerleri.....	128
Tablo 9.17. Dört farklı ağ durumlarında tutarlılık oranı (CoR)	128
Tablo 9.18. PRSU durum analizi.....	135
Tablo 9.19. IOFCR ve PRMS yöntemlerinin kıyaslaması	136
Tablo 9.20. Ön-Rezervasyon Yönetim Sisteminin zaman karmaşıklığı	139

SEMBOLLER DİZİNİ

FCC	: Federal Communications Commissions (Federal İletişim Komisyonu)
FSA	: Fixed Spectrum Access (Sabit Spektrum Erişimi)
DSA	: Dynamic Spectrum Access (Dinamik Spektrum Erişimi)
SDR	: Software Defined Radio (Yazılım Tasarruflu Radyo)
CRN	: Cognitive Radio Network (Bilişsel Radyo Ağları)
LSA	: Licensed Shared Access (Lisanslı Paylaşımlı Erişim)
SB	: Spectrum Block (Spektrum Bandı)
FSB	: Free SB (Serbest/ kullanılmayan/ Boş Spektrum Bandı)
QoS-DP	: Quality of Service Driven Pricing Policy (Hizmet niteliğine dayalı fiyatlandırma politikası)
PSO	: Particle Swarm Optimization (Parçacık Sürü Optimizasyonu)
RB	: Risk Based Policy (Riske Dayalı Politika)
PB	: Probability Based Policy (Olasılığa Dayalı Politika)
SL	: Service Level Based Policy (Servis Seviyesine Dayalı Politika)
QoE-D	: Quality of Experience Based Decision Policy (Deneyim Kalitesine Dayalı Karar Politikası)
MCDM	: Multi Criteria Decision Making (Çok Ölçütlü Karar Verme)
PU	: Primary User (Birincil Kullanıcı)
SU	: Secondary User (İkincil Kullanıcı)
RSU	: Requesting SU (Boş spektrum bandı talebinde bulunan SU)
ASU	: Active SU (Aktif İkincil Kullanıcı)
RSSI	: Received Signal Strength Indicator (Alınan Sinyal Gücü Göstergesi)
RSRP	: Reference Signal Received Power (Alınan Referans Sinyal Gücü)
RSRQ	: Reference Signal Received Quality (Alınan Referans Sinyal Kalitesi)
SINR	: Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio (Sinyal Gürültü Oranı)
GHz	: Gigahertz
THz	: Terahertz
T	: Total time interval (Toplam zaman aralıklarının sayısı)
t_i	: Time instant (Zaman dilimi)

φ	: Toplam SB sayısı
BR	: Bit oranı (Bitrate)
RH	: Geçmişte reddedilme oranı (Rejected History)
RR	: Anlık reddedilme oranı (Rejected Ratio)
DUR	: Bağlantı oranı (Downlink / Uplink Ratio)
MP	: Hareketlilik modeli (Mobility Pattern)
AVrST	: Ortalama hizmet süresi (Average Sevrice Time)
CC	: Tazminat bedeli (Compensation Cost)
No-Ob	: Fazladan rezervasyon yönteminin uygulanmaması (No Overbooking)
PRB	: LTE ağ teknolojilerine dayalı spektrum bandı (Physical Resource Block)
TNR	: Toplam ağ geliri (Total Net Revenue)

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Elektromanyetik spektrumun 3 Hz - 3000 GHz (3 THz) aralığına düşen frekanslar radyo frekans spektrumu olarak tanımlanır ve sınırlı bir aralıktır. Bu aralıkta yüksek veri hızı ile çok sayıda kullanıcıya çeşitli hizmetler sunabilmek için kaynağın verimli bir şekilde kullanılması gerekmektedir. Bu değerli spektrum bandına olan talep, özellikle son yıllarda kablosuz teknolojilerdeki gelişmeler ve bu alandaki uygulamaların artmasıyla giderek önem kazanmıştır ve hızla artmaktadır. Dünyanın farklı bölgelerinde gerçekleştirilen spektrum ölçümlerinde, radyo spektrumunun belirgin bir miktarının uzamsal ve zamansal alanlarda yeterince kullanılmadığını (under-utilized) gösterilmiştir [1]. Federal İletişim Komisyonu'nun (Federal Communications Commissions, FCC) yayınladığı rapora göre, günün bazı zamanlarında tahsis edilen spektrumdaki boşluk oranı %15 - %85 arasında değişmektedir [2]. Mevcut durumdaki kablosuz ağlarda, birçok farklı uygulamayı ve servisi birbirlerine girişim yaratmayacak şekilde destekleyebilmek için sabit spektrum erişimi (Fixed Spectrum Access, FSA) politikası izlenmektedir. Bu prensiple, mevcut radyo spektrumu gezgin ve sabit servisler, uydu servisleri, radyo ve televizyon yayınları gibi farklı hizmetler için tahsis edilen frekans bandlarına bölünmüştür. Her servis için belli bir bantgenişliği ayrılmış ve lisans sahiplerine uzun süreli olarak tahsis edilmiştir. Birincil kullanıcıların (Primary Users, PUs) kendilerine tahsis edilmiş olan spektrum bandı kullanmadıkları zaman, diğer kullanıcılar (Secondary Users, SUs) için spektrum erişimine izin verilmemektedir. Dolayısıyla, spektrum bandları PU'lar tarafından kısa süreliğine değerlendirildiğinde kullanılmayan zaman dilimi gereksiz yere boş kalmaktadır [3, 4].

Yeni nesil teknolojilerle birlikte sunulan farklı servisler ve artan kullanıcı sayısı ile birlikte, spektrumun belli kısımlarında kıtlık yaşanırken, spektrumun büyük bir kısmında ise yukarıda anlatıldığı gibi verimsiz kullanım söz konusudur [1]. 2010-2020 yılları arasında kullanıcı başına veri miktarı ve ortalama veri hızında öngörülen artışla birlikte, gelecek nesil kablosuz teknolojilerin karşılaştacağı en temel problem, bu talebi karşılayabilecek boş spektrum bandı bulamamak olacaktır. Bu probleme çözüm getirebilmek, spektruma erişimi kolaylaştırmak, daha fazla kullanıcının yararlanmasını ve mümkün olan en fazla verimin elde edilmesini sağlamak amacıyla dinamik spektrum erişim teknikleri geliştirilmiştir. Bu

tekniklerden bir tanesi Bilişsel Radyo (Cognitive Radio, CR) teknolojisidir. Bu teknik, spektrum yetersizliğine getirmiş olduğu çözümlerle verimliliği artıran, kullanıcı sayısına ve servis taleplerine cevap veren, ümit verici ve dikkat çekici gelecek nesil kablosuz teknolojilerden biri olarak karşımıza çıkmaktadır [4].

Gelecekteki spektrum boşluklarını algılayan iletişim tekniklerinin (spectrum aware communications) gerçekleştirilmesine yönelik, [5]'de önerilen CR teknolojisi, etrafındaki Radyo Frekans (RF) ortamını algılayarak spektrumu etkin kullanabilecek bir iletişim teknolojisi haline getirmiştir. Bilişsel radyo iletişimine yönelik FCC'de bir coğrafi konum veritabanı yaklaşımına dayalı lisanssız kullanım için TV spektrumunun önemli kısımlarını kullanıma açmaktır [6-8]. Buna ilişkin olarak dünyanın farklı yerlerinde TV spektrum boşluklarını (TV White Space) verimlileştirme imkanları kullanılmaktadır [9]. TV spektrum boşluk alanından yararlanmak için CR teknolojisini kullanan ilk IEEE standardı IEEE 802.22 olarak belirlenmiştir. Bu konuyla ilgili IEEE 802.22, 54 ve 862 MHz aralığına uyarlanmıştır [6-10].

Son teknik gelişmeleri, örneğin Yazılım Tanımlı Radyo (Software Defined Radio, SDR), geniş bantlı alıcı-vericiler, artan hesaplama gücü (increased computation power) vb. mevcut spektrumun çok dinamik ve uyarlanabilir bir şekilde kullanılmasına imkân vermiştir.

CR terimlerinde, görevli kullanıcılar (Incumbent Users) da denilen birincil kullanıcılar (Primary Users, PUs), spektrumun belirli bir bölümünü kullanma konusunda daha yüksek önceliğe sahip kullanıcılar olarak tanımlanabilir. Diğer taraftan, Bilişsel Kullanıcılar (Cognitive Users) olarak da adlandırılan İkincil Kullanıcılar (Secondary Users, SUs), PUs'ların lisanslı normal erişim haklarına engel olmayacak şekilde spektrumdan yararlanabilirler [11].

CR ağlarında (Cognitive Radio Networks, CRN) spektrum yönetimi, spektrumu kullanma hakkına sahip birincil kullanıcılara engel olmadan, elverişli spektrum bandlarının bulunması ve bunun ikincil kullanıcılar arasında paylaşılması olarak tanımlanabilir [12]. Dolayısıyla, CR Ağlarında etkin spektrum yönetimi (spectrum management) ile spektrum kullanımını en üst düzeye çıkarma, tezin kapsama alanında bulunan güncel konuların başında gelmektedir.

İkincil kullanıcılar için dinamik spektrum erişim teknikleri, bilişsel radyonun en uygun spektrum bandını seçmesine olanak sağlamaktadır. Bunun yapılabilmesi için spektrum sezme/algılamaya yönelik işlevlerin yanı sıra üç temel işlevden daha oluşmaktadır [11- 13]:

1. Spektrum kararı (spectrum decision): Birden fazla spektrum boşluğu olduğunda, bunlardan en uygun olanının İkincil kullanıcılarının istediği servis kalitesine (Quality of Service, QoS) göre seçilmesidir.
2. Spektrum paylaşma (spectrum sharing): Aynı spektrum bandını kullanan İkincil kullanıcılar arasında adil ve etkili bir paylaşım sağlanabilmesidir.
3. Spektrum hareketliliği (spectrum mobility): İkincil kullanıcıların kullandığı spektrum bandlarının gerçek sahiplerinin gelmesi durumunda, spektrum bandını terk etmesi ve mümkün ise başka bir boşluğa geçiş (spectrum handoff) yapabilmesidir.

CR teknolojisinin yanı sıra, Lisanslı Paylaşım Erişim (License Sharing Access, LSA) olarak adlandırılan yeni bir teknoloji, sınırlı sayıda kullanıcı ki en az iki kullanıcı olmalı: Incumbent (spektrum kullanım haklarının geçerli sahibi olan gezgin ağ operatörü (Mobile Network Operator, MNO) ve LSA lisans sahibi (ikincil kullanıcı) arasındaki gelişmiş spektrum paylaşımını mümkün kılmaktadır. Bunun yanı sıra LSA çerçevesi, PU ile bir SU'nun belirli bir yerde ve zamanda spektrumun bir bölümüne ayrı ayrı erişime sahip olduğu spektrum paylaşımına izin verir. CRN ve LSA teknolojileri hakkında Bölüm 2 ve 3'te detaylı bir şekilde bahsedilecektir.

CRN ve LSA çerçevesinde, MNO'ların, ağ kapasitesini arttırmak ve ayrıca PU'lara, ve SU'lara yüksek kullanıcı deneyimi seviyeleri sağlamak için etkin bir spektrum yönetimi stratejisi geliştirmeleri gerekir. Bu konu ile ilgili mevcut çalışmalar Bölüm 1.1.1'de sunulmaktadır.

1.1.1. Mevcut Çalışmalar

FCC tarafından belirtildiği gibi, CR teknolojisi çeşitli senaryolarda kullanılabilir. Bu senaryolardan birincisi, ikincil kullanıcıların spektrum bandına fırsatçılıkla erişebilirliğidir [2]. Burada, kullanıcılar zamansal veya uzamsal olarak çalışan bilişsel radio cihazlarına (Cognitive Radio Devices) sahiptir. Çalışmada verilen bir diğer senaryo, spektrum kullanımının verimliliğini artırmak için bir lisans sahibi tarafından kendi ağında CR'nun kullanılmasıdır.

CRN'ların spektrum yönetimindeki ana konulardan birisi kaynak (spektrum bandı, haberleşme kanalı) atamasıdır. Kim ve arkadaşları tarafından [14], birincil kullanıcılar için QoS kısıtlamaları ve girişim kısıtlamalarına tabi olan kaynak ataması için bir çerçeve

önerilmiştir. Fakat, dinamik spektrum atama için kanal kazancının anında izlenmesi uygulamada çok zor olabileceğinden, sadece kısa vadeli sönüm (short-term fading) için ortalama kanal kazancı düşünülmüştür.

İkincil kullanıcılar arasındaki spektrum eşit dağılımını ve verimliliğini dengede tutmak için, bu çalışmanın [15] yazarları, dinamik spektrum erişimi için birincil öncelikli Markov yaklaşımını (primary-prioritized Markov approach) kullanmışlardır. Birincil ve ikincil kullanıcıların etkileşimlerini sürekli zaman Markov zincirleri (continuous-time Markov chains) olarak modellenmiştir. Ayrıca, ikincil kullanıcıların spektrum bandına erişim hakkı kazanması konusunda Oyun Kuramı (Game Theory) kullanılmıştır. Bir diğer çalışmada [16], herbir ikincil kullanıcının işbirlikçi olmayan bir oyunda (non-cooperative game) oyuncu olarak davranması beklenmiştir. Önerilen fiyat temelli iteratif su doldurma algoritması (price-based iterative water filling algorithm) sayesinde, ikincil kullanıcılar, ağ akışını (network throughput) geliştiren ve güç tüketimini düşüren iyi bir Nash dengesi kurmayı başarmıştır. Ji ve arkadaşları [17], etkin spektrum kullanımı için ikincil kullanıcıların davranışlarını araştırmış ve fiyatlandırmaya dayalı çarpışmaya dayanıklı spektrum ayırma yaklaşımını (pricing-based collusion-resistant spectrum allocation approach) önermiştir. Birincil kullanıcılar ve ikincil kullanıcılar arasındaki spektrum paylaşımı problemi bir oligopol pazarı rekabeti (oligopoly market competition) [18] olarak ele alınmıştır ve ikincil kullanıcılar için spektrum ataması statik bir oyundan elde edilmektedir. Genetik algoritma, kuantum genetik algoritma (quantum genetic algorithm) ve parçacık sürüsü optimizasyonuna (particle swarm optimization) dayalı spektrum ataması yöntemleri [19]'da belirtilmiştir. Burada kanal kullanılabilirliği ve girişim kısıtlamaları hesaba katılmıştır. Birleştirilmiş spektrum ataması algoritması (Aggregation spectrum allocation algorithm) [20] sadece donanım kısıtlamalarını değil, aynı zamanda ikincil kullanıcıların farklı bantgenişliği gereksinimlerini de göz önüne alır. Spektrum dinamizmi göz önünde bulundurularak, CRN'deki açık spektrum bandlarının kullanımını maksimize etmek için ortak bir spektrum ataması ve güç kontrol şeması [21]'de sunulmuştur.

Buraya kadar yapılan çalışmalarda [14-21] araştırmacılar ikincil kullanıcıların bakış açısı temelinde spektrum ataması sorununa dikkat göstererek spektrumu etkin bir şekilde kullanmayı amaçlamışlardır. Bununla birlikte, aşağıda, daha fazla spektrum etkinliği için birincil kullanıcıların davranışına yönelik araştırmalara yer verilmiştir.

Birincil kullanıcıların spektrum paylaşım davranışı, kullanılmayan spektrum bandlarını ikincil kullanıcılara kiralayarak gelirlerini maksimize etme açısından [22]'de ele

alınmıştır. Bu durumla ilgili olarak, yazarlar işbirlikçi oyun kuramına (cooperative game theory) dayalı bir ortak spektrum fiyatlandırması ve spektrum atama algoritması geliştirmişlerdir. Benzer şekilde [23]'de CRN'de ikincil kullanıcılar ve birincil şebeke operatörleri arasındaki ekonomik etkileşimleri incelenmiş; birincil operatörler tarafından gelirin maksimizasyonu iki aşamalı Stackelberg oyunu (two-stage Stackelberg game) ile modellenerek sağlanmıştır. Spektrum atama sorununa "İkinci fiyat, mühürlü teklif müzayedesini" ("A second price, sealed bid auction") mekanizması uygulanmıştır [24]. Her ikincil kullanıcı, iletişim süresine bağlı olarak, spektrum erişimi için teklifte bulunur ve ödeme yapar. [25] bir açık artırma mekanizması sunar; İlk olarak, spektrum fırsatı zaman-frekans aralıklarına bölünür ve ikincisi, zaman-frekans gereksinimlerine göre bir açık artırma şeması geliştirilir.

Açık artırma ve oyun kuramı ile ilgili mekanizmalar dışında, Fazladan Rezervasyon (Overbooking) stratejisi [26], CRN'de spektrum kullanımı ile ilgili umut verici bir gelir yönetimi yaklaşımıdır. Bu yaklaşım, gösterilemeyen rezervasyon (no-show reservation) durumlarının sonucu olan gelir kaybını telafi etmek için bir kaynak sağlayıcı (operator), kapasitesinden daha fazla kullanıcı sayısı kabul etmek adına tanımlanır [27]. Ayrıca, Dağıtım Hissesi Hesaplama (Grid Computing) [28, 29], optik ağlar [30], Bulut Hesaplama (Cloud Computing) [31], finansal marketler [32], pazarlama [33], havayolu [34, 35] ve demiryolu gibi pek çok alanda da kullanılmaktadır [36]. Burada kapasite, lisans alanının sahip olduğu toplam kanal sayısıdır.

Başka bir çalışmada ise [37] fazladan rezervasyon altında spektrum kiralama adına rezervasyon fiyatını belirlemek için bir algoritma önerilmiştir. Li ve arkadaşları [38], ikincil kullanıcıların farklı sınıflara ayrılması ve ikincil ve birincil kullanıcılardan spektrum bantları kiraladığı bir fazladan rezervasyon tabanlı dinamik spektrum yönetimi algoritması geliştirmişlerdir. Bu çalışmada, rezervasyon iptallerinin ve gösterilmemiş rezervasyonların etkilerini analiz etmek için statik fazladan rezervasyon politikalarından (static overbooking policies) biri [39, 40], yani riske dayalı politika (risk based policy) kullanmışlardır. Bununla birlikte, geliştirilen yöntem sadece bir kerelik aralıklarla (one-time interval) yapılan rezervasyonlar ile ilgili olmuştur. Fazladan rezervasyon sınırını ikincil kullanıcıların farklı gösterim oranları (different show rates of SUs) ile belirlenmiştir.

Karar verme (decision-making) stratejileri, spektrum yönetiminde kullanılan yöntemler arasında önemli yere sahiptir. Ayrıca, karar verme MNO'ların spektrum kullanımını kontrol etmesine ve radyo parametrelerini belirlemesine izin veren radyo

spektrum yönetimi sürecinin ana işlevlerinden biridir. Bu anlamda CRN için uyarlanabilir bir karar verme optimizasyon şeması (Adaptive Decision Making Schema, ADMS) önerilmiştir. [41] Uygunluk fonksiyonundaki tüm değişkenler ağ parametreleriyle ilgilidir. Yazarlar, uygunluk fonksiyonundaki parametrelerin ağırlıklarının uyarlanabilir olduğunu belirtmişlerdir; ancak kesin ağırlık uyarlanırlık fonksiyonunun ne olduğu belirtilmemiştir. Bununla birlikte, simülasyon sonuçlarında sabit ağırlıklar kullanılmıştır. Diğer bir çalışmada ise [42], heterojen ağlara verimli Wi-Fi yük boşaltımı (WiFi offloading) için bir bağlantı yönetim platformu uygulanmaktadır. Karar verme sürecinde kullanılan yöntemlerden birisi olan TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution), alternatifler arasından en iyi seçimin yapılmasına imkân tanıyan bir tekniktir. TOPSIS algoritmasında, karar vermek adına iki özellik sıra ile Alınan İşaretin Şiddet Göstergesi (Received Signal Strength Indication, RSSI) ve bağlı kullanıcı sayısı dikkate alınarak kullanılmaktadır. [43] kullanıcıların karar modelini oluşturmak için çok özellikli yarar kuramını kullanarak yeni bir model geliştirmiştir. İlgili model, bir kullanıcının kanal kapasitesi, parasal maliyet ve girişim potansiyeli gibi öznitelikleri dengelemesine olanak tanımaktadır.

Spektrum yönetimi ile ilişkin olarak, [44] CRN'larda spektrum paylaşımı için kuramsal-oyun yaklaşımını kullanan bir fiyatlandırma stratejisi sunmuştur. Rekabette yer alan aktörler birincil hizmetlerdir (primary service). Rekabet, ikincil hizmetlere dinamik erişim sağlamak için gerçekleşir ve her birincil hizmet, kendi kârını maksimize etmeyi amaçlar. Bu anlamda ikincil kullanıcıların veri iletimi, birincil kullanıcılar tarafından belirtilen zaman aralığında birincil kullanıcılara ait spektrum bandını kiralama işlemi gerçekleşmiştir [45]. Ayrıca başka bir çalışmada spektrum erişimi için merkezi olmayan piyasa temelli bir yaklaşım (market-based approach) önermiştir [46]. Adı geçen çalışmadaki iki oyuncu (ikincil kullanıcı), kullanılmayan spektrum bandlarının satıcısı olan birincil kullanıcıdan bir boş spektrum talebinde bulunmaksızın rastlantısal erişebilmeye çalışmıştır. Önerilen yöntemin avantajı, merkezi tekniği kullanan algoritmalara göre daha az karmaşıklığa sahip olmasıdır.

Spektrum yönetiminde fiyatlandırma mekanizmaları ile devam edersek, Yang ve arkadaşları çalışmalarında [47] bir fiyatlandırma şemasının uygulanması için ikincil kullanıcılar arasında adil güç kontrolü sağlamıştır. Geliştirilen algoritma, yalnızca ikincil kullanıcılar tarafındaki servis kalitesini (Quality of Service, QoS) değil, Nash dengesinin de sağlandığı işbirlikçi olmayan bir oyuna dayanmaktadır. [48], CRN'lar için sunulan fiyatlandırma

stratejisi, girişimin (interference) en aza indirilmesi ve ikincil kullanıcıların veri iletim hızlarının maksimize edilmesi için geliştirilmiştir. [49] Birincil ve ikincil kullanıcıları içeren toplam kullanıcı sayısına bağlı ve optimum fiyatların bu kullanıcıların sayısı ile pozitif yönde ilişkili olduğu gösteren bir fiyatlandırma politikası sunmuştur.

Yine konuyla ilgili olan bir diğer çalışmada [50] sunulan fiyatlandırma mekanizması kullanıcıların sayısına bağlı olarak karar verme kuramına dayanmaktadır. Bu çalışmada, spektrum kullanımının ve operatörün gelirinin artırılması hedeflenmiştir. Yang ve ekibi [51] MNO tarafından fiyat teklifleri, bantgenişliği tahsisi ve SU'lar tarafından yapılan servis seçenekleri arasındaki etkileşim CRN'de fiyatlandırma ve kanal tahsis algoritması ile tasarlamıştır. Ayrıca spektrum fiyatlandırmasına yönelik ve spectrumun yıllık geliri ile alakalı farklı rezervasyon yöntemlerinden bahsetmiştir. [52],

Yüksek veri hızına sahip kablosuz ağlardaki fiyatlandırmanın çeşitli yönlerine değinmek için pek çok araştırma yapılmıştır. Bu yönde ele alınan ilk çalışmada, 3G için bir model, QoS'i garanti etmek adına multimedya servis fiyatlandırması sunmuştur. Bundan sonraki çalışmanın [54] yazarları, sabit fiyatlandırma (aynı minimum ve maksimum bantgenişliği gereksinimlerini varsayarak) ağ kaynaklarını boşa harcayarak engelleme (Blocking) ve düşme (Dropping) ihtimallerini artırabileceğini belirtmiştir. Bu nedenle, Ibrahim ve arkadaşları çalışmalarında [54], müşterileri, talep ettiği bantgenişliğine, dinamik Bantgenişliği Pazar Fiyatına (Bandwidth Market Price, BMP) ve QoS düzeylerine (veya tercihlerine) göre ücretlendirir. BMP, bir kbps bantgenişliği kullanarak bir Gbit'lik trafiği iletmek için geçerli olan fiyattır ve ağ bantgenişliği işgali ile sürekli değişir. Belirli bir anda, her müşteri aynı hizmet için aynı BMP'yi ödemektedir. Açıkçası, kullanıcının kullandığı bantgenişliği ne kadar fazlaysa o kadar fazla para ödemek zorundadır. Konuya dair başka bir çalışmada ise [55] LTE (Long Term Evolution) ağ teknolojilerine dayalı dinamik fiyatlandırma ve faturalandırma stratejisi getirilmiştir. Hesaplanan kaynak maliyeti, MNO tarafından belirlenen kullanıcı kategorisine ve tıkanıklık eşiğine göre (users' category and congestion threshold) değişmektedir. Burada kullanıcı kategorisi altın, gümüş ve bronz olarak belirlenmiştir ve kategorilere bağlı olarak farklı fiyatlandırma teknikleri uygulanmıştır. Bu yöntemdeki fiyatlandırma teknikleri ağ gelirinin daha fazla olduğunu göstermek adına farklı fiyatlandırma teknikleriyle [53, 54] kıyaslamalar yapılmıştır. Fakat, bu çalışmada ağ gelirinin artmasıyla kullanıcının memnuniyetini özellikle B tipi kullanıcılardan yoğun saatlerde fazla para alarak sağlamamaktadır. Sonuç olarak, uzun zaman dilimlerinde ağ gelirinin azalmasıyla karşılaşmaktadır.

Kullanıcı önceliği konusunda karar verme stratejileri ile devam edersek, ilgili çalışmaların ilkinde [56], Analitik Hiyerarşi Süreci (Analytic Hierarchy Process, AHP) ile bir karar verme planı önerilmektedir. Çifte kıyaslamalardan (pairwise comparisons) sonra alınan ölçümler, öncelik seviyelerinin türetilmesi için kullanılır. Bu ölçüm düzeyleri, karar ölçütü olarak kullanılır. Çeşitli MCDM yöntemlerinin karşılaştırmasına dair çalışma [57] Stanujkic ve arkadaşları tarafından yapılmıştır. Bir diğer çalışma ise AHP'nin çoklu özelliklerle kullanımıyla bir iletişim bağlantısı kurulması için CRN'lerdeki mevcut en iyi spektrum bandının seçilmesiyle ilgilidir [58].

Son olarak, spektrum el değiştirme (Spectrum handoff) ile alakalı, [59, 60] çalışmalarda bulanık mantık tabanlı analitik hiyerarşi süreci (Fuzzy AHP) metodu tasarlanmıştır. Bu çalışmalar, bulanık küme kuramı kavramını ve hiyerarşik yapı analizini kullanarak bir spektrumun seçimine ve ağırlıklandırılmasına yönelik sistematik yaklaşımları içermektedir. Bu bölümde incelenen son çalışmada [61] ise Markov mekanizması uygulanarak bilişsel ağlarda uyarlanabilir spectrum el değiştirme stratejisini sunmuştur.

1.1.2. Motivasyon

Bölüm 1.1.1.'de belirtilen tüm çalışmalar spektrum yönetimi ile ilgilidir. Bununla birlikte, ilgili çalışmalardan bazılarında enerji verimliliği, güç tüketimi ve girişim gibi konulara ağırlık verilmiştir. Bu çalışmaların birçoğunda kullanıcı istekleri örneğin bantgenişliği talebi göz önünde bulundurulmamıştır. En önemlisi de, birçoğu, kullanıcı memnuniyeti açısından hizmet kalitesi (QoS) ve özellikle deneyim kalitesine (Quality of Experience, QoE) dikkat etmemektedir. Halbuki, yeni uygulamaların geliştirilmesine paralel olarak, iletişim ağlarındaki kullanıcı sayısı önemli ölçüde artmaktadır. Dolayısıyla, ağ operatörlerinin yüksek gelir elde etmelerinin en önemli parametrelerinden biri olan QoE, deneyim kalitesi ve kullanıcı memnuniyeti açısından diğer parametrelere göre daha fazla dikkate alınmalıdır. Bu çalışmada, CR ve LSA teknolojilerine dayalı farklı spektrum bandı yönetim çerçeveleri tasarlayarak, kullanıcıların memnuniyetini artırmak ve buna ilişkin olarak ağ performansının en önemli parametrelerinden etkin spektrum kullanımını sağlamak ve ağ gelirini optimize etmek hedeflenmiştir. Bu amaç için, ilk adımda, CR ve LSA teknolojilerini kullanarak, spektrumun ikincil kullanıcılara rezervasyon yönetimi fazladan rezervasyon (Overbooking) yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Bu çerçevede, farklı fiyatlandırma ve ret politikaları uygulayarak ağ performansı ayrıntılandırılmıştır. İkinci

aşamada, karar temelli bir yapıda spektrum el değiştirme (spectrum handoff) stratejisi önerilmiştir. Böylelikle, hizmet reddini (Denial of Service, DoS) ortadan kaldırırken kullanıcı memnuniyetini, ayrıca MNO kazanç miktarını optimize etme imkânı sunulmuştur. Bu duruma ilişkin, tez, iki ana bölümden oluşmaktadır.

Tezin ilk bölümünde spektrum seçme teknikleri üzerinde durulmaktadır. CR ve LSA teknolojilerine dayanarak ağ ve ikincil kullanıcıların çeşitli parametrelerini göz önünde bulundurarak (örneğin, veri hızı, bantgenişliği, zaman dilimi, ağ yoğunluğu, RSSI, kullanıcı geçmişi, vs.) elverişli spektrum seçme teknikleri tasarlanmıştır. Seçilen spektrum, ağ ve kullanıcı parametrelerine bağlı olarak ve ayrıca QoS ve QoE'i göz önünde bulundurarak ikincil kullanıcılara tahsis edilen spektrum bandları için uygun bir fiyatlandırma politikası uygulanmıştır. Bunun yanı sıra, spektrum verimliliğini artırmak için iki farklı temel yöntemin üzerinde durulmuştur. Birincisi fazladan rezervasyon (Overbooking) ve ikincisi ön rezervasyon (Pre-reservation) olarak adlandırılmıştır. Fazladan rezervasyon yönteminde fazladan spektrum satma imkanı MNO tarafından sunulurken, spektrum kullanımının artması sağlanmıştır. Spektrum kullanımının artması ile birlikte ağ gelirini artırmak için riske dayalı (Risk based), olasılığa dayalı (Probability based) ve servis seviyesine dayalı (Service Level based) üç farklı politika önerilmiştir. Risk oranını kontrol altına almak için parçacık sürü optimizasyonu (Particle Swarm Optimization, PSO) kullanılmıştır.

Kullanıcılara sürekli memnuniyet sağlamak ve daimi müşteri haline getirmek adına gelecekteki planlara dayalı olarak ikincil kullanıcılara geçici surette ön rezervasyon şansı verilmektedir. Bu aşamada, sözleşmeye-dayalı (contract-based) LSA paylaşım kuralları istihdam edilmiştir. Ön rezervasyon, farklı kullanıcı kategorilerine göre öncelik verme sistemine dayanarak sunulmaktadır. Ayrıca, ağdaki spektrum kullanım yoğunluğu, yoğun olan ve yoğun olmayan saatler olarak iki farklı kategoride ele alınmıştır. İki farklı kategorinin, MNO'nun kararına bağlı olarak, spektrum yönetim çerçevesinde farklı oranlarda etkisi vardır. MNO'nun spektrum tahsisine karar verme aşamasında, çok ölçütlü karar verme (Multi Criteria Decision Making, MCDM) yöntemi kullanılmıştır. Sabit (Fixed), esnek (Flexible), uyarlanır (Adaptive) ve QoS'e odaklı (QoS-Driven) olmak üzere dört farklı fiyatlandırma politikalarıyla, fazladan rezervasyon ve ön rezervasyon stratejileri, MCDM yöntemiyle beraber kullanılmıştır. Adı geçen tekniklerin ağ performansını artırmak adına, yoğunluk kategorisine dayalı dinamik anahtarlama sistemi (Dynamic Switch System) uygulanmıştır. Tüm bu yöntemler genel bir dinamik çerçeve altına alınarak sistem performansı analiz edilmiştir. Fakat fazladan rezervasyon spektrum yönetim çerçevesinde,

dinamik anahtarlama sistemi kullanılmasına rağmen yoğun olan saatler kategorisinde, birincil kullanıcıların aktif olmasıyla birlikte ikincil kullanıcıların devre dışı olması, tazminat bedeli (Compensation Cost, CC) ödenmesi, ve peşinden QoE'nin düşmesine neden olacaktır. MNO böyle bir durum ile karşılaştığında spektrum el değişime yöntemini devreye sokmaktadır.

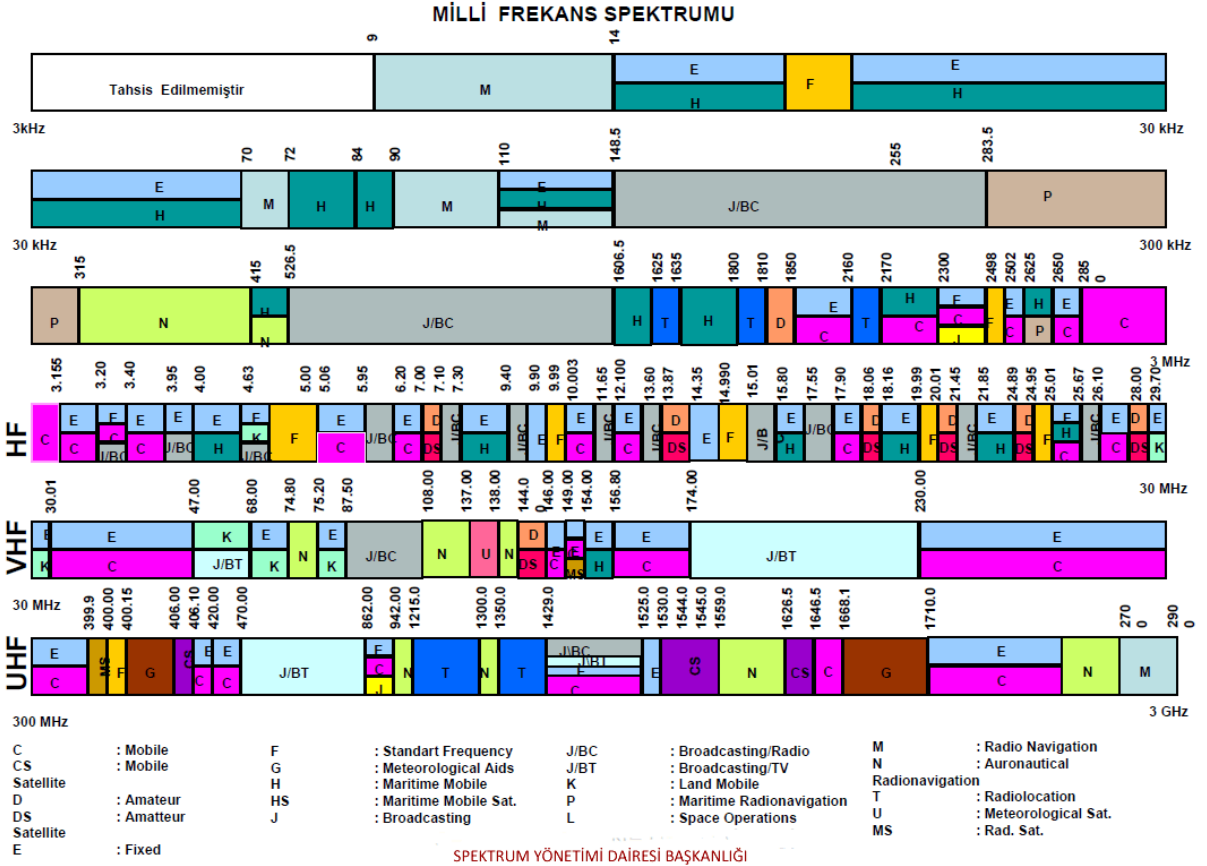
Spektrum bandının gerçek sahibi (birincil kullanıcılar) geldiğinde ikinci kullanıcılar spektrum bandını terk etmek mecburiyetindedir. Bir önceki aşamada, atılan aktif ikincil kullanıcılara (Active Secondary User, ASU) tazminat bedeli MNO tarafından ödenmektedir. Fakat, ifade edildiği gibi birincil kullanıcının spektrum kullanımının yoğun olduğu saatlerde fazla oranda ASU spektrumdan çıkartılacaktır. Çıkartılan ASU'lara zorunlu olarak ödenecek tazminat bedeli de ağ gelirini yüksek oranda etkileyecektir. Bu yüzden spektrum hareketliliği (spectrum moving) işlevinin uygulanmasına karar verilmiştir. MNO spektrumların boş veya dolu olduğuna dair an be an CR ve LSA teknolojisi sayesinde haberdar olduğu için, ASU'ların farklı parametrelerini göz önünde bulundurarak uygun ASU'ların boş spektruma atanma teknikleri karar verme mekanizmaları aracılığıyla sunulmaktadır. Tüm bahsedilen yöntemler Brno University of Technology (BUT), LTE-A 3GPP test yatağı üzerinde uygulanmıştır. Simülasyon sonuçlarının gösterdiği gibi ortalama hizmet süresi, verimli spektrum kullanımı, toplam ağ gelirinin artması ile birlikte hem MNO hem de kullanıcıların memnuniyetini sağlanmaktadır.

2. BİLİŞSEL RADYO AĞLARI

Kablosuz iletişim sistemleri için gerekli olan frekans spektrumu doğal olarak kısıtlı ve oldukça değerli bir kaynaktır. Birçok ülkede mevcut spektrum bandları neredeyse tamamen tahsis edilmiş ve spektrum kıtlığı problemi kendini göstermeye başlamıştır [11]. Türkiye’de spektrum bandı tahsis etme işleminin dağılımı Şekil 2.1’de verilmiştir. Dünya ölçeğinde spektrumun kullanımına ilişkin uluslararası koordinasyon ve yükümlülükler Uluslararası Telekomünikasyon Birliği (International Telecommunication Union, ITU) tarafından belirlenmektedir [62]. Bunun yanı sıra bölgesel koordinasyon için bölge ülkelerinin oluşturduğu Avrupa Haberleşme Komisyonu (European Communication Commission, ECC) ve ABD'nin eyaletler arası ve uluslararası radyo, televizyon, telefon, uydu ve kablo iletişimini denetleyen bağımsız bir devlet dairesi olan Federal İletişim Komisyonu’nun (Federal Communications Commissions - FCC) tarafından sağlanmaktadır [63].

Spektrum kıtlığına neden olan temel faktör, statik spektrum bandı kullanımı ve esnek olmayan atama nedeniyle spektrumun verimsiz kullanımudur. Mevcut durumdaki kablosuz ağlarda birçok farklı uygulama ve servis, birbirlerine girişim yaratmayacak şekilde kullanıcıları destekleyebilmek için sabit spektrum erişimi (Fixed Spectrum Access, FSA) tekniği izlemektedir. Böylelikle sadece lisanslı kullanıcılar kendilerine tahsis edilmiş bandı kullanabilirken, spektrum bandı boş olsa dahi tanımlı olmayan diğer kullanıcıların bandı kullanmasına izin verilmemektedir [3, 4].

Bu probleme çözüm getirebilmek, spektruma erişimi kolaylaştırmak, spektrum bandlarından daha fazla kullanıcının yararlanmasını ve mümkün olan en fazla verimin elde edilmesini sağlamak amacıyla dinamik spektrum erişim teknikleri (Dynamic Spectrum Access, DSA) geliştirilmiştir. Bu tekniklere imkân veren Bilişsel Radyo (Cognitive Radio, CR), spektrum yetersizliğine sunmuş olduğu çözümlerle verimliliği artırabilecek, artan kullanıcı sayısı ve servis taleplerini karşılayabilecek olması nedeniyle, gelecek nesil kablosuz teknolojilerden biri olarak karşımıza çıkmaktadır [4].



Şekil 2.1. Spektrum tahsisi [62]

Bilişsel radyo, radyo ortamının farkında olan, ortam ile etkileşimine bağlı olarak girişimi önlemek ve iletim hızını artırmak amacıyla verici parametrelerini (frekans bandı, verici gücü, modülasyon tipi gibi) dinamik olarak değiştirebilen akıllı bir kablosuz haberleşme sistemi olarak tanımlanmaktadır [64]. Bilişsel radyo kavramı ilk olarak 1999 yılında Joseph Mitola ve Gerald Q. Maguire [65] tarafından ortaya atılmıştır ve bu kavramın sonucu olarak kablosuz bölgesel alan ağlarında (Wireless Regional Area Networks, WRAN) bilişsel radyonun kullanımını hedefleyen IEEE 802.22 standardı geliştirilmiştir.

Bilişsel radyo teknolojisi sayesinde mevcut lisanslı spektrumlar lisanslı kullanıcılar tarafından kullanılmadıkları zaman, ikinci kullanıcılar spektrum bandına erişim hakkı kazanmaktadır. Spektrum bantları yeniden kullanıma olanak sağlayan bilişsel radyo, spektrum sezme ve ölçme teknikleriyle kullanılmayan spektrumların tespitini yaparak dinamik spektrum erişimine olanak sağlamaktadır. Dolayısıyla, lisanssız kullanıcıların spektrumdan faydalanmasına imkân sağlayarak, sınırlı olan mevcut bant genişliğinin en etkin biçimde kullanılmasında ve spektrum verimliliğinin artırılmasında önemli rol oynamaktadır.

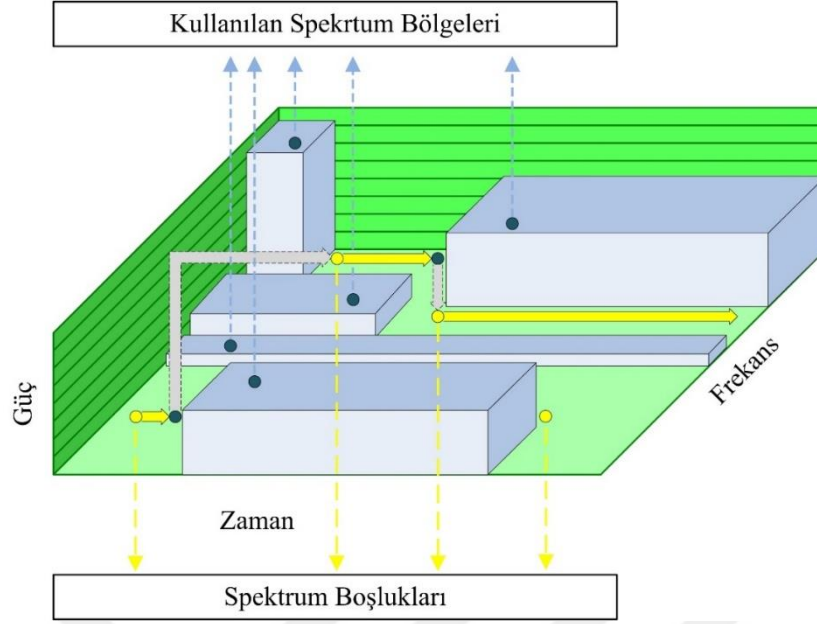
Bilişsel radyo ağları (CRN), farklı yapıda kablosuz ağ mimarisi ve dinamik spektrum erişim teknikleriyle kullanıcılara yüksek bantgenişliği sunmayı hedeflemektedir. Ancak, mevcut spektrum kullanımındaki hızlı değişimler ve farklı servisler için servis kalitesi (Quality of Service, QoS) gereksinimleri bilişsel radyonun karşılaştığı zorluklardır. Bu zorluklarla başa çıkabilmek için bilişsel radyo ağındaki her kullanıcı aşağıdaki görevleri yerine getirmek zorundadır [66]:

- Spektrumda uygun durumda bulunan frekans bandlarını tespit etmek,
- Uygun olan en iyi spektrum bandı seçmek,
- Diğer kullanıcılar ile birlikte spektrum bandı erişimini koordine etmek,
- Lisanslı kullanıcı tespit edildiğinde spektrum bandı terk etmek.

Spektrum yönetimindeki işlevler; spektrum sezme, spektruma karar verme, spektrum paylaşımı ve spektrum hareketliliği, sırasıyla bu dört maddeye karşılık gelmektedir.

Bilişsel radyoda PU ve SU kavramları, lisanslı ve lisanssız kullanıcıları belirtmek için kullanılmaktadır. PU, lisanslı spektrumun sahibi olan kullanıcıları ifade ederken, SU ise PU'nun etkin olmadığı zamanlarda lisanslı spektrum üzerinden haberleşme sağlayan lisanssız kullanıcıları belirtmektedir. SU'lar birincil kullanıcılar aktif olduğunda spektrum bandı boşaltmak zorundadırlar [67].

Bilişsel radyonun iki temel özelliği, bilişsel kabiliyet ve yeniden yapılandırılabilirlik. Bilişsel kabiliyet, radyo ortamıyla gerçek zamanlı etkileşim sonucu belirli bir anda kullanılmayan spektrum bandlarını tespit etmek anlamına gelmektedir. Şekil 2.2'de görüldüğü gibi bilişsel radyo, spektrum boşluğu (spectrum hole) olarak adlandırılan belli bir anda, belli bir yerde birincil kullanıcılar tarafından kullanılmayan bandları tespit eder ve en iyi spektrumunu seçerek lisanslı kullanıcılara girişim yaratmadan spektrumdan yararlanır. Yeniden yapılandırılabilirlik özelliği ise, bilişsel radyonun çeşitli frekanslarda çalışacak ve farklı erişim teknikleri kullanacak şekilde programlanabilmesi, bu sayede en uygun spektrumun ve parametrelerin belirlenmesi, yeniden ayarlanabilmesidir. Bunu sağlayan ise, bilişsel radyonun üzerine kurulu olduğu yazılım tanımlı radyodur (Software Defined Radio, SDR) [66, 67].



Şekil 2.2. Spektrum boşlukları ve dinamik spektrum erişimi

2.1. Bilişsel Radyo İşlevleri

Bilişsel radyonun dört temel fonksiyonu vardır:

- Spektrum sezme (algılama)
- Spektrum yönetimi (spektrum kararı)
- Spektrum paylaşımı
- Spektrum hareketliliği

Yukarıda anlatılanların ışığında bilişsel radyo, bulunduğu farklı ortamlarla etkileşim içinde olabilen ve iletim parametrelerini değiştirebilen radyodur. Bu tanımdan yararlanarak bilişsel radyonun iki temel özelliğini aşağıdaki gibi verilebilir:

1. Bilişsel yeteneği: Dinamik radyo ortamına uyum sağlamak için ortamını gerçek zamanlı olarak takip edebilme ve uygun iletişim parametrelerine karar verebilme yeteneğidir. Spektrum çevriminin temel adımları aşağıdaki gibi verilebilir:
 - Spektrum sezme: Bilişsel radyo uygun spektrum bandlarını izleyebilmeli, bu bandlardan bilgi edinebilmeli ve böylece spektrum boşluklarını algılayabilmelidir.
 - Spektrum analizi: Spektrum sezme aşamasında elde edilen spektrum boşluklarının karakteristiklerini değerlendirebilmelidir.

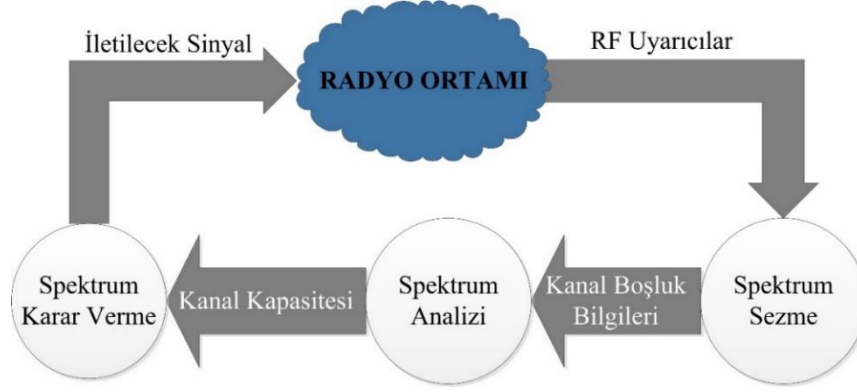
- Spektrum karar verme: Sonuçta, spektrumların karakteristiklerine ve kullanıcıların ihtiyaçlarına göre en uygun spektrum bandına karar verilmelidir.
2. Yeniden ayarlanabilirliği: Donanım elemanlarında herhangi bir değişim gerçekleştirilmeden farklı frekanslara geçildiğinde çalışma parametrelerini otomatik olarak ayarlayabilme yeteneğidir. Yeniden ayarlanabilecek parametreler şunlardır:
- Çalışma frekansı: Bilişsel radyolar buldukları radyo ortamlarına göre en uygun frekans kanalını seçebilir ve çalışma frekanslarını değiştirebilir.
 - Modülasyon: Kullanıcı gereksinimleri ve kanal durumuna göre kullandıkları modülasyon tekniğini (örneğin: BPSK (İkili Faz Kaydırmalı Anahtarlama), QPSK (Karesel Faz Kaydırmalı Anahtarlama), ve QAM (Karesel Genlik Modülasyonu)) değiştirebilirler. Böylece daha yüksek verim sağlayacak ve daha az bit hata oranı verecek tekniği seçebilirler.

Basit bir modelleme ile bilişsel işlemlerinin döngüdü bilişsel çevrimi olarak Şekil 2.3'de gösterildiği gibi sezme, analiz, karar verme döngüsünden oluşmaktadır.

2.1.1. Spektrum Sezme

Güvenilir spektrum sezme bilişsel radyo için çok kritik bir öneme sahiptir. Spektrum sezmede amaç, spektrumda periyodik olarak algılama yapılması lisanslı kullanıcıların hareketliliğini ve spektrumun durumunu incelemektir. Bilişsel radyo, kullanılmayan spektrum bandları ve lisanslı spektrum boşluklarını tespit ederek birincil kullanıcılara girişim yapmadan spektruma erişim yöntemlerini belirlemektedir.

Spektrum sezmede birincil kullanıcı işaretlerini algılamadaki en temel zorluk ortamın gürültülü olmasıdır. En uygun spektrum sezme tekniğini belirlemede, ölçümlerin hızı ve doğruluğu en temel iki ölçüttür. Doğruluğu belirleyen etkenler ise, frekans çözünürlüğü ve tahmin edilen gücün doğruluğudur. Frekans çözünürlüğü yüksek olan ve komşu frekanslardan kaynaklanan girişimleri azaltacak şekilde, daha doğru güç tahmini yapılmaktadır.



Şekil 2.3. Bilişsel çevrimi [11]

Spektrum sezme işlemi merkezi ya da dağıtık biçimde yapılabilmektedir. Merkezi spektrum sezmede, merkezi erişim noktası (örneğin baz istasyonu) hedeflenen frekans bandını sezer ve elde ettiği bilgiyi ağdaki diğer kullanıcılarla paylaşır. Bu yapıda tüm sezme işlevleri merkezi noktadan yapıldığından, kullanıcı terminallerinin karmaşıklığı azalmaktadır. Ancak, merkezi erişim noktası hücre kenarında yer alan SU'yu tespit edemeyebilir. Dağıtık spektrum sezmede ise, her bir SU spektrum sezme işlemini bağımsız olarak gerçekleştirir. Elde edilen bu spektrum sezme bilgisini her kullanıcı kendisi kullanabilir (işbirlikli olmayan yapı) veya diğer bilişsel radyo kullanıcıları ile paylaşabilir (işbirlikli yapı) [68].

2.1.2. Spektrum Yönetimi

Bilişsel radyo ağları, kullanılan uygulamaların QoS ihtiyaçlarına göre uygun bandların arasından en iyisini seçebilmelidir. Spektrum yönetimi (spektrum kararı), kanal özellikleri (girişim, yol kaybı, telsiz bağlantı hataları ve bağlantı katmanı gecikmesi) ve birincil kullanıcıların işlemleriyle yakından alakalıdır. Buna ek olarak, spektrum kararı diğer CR kullanıcılarının faaliyetlerinden de etkilenir [66].

Spektrum kararı iki aşamadan oluşur. İlk olarak, her bir spektrum bandı sadece CR kullanıcılarının gözlemlerine göre değil ayrıca birincil ağların istatistiksel bilgilerine göre analiz edilmektedir. Daha sonra da bu bilgilere göre en uygun spektrum bandı seçilmektedir.

Spektruma karar vermede karşılaşılan zorluklardan birincisi Sinyal-Gürültü Oranı (SNR) bilgisi kullanılarak spektrum kapasitesi kestiriminin yetersiz kalmasıdır. İkinci zorluk ise karar verme işleminin lisanslı ve lisanssız bandlarda çalışması gerekliliğidir.

2.1.3. Spektrum Paylaşımı

Radyo kanalının paylaşımı doğası nedeniyle bilişsel radyo kullanıcıları koordine edilmelidir. Spektrum paylaşımına dört açıdan bakabiliriz [66]:

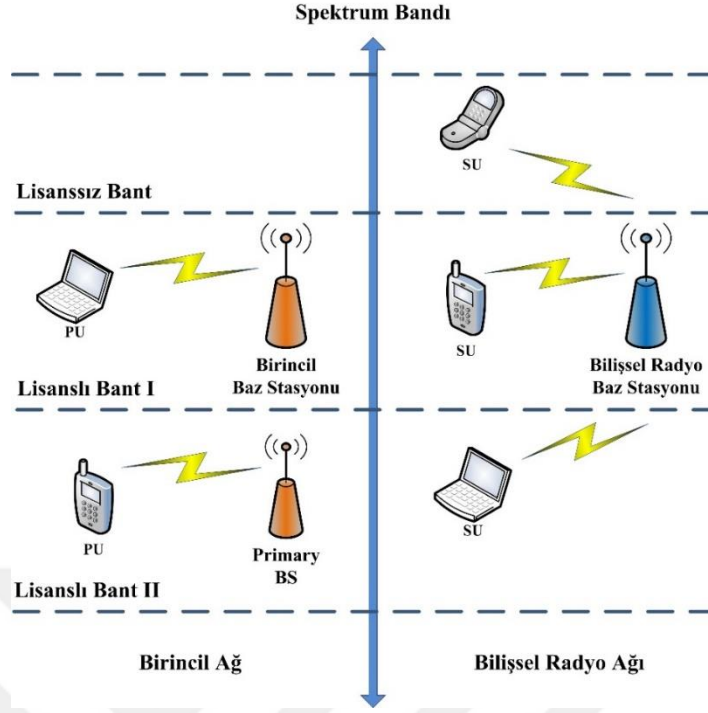
1. Mimari: Spektrum atama, merkezi veya dağıtımli olabilir. Merkezi atama yönteminde baz istasyonu bilişsel radyo kullanıcılarına frekans atamasını gerçekleştirir.

Dağıtımli yapıda ise spektruma erişim, her bir kullanıcı tarafından yerel ilkeler göz önünde bulundurularak yapılmaktadır. Kablosuz bilişsel radyo ağ ortamı Şekil 2.4'de; merkezi yapıda birincil ağ ve ikincil ağın bulunduğu bir bilişsel radyo ağ ortamı görülmektedir. Merkezi yapıda olan bilişsel radyo ağları, bilişsel radyo erişim noktasının ikincil kullanıcıların haberleşmelerini kontrol ettiği ve düzenlediği ağ yapıları olarak tanımlanmaktadır [69].

Bilişsel radyo erişim noktası ikincil kullanıcılar tarafından sağlanan spektrumla ilgili verileri toplayarak lisanslı ve lisanssız spektrum bandlarındaki ikincil kullanıcı haberleşmelerini yönetmektedir. Elde edilen verilere göre, erişim noktası tüm kullanıcılar için spektrum erişim kararları almaktadır.

Merkezi yapıdaki bilişsel radyo ağlarının ilk örneği olarak IEEE 802.22 standardı görülmektedir [70]. IEEE 802.22 standardı, kullanılmayan radyo ve televizyon bandlarında bulunan spektrum boşluklarındaki (TV beyaz boşluklar) iletişim tekniğinin özelliklerini ortaya çıkarmaktadır.

2. Spektrum atama: İşbirlikçi çözümler için bir kullanıcının diğer kullanıcılara olan girişim ölçümlerinden faydalanır. Bu modellerde kullanılan genel yöntem hücrese yapıların girişim bilgisini bölgesel olarak paylaşmasını sağlamaktır. Bu işlem merkezi ve dağıtımli modeller arasında etkili bir şekilde denge oluşmasını sağlar. İşbirlikçi olmayan sistemlerde sadece tek bir kullanıcı göze alınmaktadır. Diğer bilişsel radyo kullanıcılarının girişimi göz önüne alınmaz ve bu şekilde spektrum kullanımı azalır. İşbirlikçi yapılar genel olarak işbirlikçi olmayanlara göre üstünlük sağlar. İşbirlikçilik daha adaletli bir sistem ve yüksek kazanç sağlar. Diğer bir yandan işbirlikçi olmayan yaklaşımlarda daha az bilgi paylaşımı olacağından enerji tüketimi düşüktür.



Şekil 2.4. Kablosuz bilişsel radio ağ ortamı

3. Spektrum erişim tekniği: Overlay ve Underlay spektrum paylaşım teknikleri olarak ikiye ayrılır. Overlay paylaşımında, kullanıcılar ağa ulaşmak için spektrumda birincil kullanıcıların kullanmadığı kısımları kullanır. Bu durum birincil ağda girişimi azaltır. Underlay spektrum paylaşımında ise yayılı spektrum tekniklerinden faydalanılır. Örneğin, bilişsel radyo kullanıcısının iletimi PU tarafından gürültü gibi algılanır.

4. Faaliyet alanı: Her bir bilişsel radyo ağ içindeki spektrum erişiminin düzenlenmesi ağ içi (*intra network*) spektrum paylaşımı yöntemleri ile yapılır. Ağ arası (*inter network*) spektrum paylaşımında bilişsel radyo mimarisi, birçok sistemin örtüşen bölgelere ve spektruma yerleştirilmesine olanak sağlar.

Spektrum paylaşımında karşılaşılan zorluklardan ilki, birçok spektrum paylaşımı işlemini kolaylaştıracak olan ortak kontrol kanalının, birincil kullanıcının bu kanalı seçtiğinde kanalı boşaltmak zorunda olmasıdır. İkinci zorluk, iletim gücü ve çalışma frekansı arasındaki bağıllık nedeniyle çalışma frekansı değiştiğinde kullanıcının komşularının da değişmesidir. Üçüncü zorluk ise, SU'lar, birincil kullanıcıların konumunu ve iletim gücünü bilmelerinden dolayı girişimin hesaplandığını varsaymaktır. Ancak girişim ikincil ağlarda her zaman hesaplanamamaktadır.

2.1.4. Spektrum Hareketliliği

Spektrum hareketliliğinde (spectrum handoff) amaç, spektrum bandları sıklıkla değişirken kesintisiz bağlantının sürdürülmesini sağlamaktır. Bilişsel radyo en uygun spektrum bandı yakaladıktan sonra seçilen band'daki birincil kullanıcıların farklı spektrum bandlarda faaliyetlerine devam etmeleri gerekebilir. Bu duruma spektrum hareketliliği denir. Bilişsel radyo kullanıcısı çalışma frekansını her değiştirdiğinde, ağ protokolleri o çalışma parametrelerine göre değişiklik gerektirebilir. Bilişsel radyo ağlarındaki spektrum hareketliliği yönetiminin amacı, spektrum el değiştirmeleri sırasında hızlı ve düzgün bir geçiş sağlayarak başarım düşüşünü azaltmaktır. Hareketlilik yönetim protokollerinin önemli ihtiyaçlarından biri el değiştirme süresi bilgisidir. Bu bilgi sezme algoritmaları tarafından sağlanabilir.

Spektrum hareketliliğinde karşılaşılan zorluklardan ilki, uygun spektrum bandlar zamanla değiştiğinden dolayı istenen seviyede QoS sağlanamamasıdır. İkinci olarak, uygun bandlar kullanıcıların bir yerden başka bir yere gitmesiyle değişmesidir. Bu yüzden sürekli spektrum ataması yapmak büyük bir gecikme oluşturmaktadır.

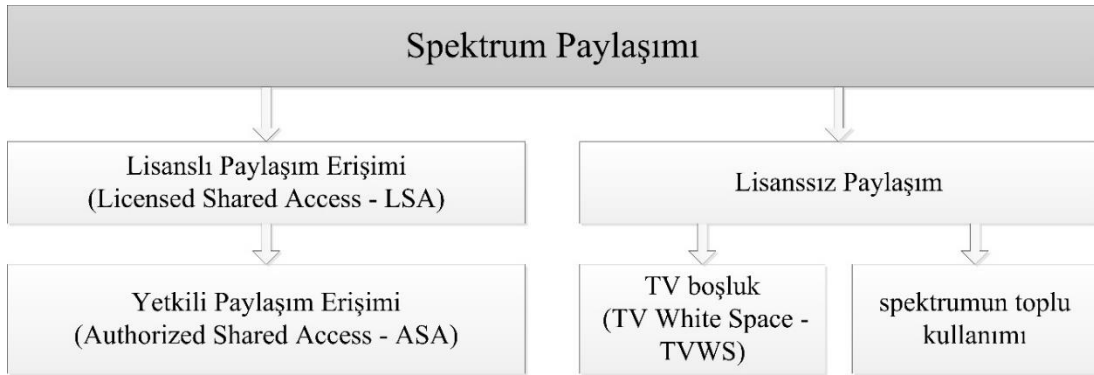
3. LİSANSLI PAYLAŞIMLI ERİŞİM

3.1. Spektrum Paylaşım Modeli

Spektrum paylaşım yaklaşımı, genel olarak, iki veya daha fazla kullanıcının aynı frekans bandını kullandıklarında söz konusudur. Spektrum paylaşım yaklaşımları genellikle lisanslı ve lisanssız paylaşım yaklaşımlarına ayrılabilir (Şekil 3.1) [71].

Geçmişte spektrum paylaşım ağırlıklı olarak lisanssız erişime odaklıydı. Kullanıcıların anlaşmaya dayalı kuralları ve koşulları takip etmeleri gerekmektedir. Ancak işlemler için lisansa gereksinim duyulmamaktaydı. Tanımlanmış görevli yelpazedeki kullanıcıların hakları korumaya ihtiyaç duyulmaktaydı, ancak kendi kullanıcıları zararlı girişimlerden korunamamaktaydı [72, 73].

Lisanslı Paylaşımli erişim (Licensed Shared Access – LSA) kavramı lisanslı paylaşım yaklaşımının bir örneğidir. LSA kavramı Avrupa Komisyonu (European Commission - EC) Radyo Spektrum Politikası Grubu tarafından tanımlanmış [74] ve Avrupa Düzenleyicileri (European Regulators) tarafından detaylı olarak analiz edilmiştir [75]. LSA kavramı, lisanslı bir temelde diğer görevli veya görevlilere atanan frekans bandına yeni bir radyo iletişim sisteminin getirilmesini sağlamaktadır. Bireysel LSA lisansları sınırlı sayıda LSA lisans alanına verilmektedir.



Şekil 3.1. Spektrum paylaşım çeşitleri

Paylaşım kuralları, hem LSA lisans sahipleri hem de görevdeki kişilerin, kontrollü bir girişim ortamında operasyonlarına devam etmesini ve kullanıcılarına tahmin edilebilir

hizmet kalitesi (QoS) sağlamaktadır. LSA lisansı, spektrum bandını, lisans süresini ve paylaşım için bir coğrafi alanı tanımlar. LSA'in en önemli yararı, spektrumun daha verimli kullanılmasını sağlaması ve ilgili tüm hizmetlerin haklarını garanti altına alırken uzun süren spektrumun yeniden kullanım (Refarming) sürecine alternatif bir seçenek sunmasıdır.

LSA teknolojiindeki kilit paydaşlar, Şekil 3.2'de gösterildiği gibi, spektrum regülatörü (MNO) (spectrum regulator), görevli spektrum kullanıcısı (PU) (incumbent spectrum user) ve LSA lisans sahibi (LSA licensee veya SU) olarak tanımlanmıştır. Görevli ve LSA lisans sahibi arasındaki paylaşım sözleşmesi, regülatörün yönetimi altında uygulanmaktadır. Regülatör, paylaşım çerçevesini, kuralları ve koşulları tanımlamakla birlikte LSA lisans alanına ruhsat vermekle yükümlüdür. Görevli spektrum kullanıcısı, LSA teknoloji dahilinde lisans süresi ve coğrafi alanla paylaşımında kullanılacak spektrumunun bölümünü tanımlamalıdır.

LSA kavramının kökeni yetkili paylaşımlı erişim (Authorised Shared Access - ASA) teknolojisindedir. Başlangıçta bir endüstri konsorsiyumu tarafından lisanslama düzenlemesi altında Uluslararası Mobil Telekomünikasyon (International Mobile Telecommunication - IMT) spektrumuna paylaşımlı erişim sağlamayı amaçlayan çalışmaya teklif edilmiştir [76]. Avrupa'da IMT için belirli bandlar, ör. 2.3-2.4 GHz band, ülkeden ülkeye farklı görevliler tarafından zaten kullanılmaktadır.

Bu bandları veya hatta bir bölümünü mobil şebeke operatörleri (MNO'lar) için uyumlu bir hale getirme imkânı yoktur. Bu nedenle ASA, MNO'nun IMT spektrumunu ortak bir şekilde kullanılmasına ve öngörülebilir QoS ile hizmet sunmasına izin vermek için bir araç olarak önerilmiştir.

3.1.1. LSA Mimarisi

Bir LSA mimarisinde (i) görevli (PU), (ii) LSA lisans sahibi (SU) ve (iii) MNO olmak üzere üç farklı unsur bulunmaktadır (Şekil 3.2).

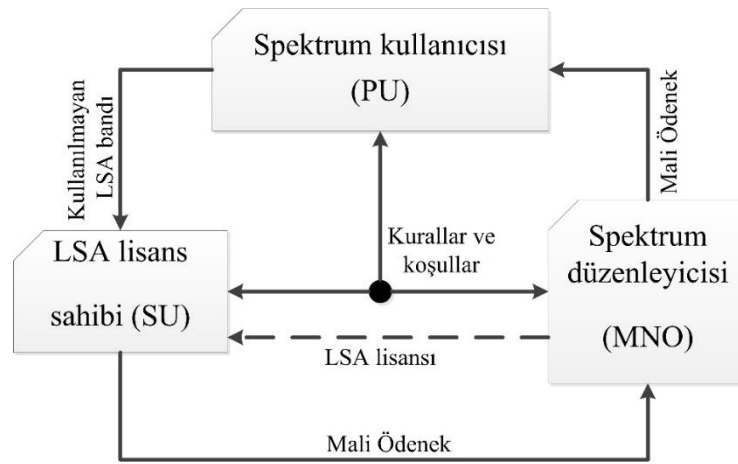
- Görevli (PU), paylaşım düzenlemesinin oluşturulması sürecinde resmileştirilmiş veya ruhsatlandırılmış spektruma sahiptir. PU, lisans / erişim haklarının koşullarına uymak zorundadır.

- LSA lisans sahibi (SU), uzun vadeli spektrum bandlarını kullanmaya yetkilidir. Kiralanan yelpazeyi kullanırken SU mevcut görevliyle (PU) olan lisans / sözleşme şartlarına uymak zorundadır.

LSA teknolojiinin uygulanması için, geleneksel hücresel mimarinin üstünde, LSA Denetleyicisi (Controller) ve LSA bilgi havuzu yöneticisi (Repository) olmak üzere iki yeni kavram gerekmektedir [77, 78].

LSA Repository, LSA spektrum bandlarının kullanım koşullarıyla ilgili güncel bilgileri içeren bir veritabanıdır. PU, SU ve LSA Controller arasındaki arabirim görevini LSA Repository görür. LSA Repository, görevdeki kişilerin spektrum kullanımı hakkındaki verileri toplayıp yönetir. Kuruluş, ekipman, lisanslar, zaman, yer, sıklık ve görevdeki kullanımın türü hakkında bilgi içerir (organization, equipment, licenses, time, location, frequency, and type of the incumbent usage).

LSA Kontrol Cihazı, MNO'ya mevcut spektrum bandları hakkında bilgi sağlamak ve spektruma erişmek için kullanılan bir araçtır. LSA Denetleyicisi, belirli konum için kullanılabilir frekansları ister. Frekanslar, LTE baz istasyonu için belirtilen alanın çevresindeki belli bir dairesel alanının LSA lisansına izin verileceği şekilde tahsis edilir. MNO, ağını ve spektrum kaynaklarını talebe göre etkin bir şekilde yönetmek için, LSA Denetleyicisi ağ yönetim işlevselliğinden (network management functionality, OAM) ağ ile ilgili gerekli tüm bilgileri alır.



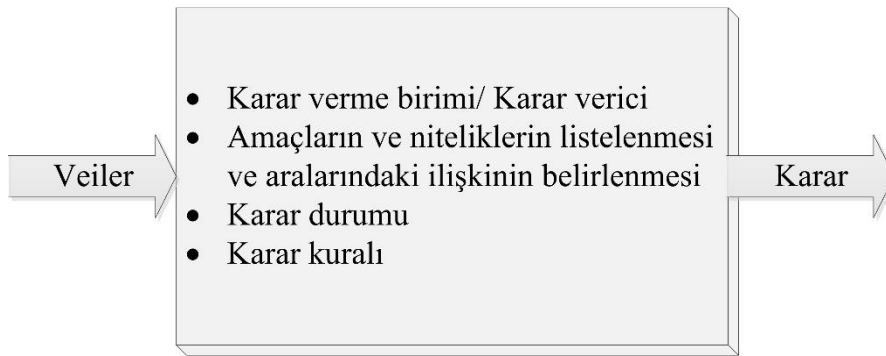
Şekil 3.2. LSA mimarisi [79]

4. GENEL YÖNETİM TEKNİKLERİ

Rezervasyon işlemlerinin çoğu, zaman aralığına (t_i) dayanarak gerçekleştirilir. Her zaman diliminde, ikincil kullanıcının, birincil kullanıcıların bulunmadığından emin olması için (spektrum bandı algılama işlemi) zaman harcaması gerekmektedir. Bu işlemlerin kontrolünü sağlayan operatörler örneğin kaynak bilgilerini önbelleklerine kaydederler. Sonrasında, ikincil kullanıcılara en uygun kaynağı sunarak rezervasyon işlemini gerçekleştirir. oyun teorisi (Game Theory), markov yaklaşımı (Markovian Approach), ve çok seçenekli yanıltıcı problemi (Multi-armed bandit problem) metodlarının yanı sıra CR ve LSA teknolojilerine dayalı rezervasyon işlemlerinde, çok ölçütlü karar verme (MCDM) yöntemi operatörün karar verme aşamasında kullanılmaktadır [80].

4.1. Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri

Çok Kriterli Karar Verme Yöntemlerin (Multi Criteria Decision Making - MCDM) problem çıktısı bir “Karar”dır. Bu çıktı, en-iyi uzlaşık çözüm veya alternatiflerin derecelendirilmiş bir listesi şeklinde olabilir. Problemin girdileri ise, “karar verici”ye bir kararın verilmesi gerekliliğini anlatan, karar verme sürecini başlatan bir işaret ve “karar durumu”nun açıklanmasına yardımcı olan verilerden oluşmaktadır. Tipik bir MCDM problemi Şekil 4.1’de şema olarak gösterilmiştir [82].



Şekil 4.1. Tipik bir MCDM Problemi [81]

Dolayısıyla bir MCDM probleminin açıklanması ve çözümünde, aşağıdaki unsurlar açıkça belirlenmelidir [83].

- Karar verme birimi veya karar vericinin kim ya da kimler olacağı.
- Bir amaçlar/kriterler kümesi ve amaçlar nitelikler arasındaki ilişkiler ve bunların hiyerarşik bir gösterimi.
- Uygun alternatifler kümesi,
 X : x karar değişkeninin N-boyutlu vektörlerinden oluşan örtük küme veya
 A : $\{a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_m\}$ açık - belirgin alternatifler kümesi.
- Değerlendirme için uygun amaç fonksiyonları (F_j : f_1, f_2, \dots, f_n) veya öznitelikler kümesi (X_j : x_1, x_2, \dots, x_n).
- Her bir alternatif x için her bir ölçütün değerleri ($f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)$) veya bir alternatif a_i için her bir ölçütün değerleri (çıktılar veya sonuçlar); $X_j(a_i) = x_{ij}$.
- Alternatifler kümesinin tanımı, karar değişkenlerinin ve özniteliklerin türü, bunların ölçüm düzeyleri/ölçekleri, problemin doğal durumu, nedensel ve araç-amaç ilişkilerinin türü.
- Karar kuralının ne olacağı veya karar vericinin tercih yargılarının modellenmesi için ihtiyaç duyulan bilginin türü.

MCDM problemlerinin yapısının daha iyi ortaya konulabilmesi için bu unsurların çok detaylı ele alınması faydalı olacaktır.

MCDM; nitelik-amaç ilişkilerinin açıkça ortaya konulduğu, alternatifler kümesinin başlangıçta açıkça belirlenebildiği ve sayılabilir olduğu yapıdaki problemleri incelemektedir.

Karar verme en genel anlamda; bir seçenek kümesinden en az bir amaç veya ölçüte göre en uygun alternatifin seçimi şeklinde tanımlanabilir. Bir karar verme probleminin elemanlarını; karar verici, alternatifler, ölçütler, sonuçlar, çevre ve karar vericinin öncelikleri oluşturmaktadır. Çok ölçütlü karar verme; teorik gelişimi ile birlikte pratik uygulamaları açısından da karar analizi alanında çok hızlı bir gelişme göstermiştir. Güçlü bir mantık yapısı ile karar tespitlerindeki başarısıyla kendini kabul ettirmiş, geniş bir uygulama alanına sahiptir [84].

MCDM, hem bir yaklaşımı temsil etmekte hem de çoklu, aynı ölçüye sahip olmayan ve birbiriyle çelişen ölçütlerle karakterize edilebilecek problemlerle karşılaşan insanlara, kendi değer yargılarına uygun seçimler yapmalarında yardımcı olması için tasarlanmış teknikleri veya yöntemleri kapsamaktadır.

Çok ölçütlü karar verme yöntemleri günümüzde birçok çalışmada kullanılmaktadır. Bu bölümde Analitik Hiyerarşi Süreci (Analytical Hierarchy Process, AHP) ve Basit Ağırlıklı Toplama (Weighted Sum Method, WSM) yöntemleri anlatılacaktır [80-87].

4.1.1. Analitik Hiyerarşi Süreci Yöntemi

Analitik Hiyerarşi Süreci (Analytic Hierarchy Process, AHP) Yöntemi özel bir hiyerarşik toplamsal ağırlıklandırma prosedürü ve çok ölçütlü karar problemleri için bir yapılandırma ölçüm ve sentezleme yöntemidir. 1970'lerin sonlarında T.L. Saaty tarafından geliştirilmiş bu yöntem, çok ölçütlü alternatifler arasından seçim problemlerinde kullanılmaktadır. Bununla birlikte yöntemin pratik doğası gereği; kaynak tahsisi, tahmin, risk analizi, planlama, performans yönetimi vb. çok çeşitli alanlardaki çalışmalarda da uygulanmıştır [86, 87].

AHP yöntemi, bir ölçüm teorisi olarak, amaçlar, kriterler, öznelilikler ve alternatiflerden oluşan hiyerarşik yapıda, bu elemanlar arasında karar vericinin "ikili karşılaştırmalar" biçiminde ifade ettiği tercihlerinden, oran-skala ağırlıklarının çıkarılması temeline dayanmaktadır. İlgili ağırlıklar WSM yardımı ile ilgili alternatifler için önceliklere dönüştürülür. Böylece alternatifler sonuç öncelik değerlerine göre sıralanabilirler.

Bir karar verme probleminin AHP ile çözümlenebilmesi için gerçekleştirilmesi gereken aşamalar aşağıda tanımlanmıştır.

Adım 1: Karar verme probleminin tanımlanması.

Adım 2: Kriterler arası karşılaştırma matrisinin oluşturulması.

Adım 3: Kriterlerin yüzde önem dağılımlarının belirlenmesi.

Adım 4: Kriter kıyaslamalarındaki tutarlılığın ölçülmesi.

Adım 5: Karar noktalarındaki sonuç dağılımının bulunması.

Her bir aşamada, formülasyon ile birlikte ilgili açıklamalar yapılmıştır [88].

Adım 1: Karar verme probleminin tanımlanması

AHP problemi en az bir ölçütten oluşan hiyerarşik bir yapı içinde tanımlamaktadır. Alt seviyedeki bir ölçütün, üst seviyedeki bir ölçütü etkilediği varsayımına dayanmaktadır. Bu nedenle, AHP ikili karşılaştırmalar yoluyla ölçütlerin, bir üst seviyedeki ölçütü ne oranda etkilediklerini belirlemeye çalışılmaktadır. Yani bir düzeydeki ölçütler, bir üst düzeydeki ölçüt çerçevesinde birbiriyle karşılaştırılmaktadır. AHP'de hiyerarşi en az üç seviyeden oluşmaktadır. Hiyerarşinin en üst seviyesinde amaç bulunmaktadır. Bir alt seviyede ise ana

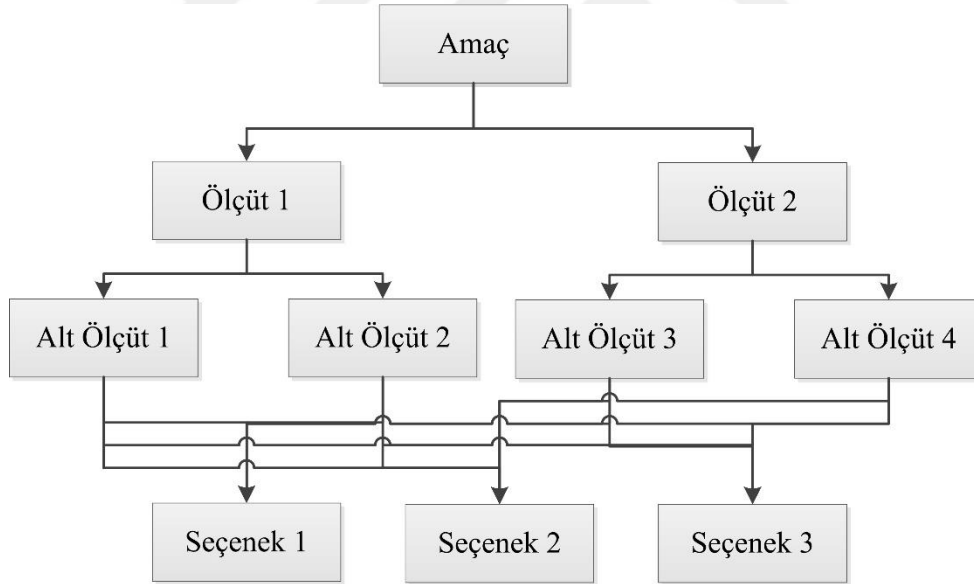
ölçütler ve varsa ana ölçütlerin bir düzey altında ise alt ölçütler yer almaktadır. En alt basamakta ise seçenekler bulunmaktadır. 4 düzeyli hiyerarsik yapı Şekil 4.2’de gösterilmektedir. Bu yapıya dayanarak karar matrisi ele alınmalıdır. Burada seçenekler kriter veya ölçüt anlamına gelmektedir. Adım 5’in sonunda L matrisi olarak gösterilecektir.

Adım 2 : Kriterler (ölçütler) arası karşılaştırma matrisinin oluşturulması

Kriterler arası karşılaştırma matrisi, $n \times n$ boyutlu bir kare matrisdir. Karşılaştırma matrisi aşağıda gösterilmiştir.

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix}$$

Karşılaştırma matrisinin köşegeni üzerindeki bileşenler, yani $i = j$ olduğunda, 1 değerini alır. Bu durumda ilgili kriter kendisi ile karşılaştırılmaktadır.



Şekil 4.2. Analitik Hiyerarşi Süreci

Kriterlerin karşılaştırılması, birbirlerine göre sahip oldukları önem değerlerine göre birebir, karşılıklı yapılıdır. Buna göre, A_i ve A_j , hiyerarsik yapıda bir üst seviyedeki C elemanına (örn. nitelik) bağlı alt seviye elemanları (örn. alternatifler) olmak üzere;

$A_i \succ_C A_j \Rightarrow C$ elemanına göre A_i 'nin A_j 'den kaç kat fazla tercih edilir olduğunu (tercihin yoğunluğu) gösteren tercih ilişkisi ("ikili karşılaştırma" ilişkisi);

$A_i \sim_C A_j \Rightarrow$ "ikili farksızlık ilişkisi" ve $PC \Rightarrow$ karşılaştırılan her (A_i, A_j) çiftine ilişkin \mathfrak{R}^+ da bir sayısal değer (a_{ij}) atayan bir fonksiyon olarak tanımlanır, AHP aksiyomlarının birincisi olan *Karşılıklılık Aksiyomu*'na (Reciprocal Axiom) göre;

$$A_i \succ_C A_j \Leftrightarrow PC(A_i, A_j) = a_{ij} > 1$$

$$A_i \sim_C A_j \Leftrightarrow PC(A_i, A_j) = a_{ij} = 1 \text{ olmak üzere,}$$

$$PC(A_j, A_i) = 1 / PC(A_i, A_j) \text{ 'dir ya da } a_{ji} = 1 / a_{ij}.$$

Örneğin, " A_i, A_j 'ye 5 kat tercih edilir" yargısı, A_j 'nin A_i 'ye 1/5 kat tercih edilir olduğu anlamına gelmektedir.

Genel olarak A , elemanlarının bir üst düzey kriterine (C) göre tüm ikili karşılaştırma ölçümlerinin (a_{ij}) kümesi olarak düşünülerek, yukarıdaki aksiyom gereği, "İkili Karşılaştırma Matrisi" olarak adlandırılır.

Böylece AHP yönteminde hiyerarşinin oluşturulmasından sonra ikinci adım, ikili karşılaştırma matrisinin oluşturulmasıdır. İlgili matris değerler ile ağırlıkların saptanmasını sağlayacak, AHP analizinin girdilerini oluşturacaktır. Eğer sayısal bir ölçek bulunamıyorsa, ikili karşılaştırmalar için sözel olarak ifade edilen tercih yargıları, bu tercihlerin hem yönünü hem de yoğunluğunu belirleyen bir ölçekte sayısal değerlere çevrilirler. Bunun için, Saaty tarafından aşağıdaki 1-9 oran ölçeği önerilmiştir:

Tablo 4.1. AHP'de tercihler için ikili karşılaştırma ölçeği

Sayısal Değer (puanlama)	Sözel Tercih Yargısı
1	Eşit olarak tercih edilme
3	Zayıf tercih edilme
5	Kuvvetle tercih edilme
7	Çok kuvvetle tercih edilme
9	Kesinlikle tercih edilme
2, 4, 6, 8	Birbirine komşu iki yargı arasındaki orta değerler

Örneğin, eğer karar verici, " A_1 'in A_2 'ye kararlı şekilde tercih edildiği", " A_1 'in A_3 'e eşit olarak tercih edildiği" ve " A_2 'in A_3 'e eşit yada zayıf arasında bir yoğunlukta tercih edildiği" yargılarını belirtmişse, ikili karşılaştırmalar için $PC(A_1, A_2) = a_{12} = 5$, $PC(A_1, A_3) = a_{13} = 1$, $PC(A_2, A_3) = a_{23} = 2$ sayısal değerleri atanır. Oluşturulacak matriste ilgili değerlere karşı sıra değerleri ise, karşılıklılık aksiyomu gereği, $a_{21} = 1/5$, $a_{31} = 1$ ve $a_{32} = 1/2$ olacaktır. Her elemanın kendi kendisi ile karşılaştırılması için $(a_{11} = a_{22} = a_{33}) = 1$ değerleri atanarak oluşturulan 3×3 boyutundaki örnek karşılaştırma matrisi aşağıdadır:

$$A_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 5 & 1 \\ \frac{1}{5} & 1 & \frac{1}{2} \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

Şekil 4.3. Örnek bir ikili karşılaştırma matrisinin oluşturulması

Bu matriste her sıradaki elemanın sütündeki elemana göre tercih yoğunluğunun sayısal değerleri gösterilmiştir. Böylece $n.(n-1) / 2 = 3.(3-1) / 2 = 3$ adet ikili karşılaştırma yapılarak $n=3$ boyutunda bir kare matris oluşturulabilmiştir. Bu işlem her öznitelik için tekrarlanarak, öznitelik sayısı kadar matris elde edilir.

Adım 3: Kriterlerin (ölçütlerin) yüzde önem dağılımlarının belirlenmesi

Karşılaştırma matrisi, kriterlerin birbirlerine göre önem seviyelerini belirli bir mantık içerisinde gösterilmektedir. Ancak bu kriterlerin bütün içerisindeki ağırlıklarını, diğer bir deyişle yüzde önem dağılımlarını belirlemek için, karşılaştırma matrisini oluşturan sütun vektörlerinden yararlanarak n adet n bileşenli B sütun vektörü aşağıdaki formül sayesinde oluşturulur.

$$b_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}} \quad (4.3)$$

n adet b sütun vektörü, bir matris formatında bir araya getirildiğinde ise aşağıda gösterilen C matrisi oluşturulacaktır.

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} & \cdots & c_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{n1} & \cdots & c_{nn} \end{bmatrix}$$

C matrisinden yararlanarak, kriterlerin birbirlerine göre önem değerlerini gösteren yüzde önem dağılımları elde edilebilir. Bunun için (4.4) formülünde gösterildiği gibi C matrisini oluşturan satır bileşenlerinin aritmetik ortalaması alınır ve öncelik vektörü olarak adlandırılan W sütun vektörü elde edilir.

$$w_i = \frac{\sum_{j=1}^n c_{ij}}{n} \quad (4.4)$$

W vektörü aşağıda gösterilmiştir.

$$W = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix}$$

Adım 4: Kriterler (ölçütler) kıyaslamalarındaki tutarlılığın ölçülmesi

AHP kendi içinde ne kadar tutarlı bir sisteme sahip olsa da sonuçların gerçekliği doğal olarak, karar vericinin kriterler arasında yaptığı birebir karşılaştırmadaki tutarlılığa bağlı olacaktır. AHP bu karşılaştırmalardaki tutarlılığın ölçülebilmesi için bir yöntem önermektedir. İlgili yöntemde elde edilen Tutarlılık Oranı (Consistency of Ratio, CoR) ile, bulunan öncelik vektörünün ve dolayısıyla kriterler arasında yapılan birebir karşılaştırmaların tutarlılığının test edilebilmesi imkanını sağlamaktadır. W öncelik vektörünün ikili karşılaştırma matrisine çarpımından D sütun vektörü elde edilir.

$$D = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix}$$

Formül (4.5)'de tanımlandığı gibi, bulunan D sütun vektörü ile W sütun vektörünün karşılıklı elemanlarının bölümünden her bir değerlendirme kriterine ilişkin temel değer (E) elde edilir. Bu değerlerin aritmetik ortalaması (4.6) ise karşılaştırmaya ilişkin temel değeri (λ) verir.

$$E_i = \frac{d_i}{w_i}, i = 1, 2, \dots, n \quad (4.5)$$

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^n E_i}{n} \quad (4.6)$$

λ hesaplandıktan sonra Tutarlılık Göstergesi (Consistency Index, CI), (4.7) formülünden yararlanarak hesaplanabilir.

$$CI = \frac{\lambda - n}{n - 1} \quad (4.7)$$

Son aşamada ise CI , Rassal Gösterge (Random Index, RI) olarak adlandırılan ve Tablo 4.2'de gösterilen RI değerine bölünerek CoR elde edilir (4.8). Tablo 4.2'den kriter sayısına karşılık gelen değer seçilir. Örneğin 3 kriterli bir karşılaştırmada ($N=3$) kullanılacak RI değeri Tablo 4.2'den 0.58 olacaktır [11, 19].

Tablo 4.2. RI değerleri [11, 19]

N	RI	N	RI
1	0	6	1.24
2	0	7	1.32
3	0.58	8	1.41
4	0.90	9	1.45
5	1.12	10	1.49

$$CoR = \frac{CI}{RI} \quad (4.8)$$

Hesaplanan CoR değerinin 0.10'dan küçük olması karar vericinin yaptığı karşılaştırmaların tutarlı olduğunu gösterir. CoR değerinin 0.10'dan büyük olması AHP'deki bir hesaplama hatasını ya da karar vericinin karşılaştırmalarındaki tutarsızlığını gösterir.

Son adımda, her bir kriter için, m karar noktasındaki yüzde önem dağılımları bulunur. Bu aşamada matris işlemleri kriter sayısı kadar (n kez) tekrarlanır. Ancak bu kez her bir

kriter için karar noktalarında kullanılacak karşılaştırma matrislerinin boyutu $m \times m$ olacaktır. Her bir karşılaştırma işleminden sonra $m \times 1$ boyutlu ve değerlendirilen kriterin karar noktalarına göre yüzde dağılımlarını gösteren S sütun vektörleri elde edilir. İlgili sütun vektörleri aşağıda tanımlanmıştır:

$$S_1 = \begin{bmatrix} S_{11} \\ S_{21} \\ \vdots \\ \vdots \\ S_{m1} \end{bmatrix}$$

Adım 5 : Karar noktalarındaki sonuç dağılımının bulunması

Bu etapda öncelikle, yukarıda anlatılan n tane $m \times 1$ boyutlu S sütun vektöründen meydana gelen ve $m \times n$ boyutlu K karar matrisi oluşturulur. Karar matrisi aşağıda tanımlanmıştır:

$$K = \begin{bmatrix} S_{11} & \cdots & S_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{m1} & \cdots & S_{mn} \end{bmatrix}$$

Sonuçta karar matrisi W sütun vektörü (öncelik vektörü) ile aşağıdaki gibi çarpıldığında ise m elemanlı L sütun vektörü elde edilir. L sütun vektörü karar noktalarının yüzde dağılımını verir. Diğer bir deyişle vektörün elemanlarının toplamı 1' dir. Bu dağılım aynı zamanda karar noktalarının önem sırasını da gösterir [20, 21].

$$L = \begin{bmatrix} S_{11} & \cdots & S_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{m1} & \cdots & S_{mn} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ W_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_{11} \\ l_{21} \\ \vdots \\ \vdots \\ l_{m1} \end{bmatrix}$$

Örneğin üç farklı seçenek için karar matrisi aşağıdaki gibi ele alınmaktadır. n ölçütlerin sayısını göstermektedir.

Seçenekler	Kriterler (Ölçütler)					
Seçenek 1	l_{11}	l_{12}	...	l_{1j}	...	l_{1n}
Seçenek 2	l_{21}	l_{22}	...	l_{2j}	...	l_{2n}
Seçenek 3	l_{31}	l_{32}	...	l_{3j}	...	l_{3n}

4.1.2. Basit Ağırlıklı Toplama Yöntemi

Matematiksel basitliği nedeniyle MCDM literatüründe en fazla kullanılan tekniklerden biri olan Basit Ağırlıklı Toplam (Weighted Sum Method, WSM) yönteminin algoritması aşağıdaki gibi iki adımdan oluşmaktadır [84, 85].

Adım 1: Karar matrisinin normalize edilmesi

WSM yönteminde ilk aşamada m sayıda alternatif ve n sayıda değerlendirme ölçütünden oluşan karar matrisi aşağıdaki denklem yardımıyla normalize edilmektedir:

$$r_{ij} = \begin{cases} \frac{a_{ij} - \min_j^A}{\max_j^A - \min_j^A}, & i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n & \text{fayda kriterleri} \\ \frac{\max_j^A - a_{ij}}{\max_j^A - \min_j^A}, & i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n & \text{maliyet kriterleri} \end{cases} \quad (4.1)$$

Adım 2: Alternatiflerin tercih değerlerinin hesaplanması

Her bir alternatifin toplam tercih değerleri aşağıdaki denklem yardımıyla hesaplanır:

$$V_i = \sum_{j=1}^n w_j r_{ij} \quad i = 1, \dots, m \quad (4.2)$$

Buradaki (w_j), j ölçütüne verilen ağırlığı (önem derecesini) göstermektedir. Daha yüksek (V_i) değerli alternatif daha fazla tercih edileceği anlamına gelmektedir. WSM yönteminde tüm ölçütlerin karşılaştırılabilir (aynı ölçüm biriminde) sayısal verilerden oluşmasına dikkat edilmelidir.

5. REZERVASYON TEKNİKLERİ

Rezervasyon; otel, lokanta, gazino, tiyatro gibi yerlerde, uçak, tren, otobüs gibi taşıtlarda yer ayırtma ya da ayırma işidir. Gerçek hayatta, kullanıcılar rezervasyonlarını kurumun rezervasyon yöntemine dayalı olarak yapmaktadırlar. Kullanıcılar hizmet alımına başlamadan önce rezervasyonlarını iptal edebilirler (reservation cancelation). Diğer taraftan hiç bildirimde bulunmadan hizmet almayabilirler (No-show). Örneğin gezgin alarda kullanıcılar hiç bildirimde bulunmadan servisi kullanmayabilirler. Bu nedenle, örneğin yüksek talepler söz konusu olduğunda, MNO kaynağı kullanmayı taahhüt eden ve daha yüksek bir fiyat ödemek isteyen kullanıcılar tarafından yapılan rezervasyonları reddetmekten başka seçeneği yoktur (gelecekteki rezervasyon iptal ihtimalinden ve No-show durumundan haberdar olamadığı için). Sonuç olarak, MNO gelir kaybı ve daha düşük sistem kullanımı (system utilization) ihtimali ile karşı karşıyadır.

Fazladan rezervasyon (Overbooking), ağ kapasiteden daha fazla rezervasyon kabul etmesine izin vererek, yukarıda tanımlanmış soruna bir çözüm sunmaktadır [10, 14].

5.1. Fazladan Rezervasyon Tekniği

Gelir kaybını en aza indirmek için MNO fazladan rezervasyon tekniğine dayanarak etkili bir şekilde kaynakları yönetebilir ve kullanım izni verebilir. Bununla birlikte, fazladan rezervasyonda göz önünde bulunması gereken bir kaç zorunlu konu var:

- Fazladan rezervasyonun sınırının belirlenmesi,
- Toplam tazminat bedeli'nin (Compensation Cost, CC) minimum'a indirilmesi,
- Kullanıcı memnuniyetinin sağlanması (user satisfaction) [21].

Fazladan rezervasyonun asıl amacı, daha fazla CC ödemesi yapmaksızın maksimum kapasiteyi aşan, ideal bir fazladan rezervasyon sınırını bulmaktır.

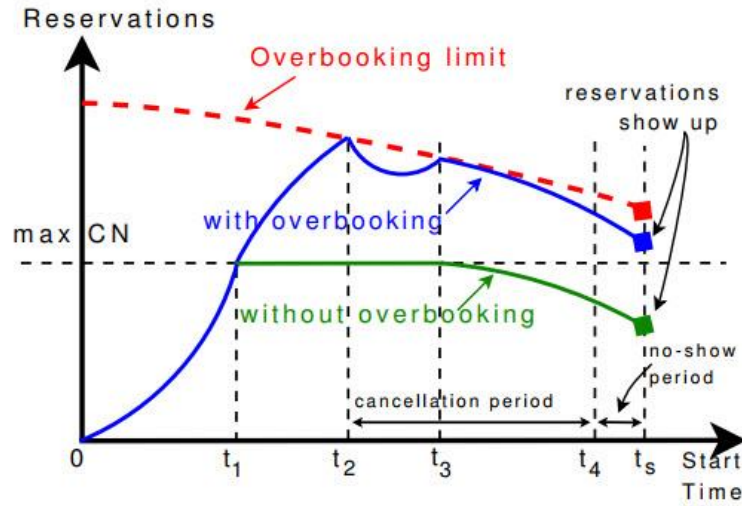
Şekil 5.1, fazladan rezervasyonun bir MNO'nun beklenmeyen iptaller ve No-show'lara karşı kendini nasıl koruyabileceği üzerine bir örnek gösterilmektedir. Bir iptalin, bir kullanıcı tarafından, hizmet başlangıç zamanı t_s 'den önce yapıldığı müddet rezervasyon iptali anlamına gelir (Örneğin Şekil 5.1'de belirlenen $t_2 - t_4$ aralığında yapılan iptaller bu kategoriye aittir) ve Şekil 5.1'de gösterildiği gibi sonlandırılmaktadır. Ayrıca, no-show durumu bir iptal bildirimini olmadan servis alma noktasına ulaşamayan kullanıcılar olarak

tanımlanır. Fazladan rezervasyon sınırı BL 'nin $maxCN$ 'den daha büyük olmasını sağlayarak, MNO, toplam rezervasyonların sayısı φ olana kadar daha fazla rezervasyon (t_1 'den sonra) kabul edebilmektedir. Aksine, fazladan rezervasyon yöntemini kullanmayan MNO, kapasite dolduğundan rezervasyonları t_1 'den itibaren reddetmek zorundadır.

Rezervasyon iptalleri ve no-show'lar, φ 'den bağımsızdır. BL kendisi zaman aralıklarında φ 'yi göz önünde bulundurarak güncellenmelidir. Böylece, Şekil 5.1'de gösterildiği gibi φ arttıkça BL azalır. Daha sonra, MNO φ 'yi azaltmak için iptal ve gösterim yapılmayan (No-show) sürelerden faydalanır. En iyi senaryo ise, MNO; çok sayıda no-show nedeniyle fazladan rezervasyonları reddetmek zorunda kalmamasıdır.

Sonuç olarak, t_s zaman diliminde, fazladan rezervasyon yöntemi kullanılan bölgede, daha fazla rezervasyon yapılmış olması bariz bir şekilde gözükmemektedir.

Fazladan rezervasyon tekniğinde fazladan rezervasyon sınırını belli etmek adına (BL) genel olarak üç yöntem kullanılmaktadır: Riske Dayalı (Risk Based Policy), Olasılığa Dayalı (Probability Based Policy) ve Servis Seviyesine Dayalı (Service Level Based Policy).



Şekil 5.1. Fazladan rezervasyon yönteminin modeli [27]

5.1.1. Riske Dayalı Yöntem

Riske Dayalı yöntem (Risk Based Policy), reddedilen hizmetlerin maliyetini, daha fazla rezervasyon kabul ederek gelir (Revenue) ile dengelemeyi amaçlamaktadır. Reddedilen hizmetin maliyeti, hizmet zamanında reddedilen kullanıcılara verilen tazminat

maliyetine (CC) karşılık gelir. CC genellikle kullanıcı tarafından ödenilen spektrum fiyatından (p) daha yüksektir. Bu nedenle, fazladan rezervasyonun izin verildiği bir eşik (Threshold) hesaplamak için bir risk analizi gereklidir.

Eşik hesaplamak için, kullanıcıların talep ve gösterim sayısının olasılık dağılımı bulunmalıdır. $A(x)$, kullanıcıların talebinin, x sayısından küçük veya eşit olması ihtimalini belirtir, burada x , rezervasyon sayısını gösterir. Dahası, $F_x(y)$, hizmet anında görünecek olan rezervasyon sayısının y 'ye eşit veya daha düşük olma ihtimali olarak tanımlanmaktadır.

Rezervasyon sınırının ve kapasitesinin sırasıyla BL ve φ olarak belirlenmiştir. Ardından, rezervasyon sınırının BL 'den $BL+1$ 'e artırarak beklenen gelir değişimini göz önünde bulundurarak üç olası durumla karşı karşıya kalınmaktadır:

1. Talep $< BL+1$; bu, tahmini gelirden herhangi bir değişiklik olmadığı anlamına gelir.
2. Talep $\geq BL+1$ ve gösterim sayısı $\leq \varphi$. MNO, t_s 'deki kullanıcılara hizmet edebileceğinden, gelir artışı ek bir rezervasyon artışına onay verilerek elde edilir.
3. Talep $\geq BL+1$ ve gösterim sayısı $> \varphi$, yani MNO, CC ödeme şartı ile ccr_{REQ} bir kullanıcıyı reddetmek zorundadır. Sonuç olarak, $ccr_{REQ} > p$ olduğu durumlarda, $p - ccr_{REQ}$ kadar gelir kaybı vardır.

Böylece, rezervasyon sınırını BL 'den $BL+1$ 'e artırarak beklenen gelir değişimini aşağıdaki gibi türetebiliriz:

$$E[R|BL+1]-E[R|BL]=[1 - A(BL(t_i))]. [p - ccr_{REQ} (1 - F_{BL(t_{i+1})}(\varphi))] \quad (5.1)$$

Her bir kullanıcının gösterim olasılıklarının (showing probabilities) bağımsız olduğu varsayımı altında, t_i zamanındaki dağılımı $F_x(y)$ şeklinde türetilmiştir. Her kullanıcının t_i zamanında faaliyet olasılığı q olarak gösterilmektedir. Gösterim sayısı için Thompson [22] tarafından araştırılan binom dağılımı izlenir:

$$F_x(y) = \sum_{k=0}^y \binom{x}{k} q^k (1 - q)^{x-k} \quad (5.2)$$

5.1.2. Olasılığa Dayalı Yöntem

Bu basit overbooking politikasında, BL , MNO tarafından kiralanan toplam kapasite sayısına φ ve SU'ların talep bulunma oranına β (Show rate) bağlıdır. Dolayısıyla, t_i anında BL şu şekilde belirlenebilir:

$$BL(t_i) = \frac{\varphi}{\beta(t_i)} \quad (5.3)$$

Örneğin, $\varphi = 100$ ve $\beta(t_i) = 0.80$ ise, fazladan rezervasyon miktarı 125'tir. Dolayısıyla, β düşükse, fazla rezervasyon sınırı bir o kadar yüksek olur.

5.1.3. Servis Seviyesine Dayalı Yöntem

Hizmet Seviyesine Dayalı yöntem (Service Level Policy), spektrum gelirini arttırmasına rağmen, hizmet süresinde reddedilen kullanıcıları, gelecekte, işlerini farklı spektrumlar ile devam etmeye yönlendirecektir. Böylece, durumu göze alarak bir kaynak kullanıcılarından bazılarını uzun vadede kaybedebilir. Dahası, bu yöntem, fazladan rezervasyon işleminin kullanıcıların memnuniyetine olan olumsuz etkisini arttırabilir.

Servis Seviyesine Dayalı yöntem, reddedilen kullanıcıların belirli bir seviyesini veya kesimini tanımlayarak yukarıdaki sorunları giderir. Örneğin, American Airlines ve United Airlines, 2006 yılındaki aşırı satış nedeniyle 10.000 yolcu başına sırasıyla 0,84 ve 0,51 oranında istemsiz uçağa alınmama oranına (DB) sahiptir (involuntary denied boarding ratio)[13]. Bu veriler, Birleşik Devletler menşeli olan uçuşlardan alınmıştır. Havayolu şirketleri, servis seviyesine dayalı yöntemini kullanarak, örnek olarak 0.50'lik bir DB oranını belirleyebilir. Buna göre, havayolu şirketleri, bu eşişe (Threshold) göre fazladan rezervasyon sınırını belirleyebilir.

x rezervasyonlarına ilişkin gösterim sayısının $B(x)$ olarak alındığı varsayalım. Bu varsayım ile, x rezervasyonlarının servis seviyesi, $s(x)$, denklem 5.4 ile tanımlanır; burada $(B(x) - \varphi)^+ = \max(0, B(x) - \varphi)$. Denklem 5.4, beklenen servis rededilme sayısını beklenen gösterim sayısına karşı kıyaslamaktadır.

$$s(x) = E[(B(x) - \varphi)^+] / E[B(x)] \quad (5.4)$$

Gösterim talepleri için binom dağılımı kullanırsak, x rezervasyonlarının servis seviyesi aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$s(x) = \frac{1}{xq} \cdot \sum_{k=\varphi+1}^x (k - \varphi) \binom{x}{k} q^k (1 - q)^{x-k} \quad (5.5)$$

Burada, q gösteri olasılığı, y rezervasyon sayısı ve φ toplam kapasiteyi östermektedir.



6. FİYATLANDIRMA TEKNİKLERİ

Burada, daha önce yüksek veri hızlı kablosuz ağlar için önerilen çeşitli fiyat stratejileri [53-55] ve [92] ele alınacaktır. Bu stratejiler sırasıyla ağ yükü tabanlı fiyatlandırma (Network Load based Pricing, NLP), QoS ve teklif esaslı fiyatlandırma (QoS Profile and Bid based, QBPB), trafik değerlendirme fiyatlandırma (Traffic Differentiated Pricing, TDP) ve Abone sınıfına dayalı fiyatlandırma (Subscriber Class based Pricing, SCP) olarak adlandırılmıştır.

6.1. LTE Teknoloji Ayarları

LTE (Long Term Evolution) ağ teknolojilerine dayalı ağlarda, spektrum bandlarının her birisi PRB olarak adlandırılmıştır. Bir PRB, LTE'nin temel radyo kaynak ayırma birimi olarak düşünülür. Belirli bir fiyat için PRB'nin tahsisi, bir modülasyon ve kodlama şemasının, yani MCS'nin (modulation and coding scheme) seçimiyle ilişkilendirilir.

Her bir kullanıcının bireysel veri akışı bir PRB'ye eşlenir ve aşağıdaki MCS: QPSK, 16QAM veya 64QAM (2, 4 veya 6 bit / sembol) kullanılarak düzenlenir ve kodlanır. Kullanılabilir kanal koşullarına dayanan eNodeB (veya LTE baz istasyonu) tarafından her bir kullanıcıya bir MCS atanır. İlgili atama, bir bağlantı uyarlama mekanizmasıdır. Üstelik LTE sistemleri, her biri kendi PRB sayısına sahip olan 1.4 ila 20 MHz bantgenişliği aralıklarını desteklemektedir (Tablo 6.1).

6.1.1. Trafik Veya QoS Sınıfı

Sistemde, LTE ağları için birkaç trafik sınıfı kullanılmaktadır. Bu sınıfların LTE-QCI (QoS Class Identifier, QCI) yani QoS sınıf tanımlayıcısı ile doğrudan bir ilişkisi vardır. QCI, bit hızlarını, paket gecikmelerini ve kayıplarını tanımlayan daha ayrıntılı QoS özelliklerine işaret eden bir tanımlayıcıdır.

Tablo 6.1. LTE ağlarında belirli bir bantgenişliği için PRB sayısı [55]

Bantgenişliği (MHz)	1.4	3	5	10	15	20
PRB sayısı	6	15	25	50	75	100

6.1.2. Kullanıcı Sınıfı

Tablo 6.2'de gösterildiği gibi, kullanıcıları Altın, Gümüş ve Bronz gibi üç öncelik seviyesine göre sınıflandırılmıştır. Bu, kullanıcı hakkında bazı bilgileri kategorileştirme [53, 55]'den alınmıştır. Her kategori için farklı hız ve farklı servis türleri önerilir ve LTE-QCI değerleri verilir.

Yüksek fiyatlı Altın veya G-type kullanıcıların Yüksek Çözünürlük (HD) akışına, gerçek zamanlı oyunlara ve internette gezmek, sohbet, P2P dosya paylaşımı gibi diğer TCP tabanlı hizmetlere daha kolay erişimleri vardır. Gümüş veya S-type ve Bronz veya B-type kullanıcılar G-type kullanıcılarına göre daha düşük bir fiyat ödemesi yaptıklarından daha kısa süreli hizmetle (beklenen düşük mesai süreleri) sınırlandırılır. Maksimum gecikme değerleri, [93]'de sağlanan standart LTE ile ilgili bilgilere dayanarak verilmiştir. Ayrıca, Tablo 6.2, geleneksel sabit fiyatlı fiyatlandırma stratejisinin olası kullanımını göstermektedir. Operatörler aynı zamanda bir PRB biriminin sabit fiyatına dayalı olarak müşterilere fiyat önerebilir.

Tablo 6.2. Kullanıcı kategorisi [55]

Kullanıcı Türü	Maximum Hız (Mbps)	Yetkili Servis	Sabit PRB Fiyatı (P)
Gold (Altın)	100	<ul style="list-style-type: none"> • Konuşmak • Gerçek zamanlı oyun ve HD video • Arabellekten yayınlanan video • interaktif oyun • TCP ve P2P 	PGP/PRB/s
Silver (Gümüş)	25	Gerçek zamanlı oyun ve HD video harici hepsi	PSP/PRB/s
Bronze (Bronz)	10	<ul style="list-style-type: none"> • Arabellekten yayınlanan video • interaktif oyun • TCP ve P2P 	PSP/PRB/s

6.2. Ağ Yüküne Dayalı Fiyatlandırma

[53]'te teklif edilen QoS-fiyatlandırmasının yanı sıra, ağ yüküne dayalı fiyatlandırma (Network Load based Pricing, NLP), özellikle LTE ağlarında eşit derecede önemlidir. Ağ yükü belirli bir seviyeyi (veya eşiği) geçtiğinde operatörler, kullanıcıları yüksek bir fiyatla hizmet almaya zorlayarak gelirleri artırabilirler. Önerilen fiyatlandırma politikası aşağıdaki gibi sürekli (continuous, P_{cont}) ve ayrık (discrete, P_{disc}) kategorilere ayrılabilir:

$$P_{cont} = F_{ij} \times (e - e^{-b \times x}) \times L_t / 100 \quad (6.1)$$

$$P_{disc} = \frac{1}{F_{ij} \times (e - e^{-b \times x}) \times L_t / 100} \quad (6.2)$$

$$F_{ij} = \begin{cases} f_c & \text{when } 0 < L_t \leq TH\% \\ f_v & \text{when } TH < L_t \leq 100\% \end{cases} \quad (6.3)$$

Burada,

P_{cont} : Kullanıcı bağlantısı kurmak adına alınan sürekli fiyat,

P_{disc} : Kullanıcı bağlantısı kurmak adına alınan ayrık fiyat,

F_{ij} : Her trafik sınıfı (veya QCI) için 'i' (örn. Konuşma sesi) ve abone sınıfı 'j' (örneğin

G-Type) için doğrusal fiyat kriteri,

f_c : Her i ve j için aynı değere sahip sabit fiyat kriteri,

f_v : Her i ve j için değişken fiyat kriteri,

x: QoS öznelik değeri $\min_{QoS_attri} \leq x \leq \max_{QoS_attri}$ şartı ile,

b: Doğrusallık parametresi ve minimum ve maksimum QoS arasındaki fiyat oranının çok yüksek bir seviyeye çıkmayacağı şekilde tanımlanmalıdır,

e: 2.71828,

L_t : Trafik yükü,

TH: Trafik yükü eşiği (veya fiyat değişiminin üstünde olan L_t 'nin en yüksek değeri).

Trafik yükü şu şekilde hesaplanabilir:

$$L_t = (n_{assd} / n_{tot})\% \quad (6.4)$$

n_{assd} : Kullanıcılara önceden atanan PRB'ler,

n_{tot} : eNodeB'deki toplam PRB sayısı.

Yukarıdaki denklemlerde, i , j ve x parametreleri, Tablo 6.3'te verilen bilgilere bakarak daha net görülecektir. Bu tabloda dikkate alınan tek QoS özelliği PRB'dir. x 'in değeri $2 \leq x \leq 4$ olacaktır. Tablo 6.3'te, üç farklı trafik sınıfı i olarak gösterilmiştir ve operatörler, j 'ye ait her kullanıcı için, j 'nin G, S veya B olabileceği şekilde kolayca seçebilirler. Örneğin, bir G kullanıcısı gerçek zamanlı oyun oynamayı gerektiriyorsa, $x = 4$ ile kabul edilir. Öte yandan, eğer G kullanımı bir ses servisine düşerse, $x = 2$ ve benzeri şekilde ödüllendirilecektir.

Tablo 6.3. Farklı trafik sınıfları için olası bir QoS özniteliği değerleri [53]

Trafik Sınıfı	Conversational voice	HD streaming	Real-time gaming
QoS öznitelikleri (PRB)	2 (or min x)	3	4 (or max x)

6.3. QoS Profili Ve Teklif Tabanlı Fiyatlama

QoS profili ve teklif tabanlı fiyatlandırma (QoS Profile and Bid based, QPBP) [54]'de, yüksek bantgenişliği işgaliyle doğrudan artan kullanıcı tekliflerini göz önüne alarak bir fiyatlandırma çözümü geliştirilmiştir. Temel olarak, strateji, bir kullanıcının ihtiyaç duyduğu PRB'ler için atadığı bütçeleri temsil eden QoS profiline dayanır. Bu tür profilin LTE ağ içinde ayarlanması Tablo 6.4'te sunulmaktadır. Burada, bir kullanıcı sırasıyla Q3, Q5 ve Q8 olarak gösterilen çeşitli QoS düzeyleri (veya QCI'lar) için üç farklı bütçe atayabilmektedir. Aynı şekilde, PRB'lerin ve ilgili bütçelerin gerekli değerleri temel alınarak kullanıcı teklifleri tahmin edilmektedir. İlgili teklifler, ilgili kullanıcıya karşılık gelen ücretlendirme ölçütlerini belirleyen eNodeB'ye gönderilir. Normalde, bir kullanıcı atanan PRB'ye ve yeni PGP'ye (her PRB'ye Gbit başına fiyat) göre ücretlendirilir. Bu yeni PGP, bir müşteriye atanan QoS seviyesinin taranmasıyla elde edilir ve böylece ilgili teklifi geri kazanır. Ardından, yeni PGP bulunduğu en düşük teklif değerine ayarlanır. P fiyatı bu şekilde hesaplanır:

$$P = n_{assdk} \times PGP \quad (6.5)$$

n_{assdk} : bir kullanıcıya atanan PRB sayısı.

Tablo 6.4. LTE için kullanıcının QoS profili örneği [54]

QoS seviyesi (QCI)	PRB sayısı	Fiyat	Talep = (Fiyat/PRB sayısı)
Q3	4	10	2.5
Q5	3	9	3
Q8	2	8	4

6.4. Farklılaştırılmış Trafik Fiyatlandırma

Farklılaştırılmış trafik Fiyatlandırma (Traffic Differentiated Pricing, TDP) [93], sistem modelinde üç trafik sınıfı içermektedir: gerçek zamanlı değişken boyutlu paketler, gerçek zamanlı sabit boyutlu paketler ve gerçek zamanlı olmayan paketler (non-real time). Burada, ilgili kategorileri LTE Q3, Q5 ve Q8 ile değiştiriyoruz. Bahsedilen kategorilerin her biri için uyarlanmış formüller aşağıdaki gibidir.

$$P_{Q3} = \begin{cases} P_{Q3_low} \times PRB, & \text{if } \frac{n_{resd_Q3}}{n_{tot}} \leq TH \\ P_{Q3_high} \times PRB, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6.6)$$

Burada,

P_{Q3} : Q3 kullanıcıları için belirlenecek fiyat,

P_{Q3_low} : Tıkanıklık olmayan (no-congestion) durumlarda Q3 kullanıcılarına uygulanan fiyat,

P_{Q3_high} : Tıkanıklık sırasında Q3 kullanıcılarına uygulanan fiyat,

n_{resd_Q3} : Q3 kullanıcılarına ayrılmış PRB sayısı,

n_{tot} : eNodeB başına toplam PRB sayısı,

TH : Ağın aşırı yük durumunu belirlemek için tıkanıklık eşiği.

$$P_{Q5} = P_{Q5_min} \times n_{min} + P_{Q5_add} \times (n_{resd_Q5} - n_{min}) \quad (6.7)$$

Burada,

$$P_{Q5_add} = \frac{c_{Q5}}{n_{rem_Q5}} \quad (6.8)$$

P_{Q5} : Q5 kullanıcıları için fiyat,

n_{min} : Q5 kullanıcıları için tıkanıklık olmayan durumlarda minimum PRB sayısı,
 P_{Q5_min} : Q5 kullanıcılarına n_{min} dayalı sabit fiyat,
 P_{Q5_add} : Tıkanıklık durumunda Q5 kullanıcılarına uygulanan ücret,
 C_{Q5} : Operatör tarafından tanımlanan fiyatlandırma sabit değişkeni,
 n_{rem_Q5} : Q3 kullanıcılarına hizmet ettikten ve Q5 kullanıcılarına minimum PRB sağladıktan sonra kalan PRB'ler,
 n_{resd_Q5} : Q5 kullanıcıları için ayrılan PRB'ler.

$$P_{Q8} = P_{fixed_PRB} \times PRB \quad (6.9)$$

P_{Q8} : Q8 kullanıcıları için fiyat,
 P_{fixed_PRB} : PRB birimi için sabit fiyat.

6.5. Abone Sınıfına Dayalı Fiyatlandırma

Abone sınıfına dayalı fiyatlandırma (Subscriber Class based Pricing, SCP) [55]'da kullanıcının türüne, yani Altın(G), Gümüş (S) ve Bronz (B)'a göre değişen bir fiyatlandırma stratejisi önerilmektedir. Bütün bu kullanıcılar için, $P_{fixed}(j)$ her bir PRB birimine sabit fiyat olarak tanımlanır; böylece j, G, S veya B tipi kullanıcılardan herhangi biri olabilir. $P_{fixed}(j)$ birimi (monetary unit per PRB, mu/PRB) olup bu fiyat operatör tarafından mobil pazar trendlerine (mobile market trends) dayalı olarak sabitlenmiştir [94]. Benzer şekilde, $P_{var}(j)$, tıkanıklık durumlarında veya kullanıcının trafik eşiğini aştığı durumda bir j kullanıcısı için ücretlendirilen fiyattır.

6.5.1. G Tipi Kullanıcılar İçin Fiyatlandırma

PRB birimi başına G tipi kullanıcılara ücretlendirilen fiyat P_G olarak aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$P_G = \begin{cases} P_{fixed(G)} \times PRB, & \text{if } \frac{n_{assd(G)}}{n_{tot}} \leq TH_G \\ P_{vari(G)} \times PRB, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6.10)$$

Burada,

$n_{assd}(G)$: G tipi kullanıcılara atanan PRB sayısı,

TH_G : Tıkanıklık eşiği (ör. %80),

$$P_{vari(G)} = P_{fixed(G)} + P_{add} \quad (6.11)$$

ve

$$P_{add} = \frac{K}{n_{tot} - n_{(rem_PRB)TH}} \quad (6.12)$$

P_{add} : Ek fiyat,

K : Operatör tarafından sabit fiyatlandırma değişkeni,

$n_{(rem_PRB)TH}$: G kullanıcılarına tıkanıklık veya eşik değerlerin üstünde hizmet vermek üzere operatör tarafından ayrılmış olan PRB'lerin sayısından geriye kalan PRB'ler.

6.5.2. S Tipi Kullanıcılar İçin Fiyatlandırma

PRB başına S tipi kullanıcılara ücretlendirilen fiyat $P(S)$ olarak aşağıda verilmiştir:

$$P_S = \begin{cases} P_{fixed(S)} \times PRB, & \text{if } \frac{n_{assd(S)}}{n_{tot}} \leq TH_S \\ (P_{fixed(G)} + P_{vari(G)}) \times PRB, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6.13)$$

$n_{assd}(S)$: S tipi kullanıcılarına atanan PRB sayısı,

TH_S : Operatör tarafından belirtilen eşik değeri (ör. %35) ve bu TH 'e, S tipi kullanıcıları yalnızca tüm G tipi kullanıcılar spektrum bandı sunulduğunda erişebilir.

6.5.3. B Tipi Kullanıcılar İçin Fiyatlandırma

B tipi kullanıcıların fiyatlandırma formülü şöyledir:

$$P_B = \begin{cases} P_{fixed(B)} \times PRB, & \text{if } \frac{n_{assd(B)}}{n_{tot}} \leq TH_B \\ (P_{fixed(S)} + P_{fixed(G)} + P_{vari(G)}) \times PRB, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6.14)$$

Burada,

$n_{assd}(B)$: B tipi kullanıcılara atanan PRB sayısı,

TH_B : Operatör tarafından belirtilen eşik değeri (ör. %45) ve bu TH'e, B tipi kullanıcılar yalnızca G ve S kullanıcılarının tümüne spektrum bandı sunulduğunda erişebilir.

Ayrıca bir operatöre olan geliri, mevcut PRB'lerin tahsisi için kullanıcılardan alınan toplam fiyat olarak tanımlıyoruz. Matematiksel olarak:

$$TNR = \sum_{PRB=1}^{n_{tot}} P_i , \quad i \in (G, S, B) \quad (6.15)$$

Burada toplam PRB sayısına göre toplam gelir TNR olarak gösterilmektedir.



7. OPTİMİZASYON TEKNİKLERİ

Optimizasyon, bir problem çözümüne yönelik belli başlı koşullar altında mümkün olan seçenekler içerisinde en iyisini seçme işlemidir. Optimizasyon problemlerinin değişik yapıları ve matematiksel karakteristikleri, nonlineerlik, süreklilik, dış bükeylik gibi ortak özellikleri olan özel problemlerin çözümünde kullanılacak algoritmalar geliştirilmesini gerektirmiştir. Geliştirilen farklı algoritmalar, farklı optimizasyon problemlerine çözümler sunmaktadır.

Genetik algoritma, yerçekimi arama algoritması, yapay bağışıklık sistemi, karınca kolonisi algoritması ve kuş sürüsü algoritması (parçacık sürüsü algoritması) gibi en çok bilinen algoritmalarıdır. Bunlardan genetik algoritma, Darwin'in evrim teorisinden esinlenilerek geliştirilmiş bir algoritmadır [95]. Geleneksel optimizasyon metodlarına göre oldukça zor olarak kabul edilen çok değişkenli problemlerin çözümünde yaygın olarak kullanılmaktadır. Evrim teorisi ile kabul edilen en iyinin hayatta kalması ve zayıf olanın yok olması kuralına bağlı olarak, algoritma sürekli iyileşen çözümler üretir. Kötü olan çözümler ise elenmektedir [96]. Yerçekimi arama algoritması, Newton'un yerçekimi kanunu temel alınarak oluşturulmuş bir algoritmadır. Yapay bağışıklık sistemi, biyolojik bağışıklık sistemlerini simüle etmektedir [97].

Bazen yalnız başına hiçbir iş yapamayan varlıklar, topluca hareket ettiklerinde çok akıllıca davranışlar gösterebilmektedir. Sürüye ait bireyler, en iyi bireyin davranışından veya öteki bireylerin davranışlarından ve o bireylerin kendi tecrübelerinden yararlanarak bilgi edinmekte yorum yapmakta, bu bilgileri daha sonra karşılaştıkları problemlere yanıt olması için bir araç olarak kullanmaktadırlar [98]. Örneğin, bir canlı sürüsünü oluşturan bireylerden birisi bir av bulduğunda diğer bireyleri haberdar etmek için bir davranış sergileyecektir. Sürünün kalanının da o yöne doğru hareket etmesini sağlamaktadır. Canlıların sürü içerisindeki bu hareketleri gözlemlenerek sürü zekâsı tabanlı optimizasyon algoritmaları geliştirilmiştir.

Sürü davranışlarından esinlenilerek ortaya çıkartılmış bir çok algoritma bulunmaktadır. Parçacık sürüsü optimizasyonu (Particle Swarm Optimization, PSO), ateş böceği algoritması, karınca kolonisi optimizasyonu, kurt kolonisi optimizasyonu bunlardan bazılarıdır.

Bu çalışmada sürü algoritmaları içerisinde parçacık sürü optimizasyon algoritması ayrıntılı olarak ele alınmıştır.

7.1. Parçacık Sürü Optimizasyonu

Kuş ve balık sürülerinin sosyal davranışları gözlemlenerek geliştirilmiş bir algoritma olan parçacık sürü optimizasyonu (Particle Swarm Optimization - PSO) 1995 yılında Eberhart ve Kennedy tarafından ortaya atılmıştır. Parçacık sürü optimizasyonuna aynı zamanda kuş sürü optimizasyonu da denilmektedir [99].

Bu algortmada; balık ve kuş sürüleri yiyecek ya da barınak bulmak amacıyla belirli bir alan taramaktadırlar. PSO, bu sürülerin sosyal davranışlarından oluşmaktadır. Bu davranışlardan ilki sürü içerisindeki her bir parçacığın geçmiş haritaların içerisinde en iyi konuma gitme davranışdır. İkinci davranış ise sürü içerisinde bulunan yiyeceğe en yakın parçacığı takip etme hareketidir. Son davranış ise parçacığın geniş alan taramasını sağlayan geçmiş hız değerleridir. Bu davranışlar PSO'nun temelini oluşturmaktadır [100].

PSO algoritması rastgele çözümler içeren bir popülasyonla başlar ve her iterasyonda güncelleme yaparak optimum yanıtı vermeye çalışmaktadır. Sürü içerisindeki her bir kuş bir cevabı temsil etmektedir. Aynı zamanda her bir kuş bilinmeyen sayısı kadar yanıt üretmektedir. Verilen cevaplar o kuşun, o andaki pozisyonu anlamını taşımaktadır. Her bir kuş o andaki ve önceki pozisyonlarını hafızasında tutarak o ana kadarki en iyi pozisyonu belirler ve bu pozisyona *pbest* adı verilir. Yine algoritma tüm kuşların *pbest*'lerini kontrol ederek tüm sürünün en iyi pozisyonu olan *gbest*'i belirler. İterasyon sayısı kadar döngü gerçekleştirildikten sonra ortaya çıkan *gbest* değeri sürünün o probleme verdiği en iyi sonuç olarak ortaya çıkar. Örneğin, S boyutlu bir arama uzayında hareket eden T adet parçacığın hız ve konumları aşağıdaki gibi ifade edilebilir. Burada, X konumu V ise hızı ifade eder.

$$X = \begin{bmatrix} X_{11} & \cdots & X_{1S} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{T1} & \cdots & X_{TS} \end{bmatrix} \quad (7.1)$$

$$V = \begin{bmatrix} V_{11} & \cdots & V_{1S} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ V_{T1} & \cdots & V_{TS} \end{bmatrix} \quad (7.2)$$

Denklem 7.1'deki matriste, i 'nci parçacık $X_i = [X_{i1} \ X_{i2} \ \dots \ X_{iN}]$ olarak ifade edilir. P_{best} matrisi ise denklem 7.3'deki gibidir.

$$P_{best} = \begin{bmatrix} P_{best_{11}} & \dots & P_{best_{1S}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{best_{T1}} & \dots & P_{best_{TS}} \end{bmatrix} \quad (7.3)$$

Denklem 7.3' de her bir satır; bir parçacığın S boyutlu arama uzayındaki kişisel en iyi konumlarıdır. Global en iyi pozisyon (gbest) ise tüm pbest ler arasındaki en iyi konum olarak adlandırılır ve matris formu denklem4'teki gibidir.

$$G_{best} = [gbest_1 \ gbest_2 \ \dots \ gbest_S] \quad (7.4)$$

Parçacık sürü algoritması kavramsal olarak, parçacıkların hızlarının her bir nesilde kendi yerel en iyi konumlarına ve sürünün global en iyi konumuna göre belirlenmesine dayanır. Evrimsel gelişim süresinde her bir parçacığın hızı ve konumu denklem 7.5 ve 7.6 ile güncellenmektedir [101].

$$v_{id}^{t+1} = \omega \cdot v_{id}^t + c_1 \cdot r_1 \cdot (pbest_{id}^t - x_{id}^t) + c_2 \cdot r_2 \cdot (gbest_{gd}^t - x_{id}^t) \quad (7.5)$$

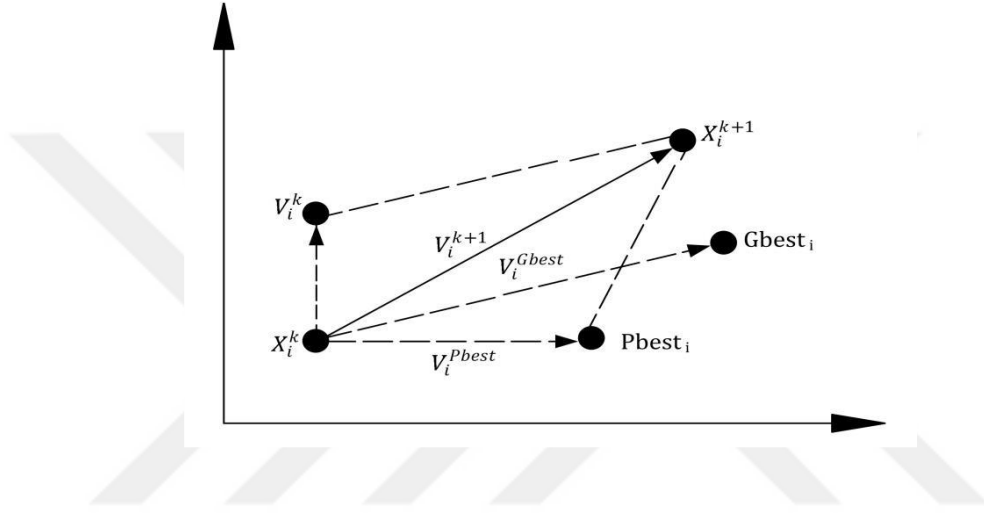
$$x_{id}^{t+1} = x_{id}^t + v_{id}^{t+1} \quad (7.6)$$

Burada; $i = 1, 2, \dots, t$; $d = 1, 2, \dots, s$. Denklem 7.5'deki c_1 ve c_2 sabitleri pozitif değerli olup c_1 pbest, c_2 ise gbest etkisi ile oluşan katsayılarıdır ve bu katsayılar sosyal etkiler nedeniyle oluşmaktadır. c_1 ve c_2 değerleri genellikle 0,2 ile 2 arasında değişmektedir. r_1 ve r_2 katsayıları rastgele sayılardır ve her iterasyonda yenilediğinden probleme verilen yanıtta bir rastlantısallık katmaktadır. r_1 ve r_2 katsayıları 0 ile 1 aralığında değişmektedir. ω ise atalet momenti olup, genellikle 0,1 ile 1 aralığında değişmektedir [102-106]. PSO'da eylemsizlik ağırlığı global ve yerel arama yeteneğini dengelemek için kullanılmaktadır. Büyük eylemsizlik momenti global arama, küçük eylemsizlik momenti ise yerel arama yapmayı kolaylaştırır. Böylece eylemsizlik momenti yerel ve global araştırma arasındaki dengeyi sağlar ve en az sayıdaki iterasyonla sonuca götürmeyi amaçlar. Buradaki her bir parçacık; sürüdeki sadece en iyi parçacığın değil sürüdeki diğer tüm parçacıkların tecrübelerinden de yararlanmış olur [107].

ω 'nın doğrusal azaltılması denklem 7.7' deki ifade ile sağlanır [99].

$$\omega = \omega_{maks.} - iter \cdot \frac{\omega_{maks.} - \omega_{min}}{iter_{maks.}} \quad (7.7)$$

PSO'da parçacıklar çoklu arama uzayında iterasyon tamamlanana kadar pozisyonlarını değiştirirler. PSO'da arama uzayındaki değişimler Şekil 7.1'da gösterilmiştir [108].



Şekil 7.1. PSO parametrelerinin vektör olarak gösterimi [108]

Burada,

X^k : Anlık pozisyonu

X^{k+1} : Bir sonraki pozisyonu

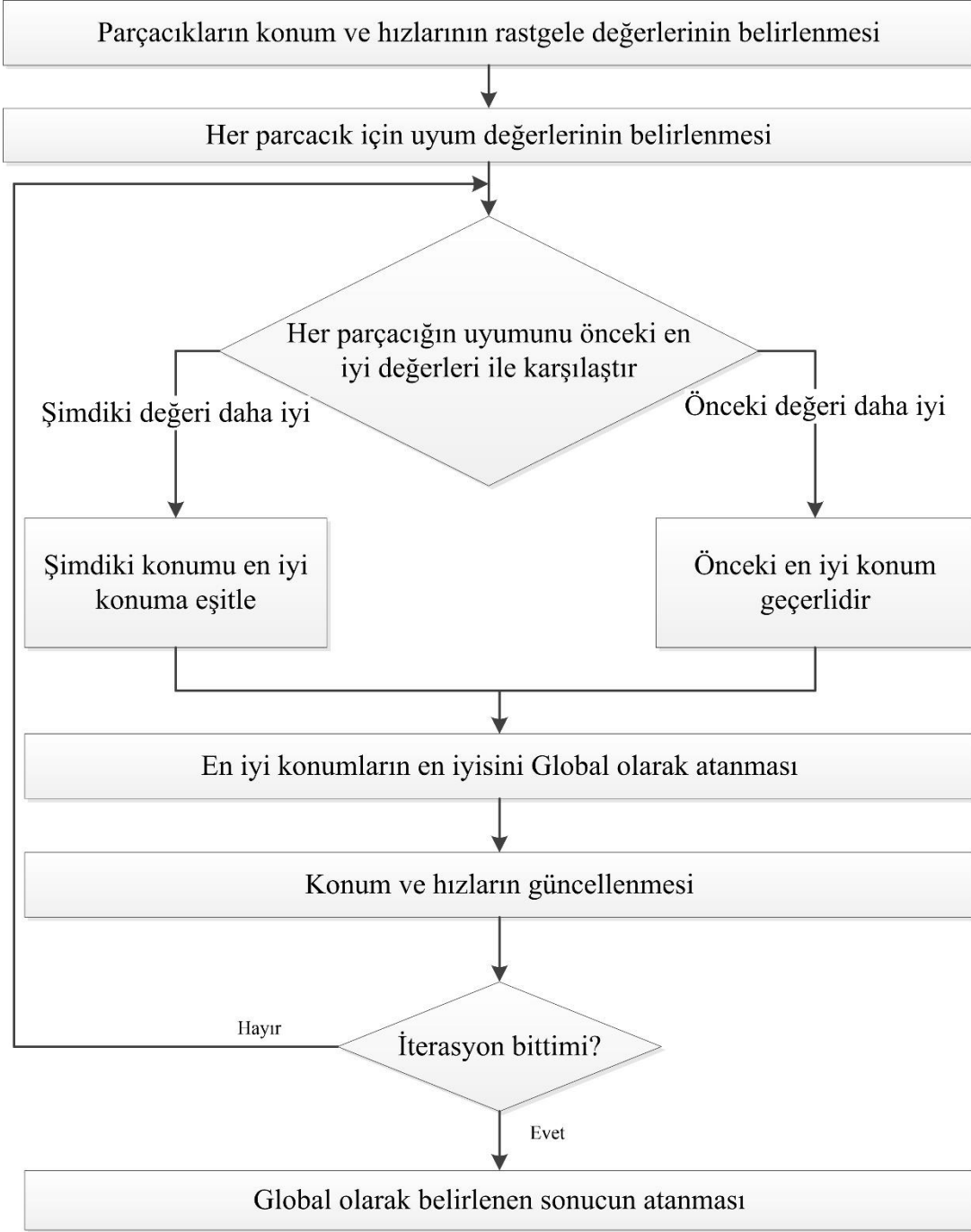
V^k : Anlık hızı

V^{k+1} : Bir sonraki hızı

V^{Pbest} : Pbest tabanlı hızı

V^{Gbest} : Gbest tabanlı hızı ifade etmektedir.

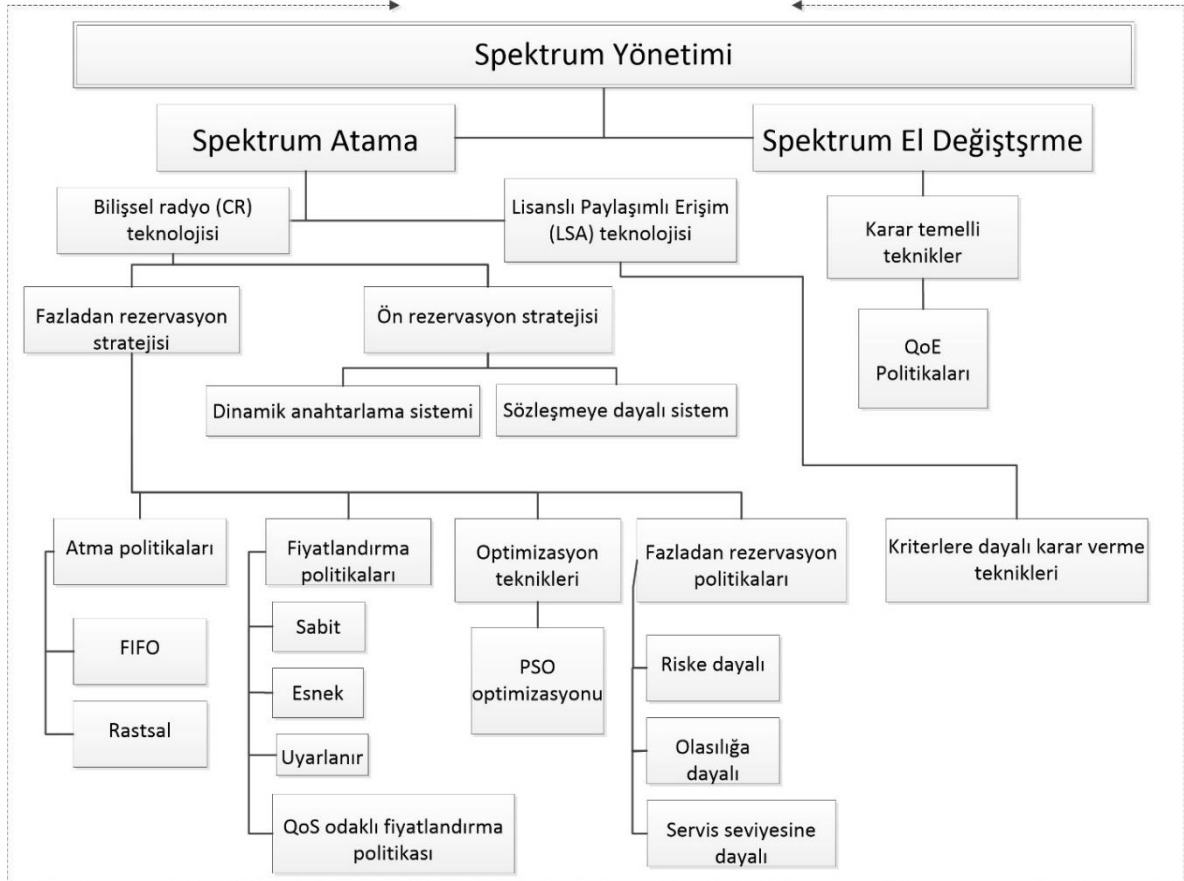
Hareket kontrolü için geliştirilen algoritma Şekil 7.2 de sunulmuştur.



Şekil 7.2. Hareket kontrolü için PSO akış diyagramı [108]

8. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu tezde önerilen spektrum yönetim çerçevesinin genel şeması Şekil 8.1’de gösterilmektedir. İlerleyen bölümlerde, tasarlanan çerçevenin adımları ve kullanılan teknolojiler adım adım anlatılmıştır. CR (Bölüm 2) ve LSA (Bölüm 3) teknolojilerine dayalı fazladan rezervasyon (Alt Bölüm 8.2), ön rezervasyon (Alt Bölüm 8.3), ve el değiştirme (Alt Bölüm 8.4) , üç farklı Alt Bölüm olarak anlatılmaktadır.



Şekil 8.1. Tasarlanan spektrum yönetim çerçevesinin akış şeması

8.1. Kullanıcıların Tanımlanması

Bu çalışmada CR ve LSA'ye dayalı geliştirilen çerçeveler, bir MNO ve üç ana kullanıcı türü olmak üzere dört bileşenden oluşmaktadır:

1. MNO, belirli bir frekans aralığında belirli bir sayıda spektrum bandını (SB) CR teknolojisi ile kontrol ederek lisanslı ve lisanssız kullanıcılarına spektrum erişimi sağlar.

2. Tüm SB'lere, istedikleri zaman erişebilen N adet birincil veya lisanslı kullanıcı (primary user, PU) olduğu kabul edilerek n 'inci PU, PU_n olarak etiketlenir, burada φ , SB'lerin toplam sayısı olmak üzere, $n < N$ ve $N \leq \varphi$ 'dir.

3. Şekil 8.2'de kullanıcı sınıfları verilmiştir. Veri iletimi için SB talebinde bulunan M sayıda ikincil kullanıcı (Requesting Secondary User, RSU) varsayılmaktadır. İstek iki farklı RSU tipi tarafından MNO'ya iletilmektedir: Önceden rezervasyon yapan RSU (Pre Reserved RSU, PRSU) ve Anlık RSU (Instant RSU, IRSU). PRSU rezervasyon sistemini kullanırken, IRSU SB'yi anında istemektedir. PRSU ve IRSU için spektrum bandı kullanmak adına aşağıdaki durumlardan biri oluşacaktır:

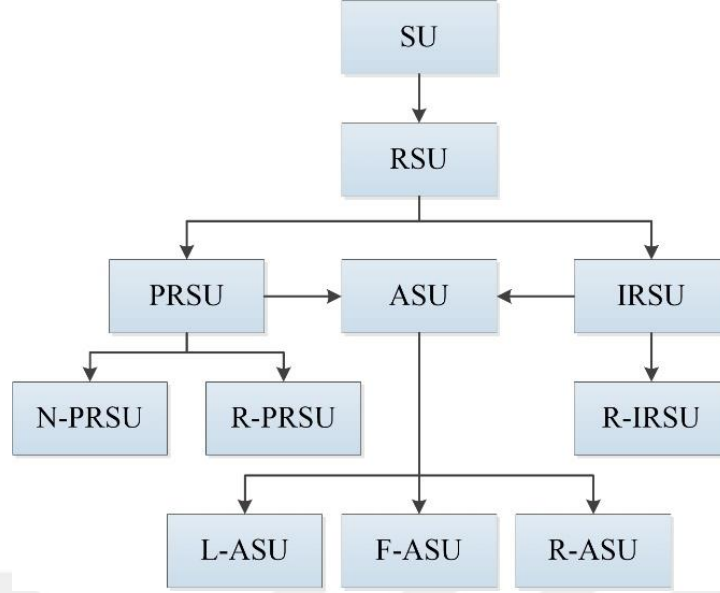
- Reddedilen PRSU (R-PRSU): SB'yi rezerve eder, ancak kullanma zamanı vardığında PU etkinliği nedeniyle hizmet süresinin başında PRSU reddedilir.
- Reddedilen IRSU (R-IRSU): Hemen SB'yi ister ancak boş spektrum bandlarının (free spectrum band, FSB) olmaması nedeniyle reddedilir.
- Gelmeyen PRSU (N-PRSU): SB'yi rezerve eder, ancak kullanma zamanı vardığında aktif olmaz.

Yukarıda bahsedilen durumlardan hiçbiri meydana gelmezse, PRSU istekte bulunduğu zamana kadar bekleme modunda kalacaktır.

4. Belirtilen kurallar ve koşullar aracılığıyla SB'ye hâlihazırda erişmiş ve halen kullanan K tane aktif ikincil kullanıcıya ASU adı verilmiştir. SB kullanımı, ASU tarafından herhangi bir PU etkinliği algılanmadığı sürece devam etmektedir. K 'ıncı ASU, ASU_k için $k < K$ olmak üzere aşağıdaki durumlardan biri oluşacaktır:

- Ayrılmış ASU (L-ASU): servis süresi dolmadan SB'yi terk eder.
- İşini bitirmiş ASU (F-ASU): servis süresi dolduktan sonra veri iletimini bitirir.
- Reddedilen ASU (R-ASU): PU etkinliği nedeniyle reddedilir.

Tüm PU ve RSU faaliyetleri ($PU_{ActivityRatio}$ ve $RSU_{ActivityRatio}$) Poisson dağılımı [109] ile modellenmiştir.



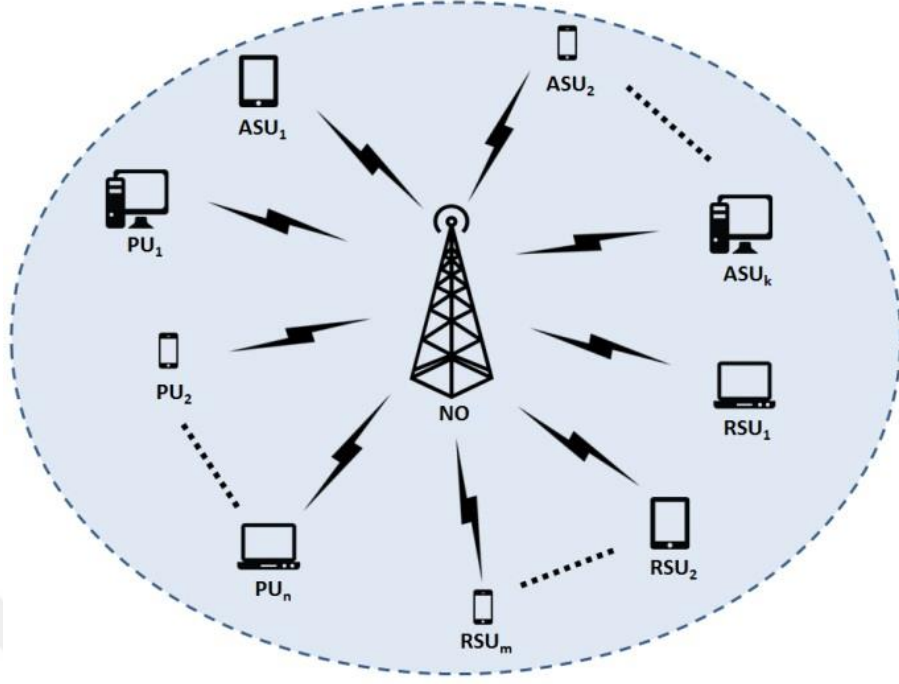
Şekil 8.2. Kullanıcı türleri ve aralarındaki iletişim

8.2. Bilişsel Radyo Ağlarda Fazladan Rezervasyon Modeli

Bilişsel radyo Ağlarda Fazladan Rezervasyon Modeli (Instant Overbooking Framework for Cognitive Radio networks, IOFCR) için göz önünde bulundurduğumuz bilişsel radyo ağ sistem modeli Şekil 8.3'de sunulmuştur. Sistem model içerisinde M adet RSU göz önünde bulundurulmuştur. Her bir RSU lisanssız kullanıcı olarak spektrum bandına erişebilmek için veri iletişimi başlatma isteğinde bulunmaktadır. IOFCR sistem modelindeki RSU'lar IRSU kategorisine bağlı olarak anlık rezervasyon talebinde bulunmaktadırlar. Her bir RSU rezervasyon talebini MNO'ya iletir; MNO, boş spektrum bandı durumunu göz önünde bulundurarak talepleri değerlendirmektedir. Talebin red veya kabul durumuna göre, RSU'lar spektrum bandına erişebilir veya erişme hakkına sahip olamazlar.

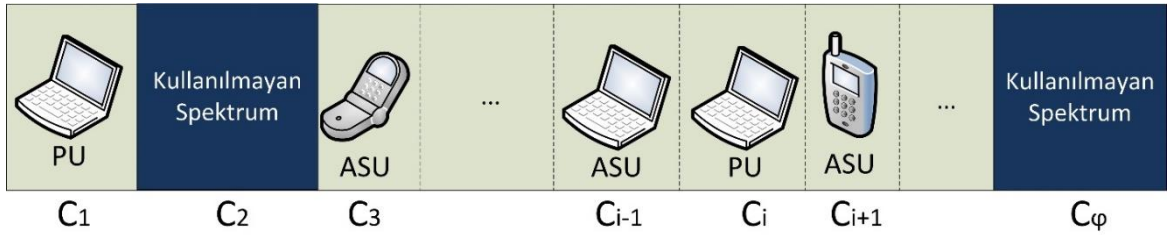
MNO eşit sinyal / gürültü oranında kanal profiline sahip φ adet frekans bandına sahiptir. Spektrum bandlarının tahsisi Şekil 8.4'de verilmiştir. Spektrum bandları $i < \varphi$ olmak üzere C_i ile gösterilmektedir ve her spektrum bandı üç farklı durumda olabilir:

- 1) Bir PU tarafından kullanılabilir.
- 2) Bir ASU tarafından kullanılabilir.
- 3) Serbest olabilir, bu serbest spektrum bandlar FSB ile gösterilmektedir.

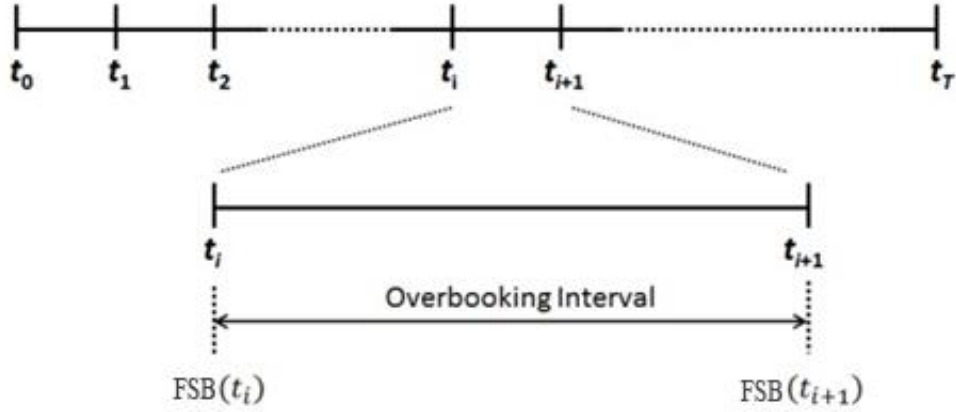


Şekil 8.3. Bilişsel radyo (CR) ağlarda fazladan rezervasyon sistem modeli [109]

MNO, PU'lara, ASU'lara ve RSU'lara ait listeleri saklamaktadır. Bu listeler zaman aralığına ($t_0.t_T$) göre değişir. t_i zaman anında, MNO hem PU'ların hem de ASU'ların listesini güncellemektedir. Ayrıca, MNO her t_i 'de FSB'lerin sayısına bağlı olarak fazladan rezervasyon stratejisini uygulayıp uygulamayacağına karar verebilmektedir. Bu konu ile ilgili detaylar ilerleyen bölümlerde sunulmaktadır. ($t_0.t_T$) zaman aralığı Şekil 8.5'te gösterilmiştir.



Şekil 8.4. Spektrum tahsisi



Şekil 8.5.Zaman aralığı

t_i zaman anı, (t_i, t_{i+1}) rezervasyon aralığının başlangıcıdır. Her t_i 'de üç tür olay meydana gelebilir:

1. PU'lerden bazıları ve ASU'lerden bazıları, veri aktarımı ve veri iletiminde kullandıkları spektrum bandlarını serbest bırakırlar. İlgili spektrum bandlar FSB'ye dönüşürler.
2. ASU'lerden bazıları kullandıkları spektrum bandlarını zorunluluktan dolayı serbest bırakabilirler. İlgili spektrum bandları PU'lar tarafından kullanılır. Bu nedenle, serbest bırakılan spektrum bandlar FSB'ye dönüşmemektedir.
3. RSU'lar rezervasyon taleplerini iletirler. MNO, t_{i+1} anına kadar gelen tüm talepleri toplayıp anlık t_i 'deki FSB'lerin sayısı olan $FSB(t_i)$ 'ye bağlı olarak fazladan rezervasyon uygulayıp uygulamayacağına karar verir. FSB yoksa veya FSB sayısı tüm taleplerin sayısından küçükse taleplerin tamamı veya bir kısmı reddedilir. Bu durumda, RSU'lar tarafından ödenilen rezervasyon fiyatı telafi edilmelidir. Bunun yanı sıra, hizmet zamanı t_i 'de, spektrum bandlara erişim izni verilen RSU'lar ASU listesine eklenirler.

8.2.1. Bilişsel Radyo Ağlarda Fazladan Rezervasyon Modelinin Kavram Tanımı

Bilişsel radyo Ağlarda Fazladan Rezervasyon Modeli IOFCR'ın başlıca parametreleri, MNO'lar tarafından SU'lara spektrum bandı tahsis ederek elde edilen kazanç (Total Net Revenue, TNR), SU'lara ödenilen tazminat (Compensation Cost, CC), spektrum

kullanımı, fazladan rezervasyon sınırı, reddedilen RSU'ların sayısı, çıkarılan ASU'ların sayısı, ASU'lar için ortalama hizmet süresi ve serbest spektrum bantların sayısı gibi özetlenmiştir.

FSB, herhangi bir kullanıcı türü tarafından herhangi bir zaman diliminde veri iletimi için kullanılmayan bir spektrum bandıdır. t_i 'deki toplam FSB sayısı şu şekilde formüle edilir:

$$FSB(t_i) = \varphi - [|L_{PU}(t_i)| + |L_{ASU}(t_i)|] \quad (8.1)$$

Burada, φ , MNO tarafından tutulan toplam spektrum bandı sayısıdır, $L_{PU}(t_i)$ ve $L_{ASU}(t_i)$, sırasıyla, t_i 'deki PU'ların ve ASU'ların listelerini göstermektedir. $L_{PU}(t_i)$ 'deki PU'ların sayısı φ ile sınırlanmış ve $L_{PU}(t_i)$ listesi şu şekilde verilir:

$$L_{PU}(t_i) = \{ PU_j \mid 1 \leq j \leq \varphi, 1 \leq i \leq T \} \quad (8.2)$$

Burada T toplam zaman aralıklarının sayısıdır. Benzer şekilde, $L_{ASU}(t_i)$ 'deki ASU sayısı, önceki zaman aralığındaki ASU sayısı tarafından üst sınır olarak kabul edilir ve $L_{ASU}(t_i)$ listesi aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$L_{ASU}(t_i) = \{ ASU_j = (p_j, sp_j, sn_j) \mid 1 \leq j \leq |L_{ASU}(t_{i-1})|, 1 \leq i \leq T \} \quad (8.3)$$

$L_{ASU}(t_i)$ 'deki her bir ASU_j , üç öğeden oluşmaktadır. p_j , rezervasyon aralığında $(t_i, t_i + 1)$ ASU_j tarafından ödenilen rezervasyon fiyatıdır. sp_j , t_i 'ye kadar ASU_j 'in servis süresidir ve sn_j , ASU_j 'lerin sıra numarasıdır. Önerilen çerçevede, ASU_j hizmet almaya başladığında sp_j 1 olarak ayarlanır ve ilgili ASU_j spektrum bandı gönüllü olarak serbest bırakmadığı veya devredışı olmadığı sürece sp_j her $(t_i, t_i + 1)$ zaman aralığında artmaktadır.

Ayrıca MNO, SU'lar tarafından iletilen spektrum rezervasyon isteklerinin listesini tutmaktadır. İsteklerin $(t_i, t_i + 1)$ rezervasyon aralığında, fazladan rezervasyon sınırına ulaşılmadığı sürece, listeye eklenirler:

$$L_{RSU}(t_{i+1}) = \{ RSU_j = (p_j, sn_j) \mid 1 \leq j \leq BL(t_i), 1 \leq i \leq T \} \quad (8.4)$$

Burada $BL(t_i)$ Bölüm 5.1'de bahsedilen fazladan rezervasyon politikalarından biri vasıtasıyla t_i zaman anındaki üst sınırı belirler. $L_{RSU}(t_{i+1})$ 'deki her bir RSU_j iki öğeden

oluşmaktadır. Burada p_j , rezervasyon aralığında RSU_j tarafından ödenilen rezervasyon fiyatıdır ve sn_j , RSU_j 'nin sıra numarasıdır. $L_{ASU}(t_i)$ ve $L_{RSU}(t_{i+1})$ arasındaki tek yapısal fark, $L_{RSU}(t_{i+1})$ 'deki her RSU_j 'in spektrum bandına erişebileceğinden emin olmadığından dolayı sp_j göz önünde bulundurulmamıştır. Diğer bir deyişle, herhangi bir RSU_j serbest bir spektrum bandı kullanmaya kabul edildiğinde, $L_{ASU}(t_{i+1})$ üyesi olur ve hizmet süresinin ölçülmesi amacıyla $L_{ASU}(t_{i+1})$ listesine sp_j eklenmiştir (denklem 8.3). Dolayısıyla, fazladan rezervasyon sınırı $BL(t_i)$, $FSB(t_i)$ 'ye bağlıdır. Eğer RSU_j 'in $j > BL(t_i)$ ise RSU_j 'ye servis verilmemektedir.

Sorun, $FB(t_{i+1}) < 0$ olduğunda ortaya çıkmaktadır. Bu durumda, $L_{RSU}(t_{i+1})$ 'deki tüm RSU'ların reddedilmesi ve rezervasyon fiyatlarının $L_{RSU}(t_{i+1})$ 'daki her RSU_j için telafi edilmesi (Compensation Cost, CC) gerekmektedir. Ayrıca, CC için başka bir vaka vardır; $\varphi - |L_{PU}(t_i)| = 0$ olduğu zaman, ASU'lara CC ödenmelidir. Yani, t_i anında, hem RSU'lar hem de ASU'lar için herhangi bir FSB mevcut değil demektir. Bu sayede, bir süre için hizmet alan ASU'lar, daha önce rezervasyon için ödeme yapan RSU'ların aksine daha az ödeme yapılmaktadır. RSU'lar ve ASU'lara ödenilen CC arasındaki ayrımcılığın arkasındaki fikir toplam CC'yi asgariye indirmektir. İlgili durumların yanı sıra, iki farklı durum daha söz konusudur:

- $|L_{ASU}(t_i)| > \varphi - |L_{PU}(t_i)| > 0$ ve
- $|L_{RSU}(t_{i+1})| > \varphi - (|L_{PU}(t_i)| + |L_{ASU}(t_i)|) > 0$

Birinci durum, bazı ASU'ların atılmasını gerektirmektedir ve bu da ASU'ların spektrum bandları terk etmeye zorlamaktadır. İkinci durum, bazı RSU'ların kabul edilmemesi ile ilgilidir. Böylece, bazı sorunlar ortaya çıkmaktadır. Örneğin:

- Ne zaman bir fazladan rezervasyon politikası uygulanmalıdır,
- Rezervasyon aralığında bir fiyatlandırma politikası nasıl belirlenmelidir,
- $L_{RSU}(t_{i+1})$ 'deki hangi RSU'lar kabul edilmelidir,
- Hangi ASU'lar $L_{ASU}(t_i)$ 'dan çıkartılmalıdır ve
- ASU'lar ve RSU'lar için bir CC politikası nasıl belirlenmelidir.

Bu sorunlarla ilgili önerilerimiz ve çözümlerimiz ilerleyen başlıklarda anlatılacaktır (8.2.2, 8.2.3, 8.2.4, 8.2.5, 8.2.6, 8.2.7).

8.2.1.1. Kullanıcıların Modellemesi

Bir PU'nun faaliyet oranı (on-rate), α ile gösterilmektedir. İlgili oran her zaman aralığında PU'nun faaliyet olasılığını belirlemektedir. [11]'de α 'nın %15 ila %85 arasında değiştiği belirtilmiştir. α 'nın olasılık dağılım fonksiyonu Poisson dağılımı ile modellenmiştir, $0 \leq \alpha(t_i) \leq 1$. Her t_i 'da, $L_{PU}(t_{i+1})$ boyutu (PU'ların sayısı) φ ve $\alpha(t_i)$ 'ye göre güncellenmektedir:

$$|L_{PU}(t_{i+1})| = \varphi \times \alpha(t_i) \quad (8.5)$$

Dolayısıyla $|L_{PU}(t_{i+1})|$, $|L_{PU}(t_i)|$ 'den daha küçük veya daha büyük olabilir. Böylelikle, zaman aralığına göre RSU'lar için az, çok veya hiç FSB bulunmayacağı anlamına gelmektedir.

ASU'lar binom dağılımını izleyen bir faaliyet oranı (on-rate) β ile modellenmektedirler. $\beta(t_i)$, t_i 'da bir ASU'nun faaliyet oranını göstermektedir. Burada, $0 \leq \beta(t_i) \leq 1$ ve $L_{ASU}(t_{i+1})$ boyutu $L_{ASU}(t_i)$ boyutuyla sınırlanmıştır. Böylece ASU'lerin liste boyutunun güncellenmesi şu şekilde formüle edilmektedir:

$$|L_{ASU}(t_{i+1})| = |L_{ASU}(t_i)| \times \beta(t_i) \quad (8.6)$$

Dolayısıyla, $L_{ASU}(t_{i+1}) \leq L_{ASU}(t_i)$ şart sağlanırsa ASU'lar bir sonraki zaman aralığında veri iletimine devam edebilirler. Bu güncelleme işlemi sırasında $L_{ASU}(t_{i+1})$ kullanıcıları $L_{ASU}(t_i)$ 'den rasgele seçilir.

t_{i+1} 'de RSU'ların talep oranı (show-rate) δ ile gösterilir. α ve β için verilen aynı argümanlara benzer şekilde, δ de binom dağılımını takip eder, $0 \leq \delta(t_{i+1}) \leq 1$. $L_{RSU}(t_{i+1})$ listesi şu şekilde güncellenecektir:

$$|L'_{RSU}(t_{i+1})| = |L_{RSU}(t_{i+1})| \times \delta(t_{i+1}) \quad (8.7)$$

$L'_{RSU}(t_{i+1})$ elemanlarının rasgele $L_{RSU}(t_{i+1})$ 'dan seçildiği unutulmamalıdır. Bu çalışmanın ilerleyen bölümlerinde ASU ve PU faaliyet oranı ve RSU talep oranından sürekli bahsedilecektir. Kolaylık sağlamak adına genel olarak 'PU, ASU ve RSU faaliyet oranı' olarak tanımlanmıştır.

8.2.2. Bilişsel Radyo Ağlarda Fazladan Rezervasyon Çerçeve Yapısı

Fazladan rezervasyon politikasının fazladan rezervasyon sınırı $BL(t_i)$, rezervasyon aralığının başındaki FSB'lerin sayısına bağlıdır. $BL(t_i)$, rezervasyon tekniklerine dayanarak (Bölüm 6.1) hesaplanmıştır. Burada önemli olan t_i zamanında boş spektrum bandı sayısıdır ($FSB(t_i)$). Bu sayıya dayanarak MNO fazladan rezervasyon politikasının kullanılması veya kullanılmamasına karar vermektedir. $FSB(t_i)$ sifıra eşit veya sıfırdan küçükse, t_i zamanında boş spektrum bandının olmadığından dolayı fazladan rezervasyon politikası uygulanmaz. $FSB(t_i)$ sıfırdan büyük olduğu surette Bölüm 6.1'de bahs edilen üç farklı rezervasyon tekniği Riske Dayalı, Olasılığa Dayalı ve Servis Seviyesine Dayalı fazladan rezervasyon sınırını $BL(t_i)$ belirlemektedir. *BookingPolicy* parametresi MNO tarafından kullanılan fazladan rezervasyon politikasını belirlemektedir (*Overbooking*($FSB(t_i)$, *BookingPolicy*) – Bölüm 12.1 Algoritma 13.1 Satır 2-7).

(t_i, t_{i+1}) rezervasyon aralığında RSU talep sayısı toplanır ($BL(t_i)$ sınırını geçmediği sürece) ve $L_{RSU}(t_{i+1})$ listesine eklenir:

$$L_{RSU}(t_{i+1}) = L_{RSU}(t_{i+1}) \cup \{\text{yeni RSU}\} \quad \text{if } |L_{RSU}(t_{i+1})| \leq BL(t_{i+1}) \quad (8.8)$$

ASU faaliyet oranı β arttıkça, ASU'lar tarafından boşalan spektrum bandı sayısı azalmaktadır. Bu yüzden, t_{i+1} 'de daha az sayıda boş spectrum bandı elde edilecektir. $FSB(t_{i+1})$ 'de bir düşüş $L_{RSU}(t_{i+1})$ 'daki RSU'ların kabul oranı ve elde edilen TNR'nun düşmesi anlamına gelmektedir. Bu noktada aşağıdaki üç hususa dikkat edilmelidir:

- (i) MNO gelirini en yükseğe çıkarmak istemektedir.
- (ii) ASU'lar hizmet almaya devam etmek istemektedirler.
- (iii) RSU'lar, kendi aralarında ve ASU'lar arasındaki adaletsizliğin korunmasını istemektedirler (SU'lar arasında adalet sağlanması).

Yukarıda bahsedilen konularla ilgili olarak, ASU'lar için iki öncelik düzeyi $priority_{ASU}$ olarak tanımlanabilir:

1. Eğer $priority_{ASU}$ 1'e eşitse, fazla hizmet alan ASU'lar olarak bu ASU'lara daha az öncelik verilecektir. ASU'ların ortalama hizmet süreleri ve standart sapmalarına göre en fazla değeri elde eden ASU'lar atılmalıdır. Hizmet sürelerinin ortalaması ve standart sapması $E(SP)$ ve $\sigma(SP)$ olarak gösterilmektedir. Böylece, (i) ve (iii) konuları daha iyi ele alınmıştır. Atılacak ASU'lar aşağıdaki gibi bulunmaktadır:

$$L_{ASU}^{Eject}(t_{i+1}) = \{ASU_j | sp_j > E(SP) + 2 \times \sigma(SP)\} \quad (8.9)$$

Benzer şekilde, denklem (8.6) aşağıdaki gibi iki aşamada yeniden formüle edilmiştir:

$$|L_{ASU}(t_{i+1})| = |L_{ASU}(t_i)| \times \beta(t_i) \quad (8.10.a)$$

$$|L_{ASU}(t_{i+1})| = |L_{ASU}(t_{i+1})| - |L_{ASU}^{Eject}(t_{i+1})| \quad (8.10.b)$$

(8.10.a)'de, bazı ASU'lar spektrum bandları gönüllü olarak serbest bırakır ve (8.10.b)'de (8.9)'a göre atılan ASU'lar listeden çıkartılmıştır.

Çıkarılan ASU'lar için tazminat bedeli (CC) hesaplanır:

$$CC_{ASU}(t_{i+1}) = \sum_{j=1}^{|L_{ASU}^{Eject}(t_{i+1})|} \left[p_j - \left(sp_j \times \frac{p_j}{cc_{ACT}} \right) \right] \quad (8.11)$$

p_j , $ASU_j \in L_{ASU}^{Eject}(t_{i+1})$ tarafından ödenilen rezervasyon fiyatıdır, sp_j , $ASU_j \in L_{ASU}^{Eject}(t_{i+1})$ 'nin hizmet periyodu ve cc_{ACT} sistem gereksinimlerine göre MNO tarafından ASU'lar için düzenlenen CC oranıdır.

2. Eğer $priority_{ASU}$ 2'ye eşitse, ASU'lar hizmet almak açısından RSU'lara göre öncelikleri vardır. t_{i+1} 'daki ASU'ların sayısı Denklem (8.6)'da belirtildiği gibi hesaplanmaktadır.

$L_{PU}(t_{i+1})$, $L_{ASU}(t_{i+1})$ ve $L'_{RSU}(t_{i+1})$ sırasıyla (8.5), (8.6 veya 8.10) ve (8.7) denklemleri olarak (t_i, t_{i+1}) aralığında güncellenecekler. $FSB(t_{i+1})$ belirlendikten sonra (Denklem (8.1)), dört durum oluşmaktadır:

Durum 1: $|L'_{RSU}(t_{i+1})| \leq FB(t_{i+1})$. Eğerki denklem (8.7)'de verilen RSU'ların sayısı servis zamanındaki boş spektrum bandlarının sayısına eşit veya daha az ise, RSU'lardan gelen tüm talepler kabul edilecektir.

Bu durumda CC ödenmeyecek ve tüm talepte bulunan RSU'lar t_{i+1} 'de ASU listesine eklenecektir:

$$L'_{ASU}(t_{i+1}) = L_{ASU}(t_{i+1}) \cup L'_{RSU}(t_{i+1}) \quad (8.12)$$

Durum 2: $0 \leq FB(t_{i+1}) < |L'_{RSU}(t_{i+1})|$. Bu durum, yalnızca belirli sayıda RSU'ların kabul edileceğini göstermektedir. Sonuç olarak, bazı RSU'lar red politikalarına dayanarak, $L'_{RSU}(t_{i+1})$ 'den çıkarılmalıdır. Farklı red politikaları hakkında Bölüm 8.2.7'de bahsedilecektir.

Red politikaları, RSU'ların, (t_i, t_{i+1}) aralığında ödediği rezervasyon fiyatını göz önünde bulundurarak reddedilecek RSU'ların listesini $L_{RSU}^{Deny}(t_{i+1})$ oluşturur ($Deny(L'_{RSU}(t_{i+1}), DenialPolicy)$, Bölüm 12.1 Algoritma 13.1 Satır 26). Böylece, t_{i+1} 'de RSU'lara ödenecek CC aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$CC_{RSU}(t_{i+1}) = \sum_{j=1}^{|L_{RSU}^{Deny}(t_{i+1})|} [p_j \times (ccr_{REQ} + 1)] \quad (8.13)$$

Burada, p_j , RSU tarafından ödenilen rezervasyon fiyatıdır. ccr_{REQ} , RSU'lar için CC oranıdır ve sistem gereksinimlerine göre MNO tarafından düzenlenmektedir. Daha sonra, $L'_{RSU}(t_{i+1})$ güncellenir:

$$L''_{RSU}(t_{i+1}) = L'_{RSU}(t_{i+1}) \setminus L_{RSU}^{Deny}(t_{i+1}) \quad (8.14)$$

$L''_{RSU}(t_{i+1})$ içindeki her RSU, bir spektrum bandı erişimi kazanmıştır ve aşağıdaki ifadeyle bir ASU haline gelmiştir:

$$L'_{ASU}(t_{i+1}) = L_{ASU}(t_{i+1}) \cup L''_{RSU}(t_{i+1}) \quad (8.15)$$

Durum 3: $FB(t_{i+1}) < 0$ ve $0 \leq (\varphi - |L_{PU}(t_{i+1})|) < (L_{ASU}(t_{i+1}))$. Bu durumda tüm rezervasyon isteklerinin reddedilmesi gerekir. Ayrıca bazı ASU'ların aşağıdaki duruma göre çıkartılması gerekir:

Bu çalışma bağlamında, yeterli miktarda FSB bulunmadığı için, PU etkinliği algıladığına göre ASU'nun kullandığı spektrum bandı terketmelidir. Çıkarılacak ASU'ların sayısı:

$$|L_{ASU}^{Eject}(t_{i+1})| = |L_{ASU}(t_{i+1})| - (\varphi - |L_{PU}(t_{i+1})|) \quad (8.16)$$

$L_{ASU}^{Eject}(t_{i+1})$ listesi çıkarılacak ASU'ların listesini döndürür (ayrıntılar Bölüm 8.2.7'de anlatılacaktır). Servis dışı olan ASU'lar için tazminat bedeli ($CC_{ASU}(t_{i+1})$)

RSU'ların tazminat bedelinden ($CC_{RSU}(t_{i+1})$) farklıdır; sadece rezervasyon fiyatına bağlı değil, aynı zamanda hizmet süresine bağlıdır. Yani, daha fazla hizmet alan ASU'lar, daha az spektrum bandını kullanan ASU'ların aksine daha az CC alacaklardır. Servis dışı olan ASU'lar için CC Denklem 8.11'de gösterilmektedir. Dolayısıyla, her ASU için ödenilen CC her RSU için ödenilen CC'den daha azdır. CC ile ilgili fark “Daha fazla hizmet süresi, daha az tazminat” motivasyona dayanmıştır.

Reddedilen RSU'lar için, CC aşağıdaki gibi elde edilir:

$$CC_{RSU}(t_{i+1}) = \sum_{j=1}^{|L'_{RSU}(t_{i+1})|} [p_j \times (ccr_{REQ} + 1)] \quad (8.17)$$

Burada p_j , RSU_j tarafından ödenilen rezervasyon fiyatıdır. Durum3'te $L'_{RSU}(t_{i+1})$ 'daki tüm RSU'lar reddedildiğinden dolayı, RSU'lar için bir red listesi oluşturulmamıştır.

t_{i+1} 'deki toplam CC aşağıdaki gibi hesaplanmıştır:

$$CC(t_{i+1}) = CC_{RSU}(t_{i+1}) + CC_{ASU}(t_{i+1}) \quad (8.18)$$

ve, ASU'ların listesi de güncellenmiştir:

$$L'_{ASU}(t_{i+1}) = L_{ASU}(t_{i+1}) \setminus L_{ASU}^{Eject}(t_{i+1}) \quad (8.19)$$

Durum 4: $|L_{PU}(t_{i+1})| = \emptyset$. Bu durumda tüm RSU'lar reddedilir ve tüm ASU'lar atılmalıdır. Toplam CC aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$CC(t_{i+1}) = \sum_{j=1}^{|L'_{RSU}(t_{i+1})|} [p_j \times (ccr_{REQ} + 1)] + \sum_{k=1}^{|L_{ASU}(t_{i+1})|} \left[p_k - \left(sp_k \times \frac{p_k}{ccr_{ACT}} \right) \right] \quad (8.20)$$

Burada p_j , RSU_j tarafından ödenilen rezervasyon fiyatıdır. ccr_{REQ} , RSU'lar için CC oranıdır. p_k , ASU_k tarafından ödenilen rezervasyon fiyatıdır ve ccr_{ACT} sistem gereksinimlerine göre MNO tarafından ASU'lar için düzenlenen CC oranıdır.

Önerilen çerçevenin algoritması Ekler Bölümünde Pseudo Kodlar kısmında Algoritma 13.1 olarak verilmiştir.

8.2.3. Bilişsel Radyo Ağlarda Fazladan Rezervasyon Modelinin Fiyatlandırma Yöntemleri

(t_i, t_{i+1}) zaman aralığında rezervasyon talebinde bulunan RSU'lar, fiyatlandırma politikaları tarafından hesaplanmış olan hizmet ücretini ödemelidirler. Bu çalışmada, üç farklı fiyatlandırma politikası Sabit, Esnek ve uyarlanabilir fiyatlandırma politikaları olarak tasarlanmıştır.

8.2.3.1. Sabit Fiyatlandırma Politikası

Sabit fiyat politikasında (Fixed Pricing policy), (t_i, t_{i+1}) rezervasyon aralığında fiyat sabit kalır, p_{base} olarak gösterilmektedir. Bu politikada, RSU'ların rezervasyon isteklerini daha önce veya daha ileri bir zamanda ilettikleri gerçeğinden bağımsız olarak, hepsinden aynı fiyat tahsis edilmektedir.

8.2.3.2. Esnek Fiyatlandırma Politikası

Talep zamanına göre değişiklik gösteren esnek fiyatlandırma politikasında (Flexible pricing Policy) fiyat p_{flex} ile belirtilir. İlgili politika, her RSU için talep zamanını göz önünde bulundurarak servis ücretini belli etmektedir. Modelleme için normal dağılım kullanılmıştır; burada σ değeri (t_i, t_{i+1}) zaman aralığında tanımlanan zaman açısından standart sapmadır ve t_{req} , bir RSU'nun rezervasyon talep süresidir. Böylece, esnek fiyatlandırma politikasıyla ilgili rezervasyon fiyatı şu şekilde ayarlanabilir:

$$p_{flex} = \begin{cases} p_{base} \times (1 - r), & \text{if } t_{req} < -\sigma \\ p_{base}, & \text{if } -\sigma \leq t_{req} \leq +\sigma \\ p_{base} \times (1 + r), & \text{if } t_{req} > +\sigma \end{cases} \quad (8.21)$$

Burada r , sabit rezervasyon fiyat değişkenidir, $0 \leq r \leq 1$.

8.2.3.3. Uyarlanabilir Fiyatlandırma Politikası

Uyarlanabilir Fiyatlandırma Politikası (Adaptive Pricing Policy), (t_i, t_{i+1}) rezervasyon aralığında mevcut spektrum bandı sayısına bağlı olarak rezervasyon fiyatını belirler ve

belirlenen fiyat (t_i, t_{i+1}) zaman aralığında sabit kalmaktadır. Boş spektrum bandı sayısının fazla olması, düşük fiyatlara yol açmaktadır. Tersine, spektrum bandı yetersizliğinde, rezervasyon fiyatı daha yüksek değerlere ayarlanmaktadır. Böyle bir arz ve talep yanıtına bağlı olarak, uyarlanabilir fiyatlandırma aşağıdaki gibi formüle edilmiştir:

$$p_{adaptive} = p_{base} \times \left(1 + \frac{\varphi}{FSB(t_i) \times 100}\right)^2 \quad (8.22)$$

Burada, φ , spektrum bandların toplam sayısıdır ve $FSB(t_i)$, (t_i, t_{i+1}) rezervasyon aralığının başındaki boş spektrum bandların sayısını belli etmektedir.

8.2.3.4. Hizmet Kalitesine Dayalı Fiyatlandırma Politikası

Bu bölümde, Hizmet kalitesine dayalı (QoS-Driven) fiyatlandırma politikası uygulanmıştır. Bu modelde, bazı önemli RSU öznitelikleri aşağıdaki gibi tanımlanır:

Hizmet Süresi (ST_{Req}): Bir RSU tarafından talep edilen hizmet süresi ile ilgilidir. ST_{Req} 'in maksimum değeri toplam zaman aralıklarının sayısını (t_i) aşmamalıdır.

Talep edilen bantgenişliği (BW_{Req}): RSU'nun servis aldığı müddetce kullanacağı bantgenişliğini göstermektedir.

Reddedilen oran (RR): RSU'ların kaç kez önceden ASU olarak MNO tarafından reddedildiğinin oranıdır.

t_i zaman diliminde her RSU için özniteliklerin değeri belirlenmektedir. RSU tarafından ödenecek fiyat $P_{QoS-Driven}(t_i)$ ile hesaplanır. $P_{QoS-Driven}(t_i)$ RSU özniteliklerinin yanı sıra ağ trafiğine dayanarak aşağıdaki gibi belirlenmektedir:

$$P_{QoS-Driven}(t_i) = p_{base} \times R_{QoS}(t_i) \quad (8.23)$$

Burada p_{base} sabit fiyat ve $R_{QoS}(t_i)$ aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$R_{QoS}(t_i) = \begin{cases} \left(1 + \left(RSU(ST_{Req}) \times RSU(BW_{Req})\right)\right) \times (1 - RSU(RR)), & \text{if } TL == high \\ \left(1 + \left(RSU(ST_{Req}) \times RSU(BW_{Req})\right)^{\frac{1}{2}}\right) \times (1 - (RSU(RR))^2), & \text{if } TL == low \end{cases} \quad (8.24)$$

Burada $R_{QoS}(t_i)$ ağ trafiğinin yüksek veya düşük olmasına bağlı olarak hesaplanır. TL ise ağ trafiğini belirlemektedir ve aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$TL(t_i) = (|L_{PU}(t_i)| + |L_{ASU}(t_i)|/\varphi)\% \quad (8.25)$$

Burada t_i zaman dilimindeki PU ve ASU sayısı $|L_{PU}(t_i)|$ ve $|L_{ASU}(t_i)|$ ile belirlenirken φ ise toplam spektrum bandlarının sayısını göstermektedir. Burada TL 'in yüksek veya düşük oranda olmasını belirleyen kriter PU ve ASU faaliyet oranıdır. Fiyatlandırma politikalarının performans analizi Bölüm 9'da ayrıntılı olarak anlatılmıştır.

8.2.4. Bilişsel Radyo Ağlarda Fazladan Rezervasyon Modelinin Fazladan Rezervasyon Yöntemleri

Bu bölümde, kullanılmayan spektrum bandları ile SU'lara servis vererek, fazladan rezervasyonun ağ performansını nasıl artırabileceği anlatılmıştır.

IOFCR çerçevesinde, gelir yönetimi literatürlerinde [39, 40] tanımlanan birkaç fazladan rezervasyon politikasını göz önünde bulundurulmuştur.

Olasılığa Dayalı Yöntem (PB) [27]: Bölüm 5.1'de açıklandığı gibi, fazla rezervasyon kapasitesinin miktarı, spektrum bandı sayısı ve RSU'ların faaliyet oranı δ ile ilgilidir. Dolayısıyla, IOFCR çerçevesinde, t_i 'de fazladan rezervasyon sınırı $BL(t_i)$ şu şekilde belirlenir:

$$BL(t_i) = \frac{\delta(t_i)}{\varphi} \quad (8.26)$$

Burada φ , MNO tarafından kiralanılan toplam spektrum bandı sayısıdır.

Riske Dayalı Yöntem (RB) [27]: IOFCR çerçevesinde, MNO fazladan rezervasyon sisteminin uygulanması ile birlikte, maksimum kapasiteyi aşdığı müddetce, servis zamanında reddedilen RSU veya ASU'lara CC ödeyerek durumu telafi etmektedir. Bu nedenle, toplam gelir (TNR) ve toplam CC'yi dengelemek için bir risk analizi gereklidir.

Bölüm 5.1'de verilen riske dayalı yöntem IOFCR için Algoritma 8.1'deki gibi değiştirilmiştir [37].

Algoritma 8.1. Riske Dayalı Yöntem

$$BL(t_i) \leftarrow \varphi ;$$

$$Revenue \leftarrow [1 - A(BL(t_i))] \times [p - ccr_{REQ} \times (1 - F_{BL(t_i)}(\varphi))];$$

while $Revenue > 0$ **begin**

$$BL(t_i) \leftarrow BL(t_i) + 1 ;$$

$$Revenue \leftarrow [1 - A(BL(t_i))] \times [p - ccr_{REQ} \times (1 - F_{BL(t_i)}(\varphi))];$$

end

return $BL(t_i)$;

Algoritma 8.1'de, $A(BL(t_i))$, t_i anındaki fazladan rezervasyon sınırının, servis talebinde bulunan RSU'ların sayısından az veya beraber olduğunun olasılığıdır. $F_{BL(t_i)}(\varphi)$, t_i 'daki servis talebinde bulunan RSU'ların servisi almak için aktif olma oranının φ 'den küçük veya eşit olma olasılığıdır. Rezervasyon fiyatı P , p_{base} veya p_{flex} olarak ayarlanmaktadır.

Algoritma 8.2. Servis Seviyesine Dayalı Fazladan Rezervasyon Sınırı

$$BL(t_i) \leftarrow \varphi ;$$

$$s \leftarrow E[(B(L'_{RSU}(t_{i+1})) - \varphi)^+] / E[B(L'_{RSU}(t_{i+1}))];$$

while $s < threshold$ **begin**

$$BL(t_i) \leftarrow BL(t_i) + 1 ;$$

$$s \leftarrow E[(B(L'_{RSU}(t_{i+1})) - \varphi)^+] / E[B(L'_{RSU}(t_{i+1}))];$$

end

return $BL(t_i)$;

Hizmet Seviyesine Dayalı Yöntem (SL) [27]: Reddedilen RSU'ların sayısını belli etmek için, servis seviyesi tanımlayarak geliri artırmaya çalışmaktadır. MNO bir eşik tanımlayarak farklı fazladan rezervasyon sınırları belirleyebilir. Bölüm 5.1'de bahs edilen SL algoritması, IOFCR çerçevesinde modife edilmiştir (Algoritma 8.2). Burada, $B(L'_{RSU}(t_{i+1}))$, $|L_{RSU}(t_{i+1})|$ 'de mevcut olan RSU'ların talepte bulunma sayısını göstermektedir. $threshold$ ise 0.1, 0.01 ve 0.001 olarak tanımlanmıştır [27].

8.2.5. RSU'lar İçin Hizmet Reddetme Politikaları

RSU'ların sayısı serbest spektrum bandı sayısından fazla olduğunda, $|L_{RSU}^{Deny}(t_{i+1})|$, MNO tarafından reddedilecek RSU'ların sayısını belirlemektedir. Bu durumda, hangi RSU'ların $L'_{RSU}(t_{i+1})$ listesinden seçilebileceğini belirlemek adına bir red politikası gerektirmektedir. IOFCR çerçevesi, rastgele (Random), LIFO ve FIFO gibi iyi bilinen tekniklerden yararlanmaktadır. RSU'ları reddetmenin en basit yolu rastsal olarak başvuruları reddetmektir. Reddetme yöntemi, Algoritma 8.3'de verilmiştir.

Algoritma 8.3. RSU Rastgele Reddetme Politikası

Function $Deny(L'_{RSU}(t_{i+1}), RandomPolicy)$ **begin**

$Count_of_Denial \leftarrow |L'_{RSU}(t_{i+1})| - FSB(t_{i+1}) ;$

$L_{RSU}^{Deny}(t_{i+1}) \leftarrow \{ \} ;$

while $Count_of_Denial > 0$ **begin**

$k \leftarrow rand(1, |L'_{RSU}(t_{i+1})|) ;$

$L_{RSU}^{Deny}(t_{i+1}) \leftarrow L_{RSU}^{Deny}(t_{i+1}) \cup \{ RSU_k \} ;$

$L'_{RSU}(t_{i+1}) \leftarrow L'_{RSU}(t_{i+1}) \setminus RSU_k ;$

$Count_of_Denial \leftarrow Count_of_Denial - 1 ;$

end

return $L_{RSU}^{Deny}(t_{i+1}) ;$

end

Burada, $rand(1, |L'_{RSU}(t_{i+1})|)$ fonksiyonu çıktı olarak 1 ile RSU'ların liste boyutu arasında bir indeks döndürür ve RSU_k , $L'_{RSU}(t_{i+1})$ listesinde k 'nci RSU'dur. Benzer şekilde, FIFO ve LIFO Reddetme Politikaları sırasıyla Algoritma 8.4 ve Algoritma 8.5'd3 özetlenmiştir; Her iki algoritmada basit yığın işlemleri kullanılır.

 Algoritma 8.4 RSU FIFO Reddetme Politikası

Function Deny($L'_{RSU}(t_{i+1}), FIFOPolicy$) begin

Count_{ofDenial} $\leftarrow |L'_{RSU}(t_{i+1})| - FSB(t_{i+1});$

$L_{RSU}^{Deny}(t_{i+1}) \leftarrow \{ \};$

while Count_{ofDenial} > 0 begin

$L_{RSU}^{Deny}(t_{i+1}) \leftarrow L_{RSU}^{Deny}(t_{i+1}) \cup \{RSU_1\};$

$L'_{RSU}(t_{i+1}) \leftarrow L'_{RSU}(t_{i+1}) \setminus RSU_1;$

Count_{ofDenial} \leftarrow Count_{ofDenial} $- 1;$

end

return $L_{RSU}^{Deny}(t_{i+1});$

end

FIFO reddetme politikasında, $L'_{RSU}(t_{i+1})$ 'nin ilk ögesi çıkarılır ve $L_{RSU}^{Deny}(t_{i+1})$ listesine eklenir; diğer yandan, LIFO reddetme politikası çerçevesinde $L'_{RSU}(t_{i+1})$ 'nin en son ögesi çıkarılır ve $L_{RSU}^{Deny}(t_{i+1})$ listesine eklenir. Bu algoritmalarındaki her iki fonksiyon RSU'ların listesini sonuç olarak geri vermektedir.

IOFCR çerçevesinde hangi politikanın uygulanacağı MNO tercihine bağlıdır. MNO, Rasgele Reddetme Politikası'nı kullanmaya karar verirse, herhangi bir RSU'ya öncelik tanınmaz. Esnek Fiyatlandırma yöntemi ile birlikte FIFO veya LIFO reddetme politikalarından biri tercih edildiğinde, MNO'nun ödeyeceği CC miktarı seçilen reddetme politikasına göre değişir.

Algoritma 8.5. RSU LIFO Reddetme Politikası

Function $Deny(L'_{RSU}(t_{i+1}), LIFOPolicy)$ **begin**
 $Count_of_Denial \leftarrow |L'_{RSU}(t_{i+1})| - FSB(t_{i+1})$;
 $L_{RSU}^{Deny}(t_{i+1}) \leftarrow \{ \}$;
 while $Count_of_Denial > 0$ **begin**
 $k \leftarrow |L'_{RSU}(t_{i+1})|$;
 $L_{RSU}^{Deny}(t_{i+1}) \leftarrow L_{RSU}^{Deny}(t_{i+1}) \cup \{RSU_k\}$;
 $L'_{RSU}(t_{i+1}) \leftarrow L'_{RSU}(t_{i+1}) \setminus RSU_k$;
 $Count_of_Denial \leftarrow Count_of_Denial - 1$;
 end
 return $L_{RSU}^{Deny}(t_{i+1})$;
end

8.2.6. ASU'lar İçin Atılma Politikası

Bu bölümde önerilen çerçevede üçüncü durum ASU'ların çıkartılması/atılması bahsedilmiştir. ASU'ların liste boyutu, toplam spektrum bandı sayısı ve PU sayısı arasındaki farktan daha büyük olduğunda ASU'lardan bazılarının atılması gerekmektedir. ASU'ların çıkarılma sırası MNO'nun tercihine bağlıdır: Rastgele veya FIFO. LIFO yöntemi IOFCR çerçevesine dahil değildir. Zira, LIFO'da, daha az servis alan ASU'ların daha fazla hizmet süresi olan ASU'lara karşı korunmasıdır. Rastgele ve FIFO politikası için açıklamalar sırasıyla Algoritma 8.6 ve Algoritma 8.7'de verilmektedir.

Algoritma 8.6'da $rand(1, |L_{ASU}(t_{i+1})|)$ fonksiyonu, hangi ASU'nun $L_{ASU}(t_{i+1})$ listesinden çıkacağını belirlemek için 1 ile $|L_{ASU}(t_{i+1})|$ arasında bir indeks döndürür. Çıkarılan ASU, $L_{ASU}^{Eject}(t_{i+1})$ listesine eklenir.

Algoritma 8.6. ASU'lar için rastgele atılma politikası

Function Eject($L_{ASU}(t_{i+1}), RandomPolicy$) **begin**
 $Count_of_Ejects \leftarrow |L_{ASU}(t_{i+1})| - (\varphi - |L_{PU}(t_{i+1})|)$;
 $L_{ASU}^{Eject}(t_{i+1}) \leftarrow \{ \}$;
while $Count_of_Ejects > 0$ **begin**
 $k \leftarrow rand(1, |L_{ASU}(t_{i+1})|)$;
 $L_{ASU}^{Eject}(t_{i+1}) \leftarrow L_{ASU}^{Eject}(t_{i+1}) \cup \{ ASU_k \}$;
 $L_{ASU}(t_{i+1}) \leftarrow L_{ASU}(t_{i+1}) \setminus ASU_k$;
 $Count_of_Ejects \leftarrow Count_of_Ejects - 1$;
end
return $L_{ASU}^{Eject}(t_{i+1})$;
end

Algoritma 8.7'de $Eject(L_{ASU}(t_{i+1}), FIFOPolicy)$ fonksiyonu, çıkarılacak ASU'ların listesini döndürür; burada ASU_1 , $L_{ASU}(t_{i+1})$ listesinin ilk öğesidir. Bu algoritmanın while döngüsünün her yenilenmesinde, ASU_1 öğesi, $L_{ASU}^{Eject}(t_{i+1})$ listesine eklenir.

Algoritma 8.7. ASU'lar İçin FIFO Atılma Politikası

Function Eject($L_{ASU}(t_{i+1}), FIFOPolicy$)**begin**
 $Count_of_Ejects \leftarrow |L_{ASU}(t_{i+1})| - (\varphi - |L_{PU}(t_{i+1})|)$;
 $L_{ASU}^{Eject}(t_{i+1}) \leftarrow \{ \}$;
while $Count_of_Ejects > 0$ **begin**
 $L_{ASU}^{Eject}(t_{i+1}) \leftarrow L_{ASU}^{Eject}(t_{i+1}) \cup \{ ASU_1 \}$;
 $L_{ASU}(t_{i+1}) \leftarrow L_{ASU}(t_{i+1}) \setminus ASU_1$;
 $Count_of_Ejects \leftarrow Count_of_Ejects - 1$;
end
return $L_{ASU}^{Eject}(t_{i+1})$;
end

8.3. Rezervasyon Stratejisi

Fazladan rezervasyon çerçevesinin yanı sıra, kullanıcılara daha fazla esneklik sağlamak ve MNO gelirini artırmak adına, Bu bölümde Ön-Rezervasyon Yönetim Modelinden (Pre-reservation Management System - PRMS) bahs edilmiştir. İlk etapta PRMS ağ mimarisi anlatılmıştır. Daha sonra, ön-rezervasyon yönetim modelinde karşılaşılabilecek durumlar ve buna ilişkin önerilen anlatılmaktadır.

8.3.1. Ön-Rezervasyon Yönetim Modelinin Ağ Mimarisi

Ön-rezervasyon stratejisine dayanarak önerilen ağ mimarisi, kullanıcılar arasındaki etkileşim şeması Şekil 8.6'da gösterilmiştir.

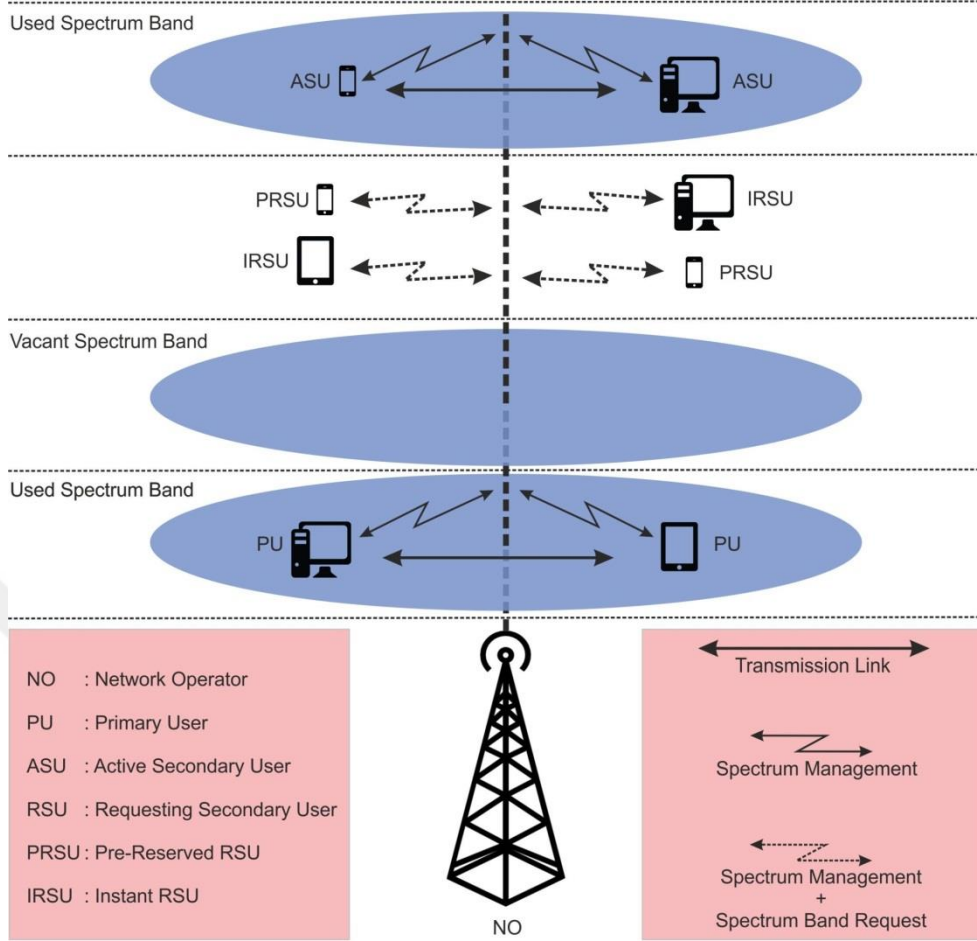
Bir spektrum bandı t_i 'daki zaman aralığında üç farklı durumdan oluşabilir:

- 1) PU tarafından kullanılabilir.
- 2) ASU tarafından kullanılabilir.
- 3) FSB olarak adlandırılan boş SB olabilir.

Aynı zamanda, t_i 'de SB'yi talep eden bazı IRSU ve PRSU olabilir. RSU'lar rezervasyon taleplerini t_i 'de MNO'a gönderirler. MNO, ilgili RSU'nun SB'ye erişip erişemeyeceğinin kararını vermektedir. Yani, MNO, talep edilen hizmet süresi, talep türü ve spektrumun kullanılabilirliğine bağlı olarak IRSU'ya, SB'ye erişme izni vermektedir. Aynı şekilde, PRSU, SB'yi MNO tarafından rezerve etmektedir.

Önerilen model, çoklu zaman aralıklarını (Multiple Time Intervals) kapsamaktadır. MNO her zaman aralığında PU'lar, ASU'lar ve RSU'lara ait listeleri saklamaktadır. PU etkinliği durumunda MNO, hangi ASU'ların SB kullanımına devam edebileceğine ve hangi ASU'ların spektrum bandı bırakması gerektiğine karar vermektedir.

MNO, PRSU veya IRSU için spektrum karar mekanizması ile bağlantılı olarak spektrum tahsisi hakkında karar verecektir. Mevcut SB'lerin tanımlanması CR teknolojisi ile gerçekleştirilecek ve PRSU veya IRSU'nun her biri için gerekli QoS dikkate alınacaktır. Bu nedenle MNO, Fiyatlandırma için bazı önemli kullanıcı özelliklerini dikkate almaktadır. Böylelikle fiyat esnekliği sağlanacaktır ve ön-rezervasyon yapmak isteyen PRSU'ların spektrum bandı için ödeyecekleri fiyat IRSU'lara karşı daha az olacaktır.



Şekil 8.6. Ön-Rezervasyon Yönetim Modelinde ağ mimarisi [110]

8.3.2. Spektrum Karar Mekanizmasındaki Durumların Belirlenmesi

Spektrum karar mekanizmasının t_i zaman aralığındaki karşılaşılabilecek durumlar aşağıda listelenmiştir:

Durum 1. Bazı PU'lar aktif hale gelir.

Durum 2. Bazı PU'lar spektrumunu terk ederler.

Durum 3. Bazı ASU'lar çalışmalarını tamamlamadan spektrumunu terk ederler (L-ASU).

Durum 4. Bazı ASU'lar çalışmalarını tamamladıktan sonra spektrumunu terk ederler (F-ASU).

Durum 5. Bazı ASU'lar reddedilirler (R-ASU).

Durum 6. Bazı SU'lar spektruma anında erişmek için istekte bulunurlar (IRSU).

Durum 7. Bazı SU'lar spektrum bandı rezerve talebinde bulunurlar (PRSU).

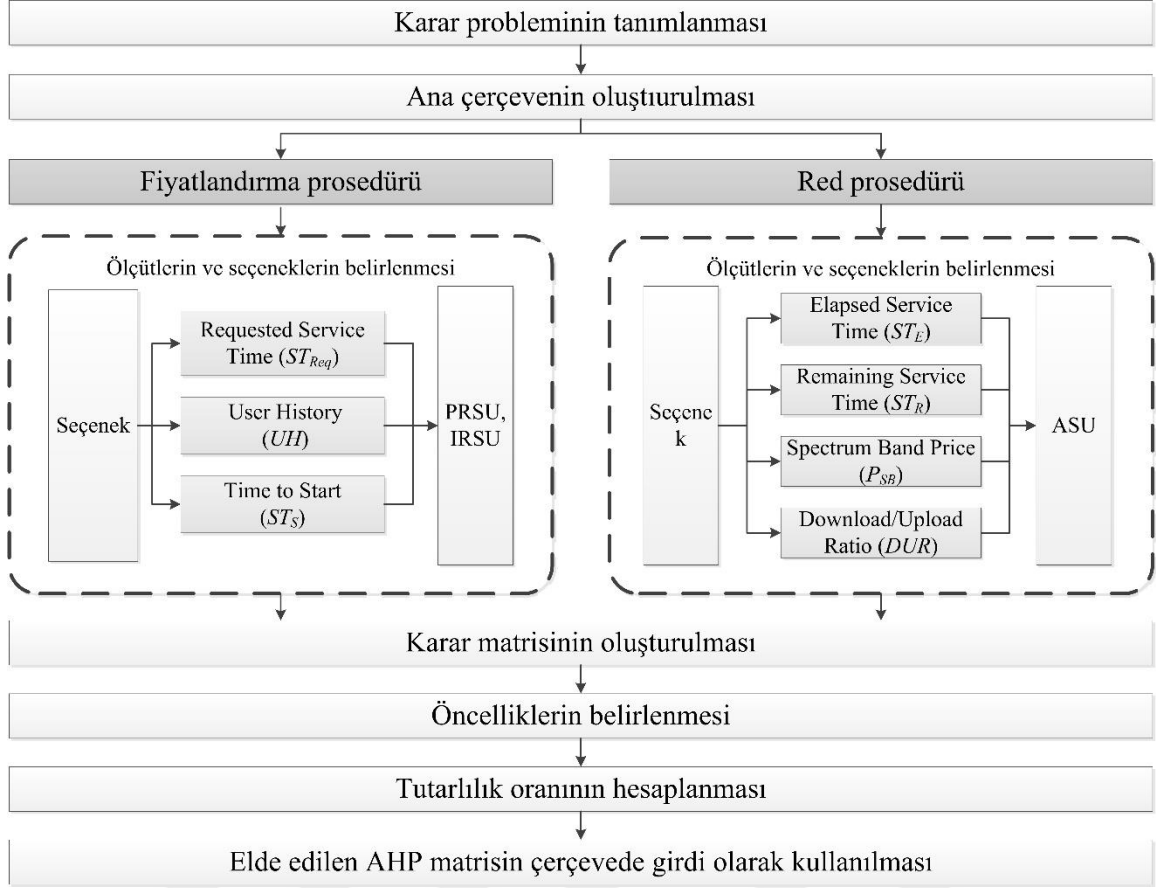
Daha önce belirtildiği gibi, PU'lar ayrıcalıklı kullanıcılar olarak istedikleri zaman SB'leri kullanabilirler (Durum 1). Bu durumda, MNO, PU faaliyetlerini algıladıktan sonra FSB'lerin listesini günceller. PU faaliyeti tamamlandığında, spektrum bandı terk eder (Durum 2) ve MNO, FSB'lerin listesini günceller. ASU, istenilen hizmet süresinin tamamlanmasından önce (Durum 3) veya tam olarak kullanıldıktan sonra SB'yi serbest bıraktığı zaman (Durum 4), FSB listesi yeniden güncellenir.

Durum 5 ile ilgili bazı PU faaliyetleri MNO tarafından algılanabilmektedir. Herhangi bir FSB yoksa, hangi ASU'nun SB'leri serbest bırakması gerektiğine karar vermek için uygun bir politika dikkate alınmalıdır. Önerilen PRMS yönetim sisteminde, reddetme prosedürü uygulanmaktadır. Buna ek olarak, herhangi bir RSU'nun anlık olarak SB'yi talep edebilmesi ve kullanma isteğinde bulunması mümkündür (Durum 6). Durum 7, rezervasyon talebinde bulunan RSU'ları değerlendirmektedir.

Durum 1 ile 4 olduğunda MNO, FSB listesinin güncellenmesi haricinde hiçbir işlem yapmamaktadır. Bununla birlikte, 5 ile 7 arasındaki durumlarda, MNO'nun uygun bir karar alması gerekmektedir. Önerilen spektrum karar mekanizmasında, MNO'nun kararı Çok Ölçütlü Karar Verme (Multi Criteria Decision Making, MCDM) yöntemine dayanmıştır. MNO'nun kararında en önemli adım kullanıcılar (IRSU, PRSU ve ASU) için göz önünde bulundurulmuş özellikler ve her bir özellik için uygun önem derecesinin (Importance Degree) uygulanmasıdır. MCDM ile birlikte yapılandırılmış tekniklerden biri olan Analitik Hiyerarşi Süreci (Analytic Hierarchy Process, AHP) [56, 86-87] bu çalışmada kullanılmıştır. Sonuç olarak, belirlenen önem dereceleri spektrum karar mekanizmasında kullanılmaktadır. Bir sonraki bölüm, uygulanan AHP tekniğinin prensiplerini rezervasyon stratejisine göre tanıtmaktadır.

8.3.3. Ön-Rezervasyon Yönetim Modelinin Hiyerarşisi

Ön-rezervasyon yönetim modelinde AHP yöntemine dayanarak genel çerçeve elde edilmiştir. Şekil 8.7, bu çalışmada önerilen AHP hiyerarşisini göstermektedir.



Şekil 8.6. Önerilen Sistem modelinde AHP hiyerarşisi [110]

Şekil 8.7’de gösterildiği gibi PRMS iki prosedürden oluşan bir karar modeli ile yapılandırılmıştır: fiyatlandırma ve red prosedürü. Fiyatlandırma prosedüründe hedef, RSU'lar için kabul edilebilir hizmet fiyatları sunmakla birlikte TNR ve QoE'yi aynı anda artırmaktır. İlgili fiyatı elde etmek için MNO, PRSU ve IRSU ile ilgili özellikleri tanımlar. MNO'nun spektrum karar mekanizmasında kullanabileceği çeşitli IRSU ve PRSU öznitelikleri vardır. Bazıları bu çalışmada şu şekilde tanımlanmıştır:

Hizmet süresi (ST_{Req}): Bir RSU tarafından talep edilen hizmet süresi ile ilgilidir. ST_{Req} 'in maksimum değeri toplam zaman aralıklarının sayısını (t_τ) aşmamalıdır. t_i 'deki her RSU için ST_{Req} listesi şu şekilde formüle edilebilir:

$$L_{RST}(t_i) = \{ST_{Req}(j) \mid 0 \leq i \leq t_\tau, 0 \leq j \leq |n_{RSU}|\} \quad (8.27)$$

Burada $|n_{RSU}|$, geçerli zaman aralığındaki RSU'ların sayısıdır.

RSU geçmişi (UH): Herhangi bir RSU önceden adı geçen ağ içerisinde SB kullanmış ise, önceden kullandığı hizmet süresi, gecikme ile hizmet alan PRSU'lara verilen indirim oranı, spektruma erişmek için ücreti vb. RSU'ların her biri için UH olarak adlandırılan bir geçmiş bilgileri olarak kayıta tutulmaktadır. UH boş olabilir, yani bu RSU'nun adı geçen ağ'da ilk defa servis talebinde bulunduğu anlamına gelmektedir. UH , MNO'nun spektrum karar mekanizması sırasında ağ gelirini ve kullanıcı memnuniyetini dengelemek için doğru kararlar vermesine yardımcı olur. t_i 'deki her RSU için UH listesi şu şekilde verilmektedir:

$$L_{UH}(t_i) = \{UH_j \mid 0 \leq j \leq |n_{RSU}|, 0 \leq UH_j \leq 100\} \quad (8.28)$$

Burada $|n_{RSU}|$, geçerli zaman aralığındaki RSU'ların sayısıdır. UH_j maksimum değeri 100 yani % olarak belirlenmiştir.

Bir PRSU hangi zaman aralığında spektrum bandına erişmek istediğini (ST_S) belirterek rezervasyon isteğini MNO'ya iletmektedir. Belirtilen zaman aralığı FSB bulunmaz ve talep MNO tarafından onaylanmaz ise MNO PRSU'yu gelecekte tekrar spektrum talebinde bulunmaya motive etmek adına her bir PRSU için indirim oranını UH parametrelerinden biri olarak belirler. PRSU bir sonraki istek sürecini başlattığında, bu kullanıcıya verilen indirim oranı dikkate alınarak mevcut hizmet fiyatı indirim oranına dayanarak hesaplanacaktır. Aynı şekilde, reddedilen ASU'lar için benzer indirim mekanizması uygulanmaktadır. Bu indirim mekanizması, reddedilen ASU'lere CC ödememek ve aynı zamanda onları memnun etmek amacıyla uygulanmaktadır.

PRSU için hizmetin başlama zamanı (ST_S): Bu değer PRSU'nun SB'yi hangi zaman aralığında kullanmak istediğini göstermektedir. t_i zaman diliminde SB'ye erişmek için başlama ve bitiş sürelerine sahip PRSU'ların listesi şu şekilde formüle edilir:

$$L_{SP}(t_i) = \{(ST_S(j), ST_S(j) + ST_{Req}(j)) \mid 0 \leq j \leq |n_{RSU}|, 0 \leq ST_S(j) + ST_{Req}(j) \leq t_\tau\} \quad (8.29)$$

Burada SP listesi, RSU'ların hizmet süresini belirtmektedir. Hizmet süresinin maksimum değeri toplam zaman aralıklarını (t_τ) aşmayacak şekilde varsayılmıştır.

Öte yandan, red prosedüründe MNO, uygun ASU'ların reddine ilişkin uygun kararların verilmesinde dört farklı özneliği göz önünde bulundurmaktadır:

- SB fiyatı (P_{SB}): Spektrum bandı kullanmaya başlamadan önce PRSU ve IRSU tarafından ödenilen SB fiyatıdır.
- Geçen servis süresi (ST_E): t_i 'ye kadar geçen servis zaman aralıklarıdır.
- Kalan hizmet süresi (ST_R): ASU'ların ne kadar süre daha hizmet almaya devam edebileceğini belirtmektedir.
- İndirme/ yükleme oranı (DUR): her ASU için t_i 'ye kadar indirme ve yükleme oranıdır.

Önerdiğimiz sistem modelin AHP hiyerarşisinde bir sonraki adım, farklı öznitelikler için ağırlıkları hesaplamaktır. Bunun için bir çift-bazlı karşılaştırma matrisi (pair-wise comparison matrix - \mathbf{M}_{ij}) geliştirilmiştir [56].

Daha sonra, her ölçüt için öncelik vektörü (PV) hesaplaması aşağıdaki şekilde gerçekleştirilmiştir:

$$PV_i = (\prod_{j=1}^n (\mathbf{M}_{ij})^{\frac{1}{n}}) / R \quad (8.30)$$

$$R = (\sum_{i=1}^n (\prod_{j=1}^n \mathbf{M}_{ij}))^{\frac{1}{n}} \quad (8.31)$$

Burada \mathbf{M}_{ij} , çift-bazlı karşılaştırma matrisini sunarken, R , AHP yönteminde özelliklerin toplam kökünü göstermektedir. n fiyatlandırma ve reddetme prosedürlerindeki özniteliklerin sayısıdır. Önerilen PRMS sistem modelde fiyatlandırma prosedürü için üç öznitelik, reddetme prosedürü için dört öznitelik uygulanmıştır. Bir sonraki adım olarak tutarlılık oranı (Consistency Ratio, CoR) analiz edilmelidir:

$$CoR = CI / RI \quad (8.32)$$

Bölüm 4.1.2'de Rasgele Endeks (RI) değerleri bulunmaktadır ve ayrıca Ortalama Rasgele Tutarlılık İndeksi (Consistency Index, CI) Tablosu [56, 86-87] verilmiştir. Son olarak, elde edilen $CoR < 0.10$ değeri, MNO'nun ikili karşılaştırmalarının nispeten tutarlı olduğunu ve her öznitelik ağırlığının PV 'ye dayanarak önerilen sisteme entegre olabileceğini ispatlamaktadır. AHP hiyerarşisinde uygulanan fiyatlandırma ve reddetme prosedürleri bir sonraki bölümde önerilen algoritmayla bütünleştirilecektir.

8.3.4. Ön-Rezervasyon Yönetim Modelinin İşlevleri

Şekil 8.8'de gösterilen akış şeması sırasıyla Bölüm 8.3.2'de durum 6 ve 7'de belirtilen anlık spektrum kullanımını ve rezervasyon taleplerini yönetmek için karar verme rutinlerinin genel görünüsünü göstermektedir. İlgili süreçlerin tümü üç farklı fonksiyon ile belirtilmiştir:

- Rezervasyon Fonksiyonu: İlgili fonksiyon rezervasyon talebi PRSU olarak tanımladığında devreye girmektedir.
- Anlık Kullanıcı Fonksiyonu: İlgili fonksiyon rezervasyon talebi IRSU olarak tanımladığında devreye girmektedir.
- Değişim Fonksiyonu: IRSU'nun PRSU olarak değiştirilebilmesi durumunda ilgili fonksiyon devreye girmektedir.

Rezervasyon işlevselliğinin pseudo kodu Ekler Bölümünde Algoritma 13.2'de sunulmaktadır.

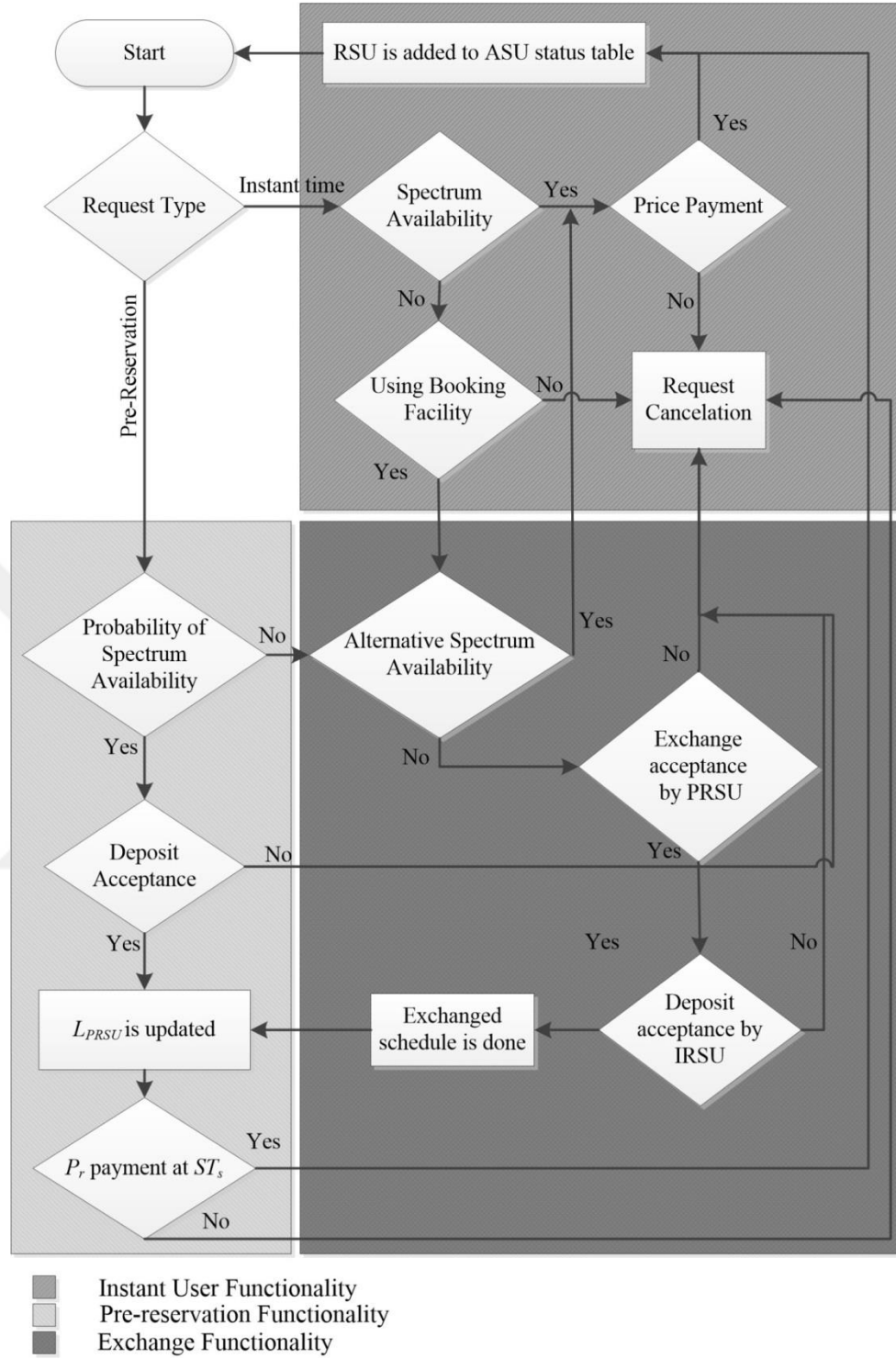
8.3.4.1. Rezervasyon Fonksiyonu

Bir PRSU, rezervasyon modu (booking mode, BM) 1 olarak ayarlandığında SB'yi reserve ettiği anlaşılmaktadır. BM 2 olarak ayarlanırsa, SU tipinin bir IRSU olduğu ve spektrum bandına anında erişmek isteğini göstermektedir. Daha sonra MNO, Denklem 8.33'de verilen güncel bekleme süresini (waiting time, WT) kontrol etmelidir.

$$WT = ST_S - t_i \quad (8.33)$$

Burada WT PRSU'nun ST_S 'ye kadar bekleme süresidir. WT , eşik (μ) değerinden büyük olmamalıdır. Burada $t_{i+1} < \mu \leq t_\tau$ olarak kabul edilmektedir. ST_S zaman aralığında elde edilebilen serbest spektrum bandlarının sayısı aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$FSB_{Est}(ST_S) = \phi - (|PU_{Est}(ST_S)| + |ASU_{Est}(ST_S)| + |L_{PRSU}(ST_S)|) \quad (8.34)$$



Şekil 8.7. Ön-rezervasyon yönetim sisteminin işlevleri [110]

Burada φ , MNO'e ayrılan SB'lerin sayısıdır. $L_{PRSU}(ST_S)$, ST_S 'de hizmet alması planlanan PRSU'ların listesidir. Bu liste aynı zamanda ST_{Req} , UH , P_{SB} ve D gibi PRSU'ya özgü öznitelikleri içermektedir:

$$L_{PRSU}(ST_S) = \{PRSU_j = (ST_S, ST_{Req}, UH, P_{SB}, D) \mid 1 \leq j \leq |n_{PRSU}|, t_{i+1} \leq ST_S \leq t_\tau\} \quad (8.35)$$

Burada ST_S bir sonraki zaman diliminden başlayabilir t_{i+1} ve $|n_{PRSU}|$ ST_S 'deki PRSU sayısını belirtir. PU_{Est} ve ASU_{Est} , ST_S zamanındaki tahmini PU ve ASU listeleridir. Bu listeler aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$PU_{Est}(ST_S) = \{PU_i \mid 0 \leq i \leq N, PU_i \text{ is active at } ST_S\} \quad (8.36)$$

$$ASU_{Est}(ST_S) = \{ASU_i \mid 0 \leq i \leq K, ASU_i(ST_R) > 0\} \quad (8.37)$$

Burada N ve K , sırasıyla PU'ların ve ASU'ların sayılarıdır, $PU_{Est}(ST_S)$, ST_S 'deki aktif PU'ları listeler ve $ASU_{Est}(ST_S)$, kalan servis sürelerinin (ST_R) sıfırdan büyük olan ASU'ları içermektedir.

FSB_{Est} 'e dayanarak, ST_S zaman aralığında aşağıdaki iki durumdan biri oluşabilir:

Durum 1. $FSB_{Est}(ST_S)$ sıfırdan büyük olduğunda: bu durumda ST_S 'de bazı kullanılabilir SB'lerin olduğu tahmin edilmektedir. Bir sonraki adımda, SB fiyatı (P_{SB}) hesaplanmaktadır (Denklem 8.45). SB başına fiyat birimi (mu/SB) olarak tanımlanmaktadır. Daha sonra, ilgili PRSU tarafından ödenilen deposito D belirlenir:

$$D = \alpha \times P_{SB}, \quad \alpha \in [0,1] \quad (8.38)$$

Burada α , her zaman aralığı için depozit değerini belirleyen depozit oranıdır. D depozitinin hesaplanmasından sonra, PRSU aşağıdaki kararlardan birine uymalıdır:

I. Paylaşım kurallarına ve koşuluna göre SB'yi rezerve etmeyi kabul eder, D 'yi öder:

Bu durumda, yeni PRSU Denklem 8.35 PRSU listesine eklenir. Önerilen çerçevede, rezervasyon iptali durumunda ödenilen D , PRSU'ya geri verilmeyecektir.

Bununla birlikte, ST_S 'de, PRSU üç farklı durum ile karşılaşabilir:

Gelmeyen PRSU (N-PRSU): D ödemesine rağmen, PRSU ST_S zaman diliminde spektrum bandı kullanmakta görünmüyor. Bu durumda, D , N-PRSU'lara geri ödenemeyecektir.

Reddedilen PRSU (R-PRSU): PU etkinliği nedeniyle ST_S 'de rezervasyon yapan PRSU'lar reddedilmelidir. Bu durumda, D , R-PRSU'lara geri ödenecektir.

Geri kalan fiyat ödemesinin kabulü: Bu durumda, PRSU ST_S 'de hizmet almaya başlar ve ASU listesi güncellenir. Ödenmesi gereken geri kalan fiyat (P_r) aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$P_r = P_{SB} - D \quad (8.39)$$

Burada P_{SB} Algoritma 8.9'da hesaplanmıştır.

II. D 'yi ödemekten vazgeçmek. Bu durumda PRSU rezervasyon talebi MNO tarafından iptal edilmektedir.

Durum 2. $FSB_{Est}(ST_S)$ sıfırdan küçük veya sıfıra eşit olması: Eğer ST_S 'de herhangi bir FSB yoksa MNO, PRSU isteğini iptal etmezdir. Fakat, ilgili durum kullanıcı memnuniyetinin göze alınmamasını sağlamaktadır. Önerilen sistemde MNO, kullanıcı memnuniyetini sağlamak için alternatif çözümler sunmaktadır. Bu amaçla MNO, ST_S 'den hemen sonra en yakın zaman aralığında (t_z) tahmini FSB'leri kontrol ederek (Denklem 8.40) PRSU'ya farklı seçenekler sunmaktadır.

$$FSB_{Est}(t_z) = \phi - (|PU_{Est}(t_z)| + |ASU_{Est}(t_z)| + |L_{PRSU}(t_z)|) \quad (8.40)$$

Burada x , ST_S 'ye göre zaman gecikmesini göstermektedir ve t_z ise $ST_S < t_z \leq ST_S + x$. PU ve ASU'ların t_z 'deki listeleri, ST_S zaman diliminin t_z ile değiştirilerek elde edilir. t_z zaman diliminde herhangi bir FSB algılandığında, MNO PRSU'ya sunmaktadır. PRSU, rezervasyon sürecinde önerilen gecikmeyi kabul ederse, MNO, Algoritma 13.2'de bulacağı yeni fiyatı temel alarak depozitoyu hesaplar ve Şekil 8.8'de gösterilen geri kalan aşamalardan prosedüre devam eder. Aksi takdirde, rezervasyon talebi iptal edilir.

8.3.4.2. Anlık Kullanıcı Fonksiyonu

IRSU t_i 'de SB talebinde bulunduğu zaman, MNO, FSB'lerin durumunu kontrol ederek herhangi bir FSB durumunda, SB fiyatı IRSU özniteliklerine dayanarak hesaplanır (Algoritma 8.9). MNO, trafik yükü (Traffic Load, TL) ile belirlenebilen mevcut yarar (Current Benefit, CB) ve spektrum kullanımını hesaplar. Bu iki önemli faktör, MNO'nun, şebekenin mevcut yararının ne olduğunu ve spektrumun ne kadarının t_i 'ye kadar kullanıldığını bilmesine yardımcı olmaktadır.

Algoritma 8.9. Anlık Kullanıcı Fiyat Hesaplama

Normalized values of RSU_i attributes

Calculate CB and TL

Calculate weights of RSU_i attributes based on CB and TL

Calculate price ratio (PR)

Calculate SB price (P_{SB})

Return P_{SB}

MNO, fiyat hesaplama sürecini başlatır. MNO, Bölüm 8.3.3'te bahsedilen RSU özniteliklerinin tümünü göz önünde bulundurmalıdır. Her öznitelik farklı bir birime sahip olabilir. Bu nedenle, öznitelikler arası karşılaştırma yapmak için normalleştirme teknikleri kullanılmalıdır. Öznitelikler, fayda ve maliyet türü (benefit and cost type) öznitelikleri gibi iki kategoriye ayrılabilir; bunların hepsi $[0, 1]$ aralığında normalize edilmelidir. Önerilen yöntemde, fayda ve maliyet tipi özniteliklerin sınıflandırılması için doğrusal max-min normalizasyon tekniği (Denklem 4.1) kullanılmaktadır [111].

Sonraki adım, CB ve TL'in hesaplanmasıdır. t_i 'ye kadar olan TNR, CB olarak kabul edilirken TL aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$TL(t_i) = (\varphi - FSB_{Est}(t_i))/\varphi \quad (8.41)$$

Burada φ , MNO'ya ayrılan SB'lerin sayısıdır ve $FSB_{Est}(t_i)$, t_i 'de tahmini kullanılabilir FSB'lerin sayısıdır.

TL, fiyat hesaplama sürecini doğrudan etkiler ve MNO, bu değer üzerinden kaç SB'nin boş olduğunu hesaplayabilir. CB ve TL ile bağlantılı olarak, MNO, ağı farklı

durumlarına bağlı olarak IRSU özniteliklerine değişken ağırlıklar uygulayabilir. Bu nedenle, P_{SB} 'yi ayarlanabilir şekilde belirleyebilmektedir. Bundan sonra, MNO, çift-bazlı karşılaştırma matrisini uygulamak için CB ve TL kullanarak her öznitelik için çeşitli önem dereceleri (importance degree) uygular (Tablo 8.1). Daha sonra, Bölüm 8.3.3'teki Denklem 8.27, 8.28. ve 8.29 ile elde edilen RSU'nun fiyatlandırma öznitelikleri için ağırlıklar hesaplanır (w_{RTI} , w_{UH} , w_{WT}).

w_{RTI} , w_{UH} ve w_{WT} 'nin hesaplanması için ağırlık dört farklı durumu şöyle tanımlanmıştır:

Durum 1: $CB > TH_B$ ve $TL \geq TH_T$

Durum 2: $CB > TH_B$ ve $TL < TH_T$

Durum 3: $CB \leq TH_B$ ve $TL < TH_T$

Durum 4: $CB \leq TH_B$ ve $TL \geq TH_T$

TH_B fiyatlandırma eşliğidir ve aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$TH_B = \varphi \times P_b \quad (8.42)$$

Burada φ , SB'lerin toplam sayısını ve P_b , MNO tarafından ödenilen SB'lerin maliyetini göstermektedir. TH_T , trafik yükü eşliğidir ve şu şekilde verilir:

$$TH_T = \xi \times mean(FSB) \quad (8.43)$$

Burada ξ sabit bir değerdir.

Burada θ_{ij} , AHP yönteminde mutlak karar ölçeğine [56, 86-87] uygun olarak ayarlanır. AHP'de yaygın olarak kullanılan θ_{ij} değerleri 1 ile 9 arasında değişir. i ve j değerleri arasındaki ilişki $\theta_{ji} = 1 / \theta_{ij}$ olarak değerlendirilir.

Tablo 8.1. RSU'nun Fiyatlandırma Özellikleri İçin Çift-Bazlı Karşılaştırma Matrisi

Kullanıcı öznitelikleri	ST_{Req}	UH	WT
ST_{Req}	1	$(1/\theta_{21}, 1/\theta_{22}, 1/\theta_{23}, 1/\theta_{24})$	$(1/\theta_{31}, 1/\theta_{32}, 1/\theta_{33}, 1/\theta_{34})$
UH	$(\theta_{21}, \theta_{22}, \theta_{23}, \theta_{24})$	1	$(1/\theta_{35}, 1/\theta_{36}, 1/\theta_{37}, 1/\theta_{38})$
WT	$(\theta_{31}, \theta_{32}, \theta_{33}, \theta_{34})$	$(\theta_{35}, \theta_{36}, \theta_{37}, \theta_{38})$	1

Bir sonraki aşamada, MNO'nun kararının tutarlılığı kontrol edilmektedir. Son olarak, P_{SB} ve fiyat oranı $PR(RSU_i)$, her RSU için hesaplanmaktadır:

$$PR(RSU_i) = w_{RTI} \times r_{RST}(RSU_i) + w_{UH} \times r_{UH}(RSU_i) + w_{WT}(RSU_i) \times r_{WT}(RSU_i) \quad (8.44)$$

Burada w_{RTI} , w_{UH} , w_{WT} ağırlıkları PRSU'nun sıra ile r_{RST} , r_{UH} and r_{WT} özniteliklerine ağıttir.

$$P_{SB}(RSU_i) = P_b \times (1 + PR(RSU_i)) \quad (8.45)$$

Burada P_b , MNO tarafından SB'lere ödenilen ücreti belirtir. Son olarak, IRSU tarafından P_{SB} 'nin ödenmesi durumunda, t_i 'deki ASU listesi güncellenecektir:

$$L_{ASU}(t_i) = \{ASU_j = (ST_E(j), ST_R(j), P_{SB}(j), DUR(j)) \mid 1 \leq j \leq |L_{ASU}(t_{i-1})|, 1 \leq i \leq t_\tau\} \quad (8.46)$$

ASU özelliklerinin tümü, her zaman aralığında, $t_i + ST_R$ aralığına kadar güncellenecektir. $ST_E(j)$, j 'inci ASU için t_i 'ye kadar kullanılan hizmet sürecidir.

8.3.4.3. Değişim Fonksiyonu

Bu bölümde MNO t_i 'de herhangi bir FSB yoksa önerilen yöntem sayesinde IRSU'lara SB'nin rezervasyonu için alternatif bir yol sunmaktadır. Burada, MNO, en yakın zaman aralıklarında $t_z \leftarrow ST_S + x$ spektrum kullanılabilirliğini kontrol etmektedir. IRSU'ların ve PRSU'ların kullanıcı memnuniyetini sağlamak için, x yeterince küçük olmalıdır. (t_{i+1}, t_z) aralığında hizmet almak için bekleyen tüm PRSU'lara sunulan gecikme kadar ertelenme indirimi (O) uygulanmaktadır (Denklemler 8.47). Eğer herhangi bir PRSU teklifi kabul ederse, karşılık gelen PRSU'nun t_z 'ye dayalı yeni ST_S ile durumu güncellenir ve ilgili IRSU'nun bir PRSU olarak değiştirildiği yerde L_{PRSU} güncellenir. PRSU teklifi kabul etmezse, rezervasyon talebini başlatan IRSU reddedilecektir.

$$O = P_r \times (x/t_\tau) \quad (8.47)$$

P_r , PRSU'nun ST_S 'de ödemesi gereken geri kalan fiyattır. Güncellenmiş P_r şu şekilde hesaplanır:

$$P_r = P_r - O \quad (8.48)$$

8.3.4.4. Reddedilme Fonksiyonu

Yüksek TL durumunda boş spektrum bandı kıtlığı meydana gelecektir. Ayrıca, herhangi bir PU faaliyeti algılandığında ASU'lardan bazıları reddedilmelidir. Reddedilme fonksiyonun'da, yüksek ST_E 'ye sahip ASU'lar, uzun zaman SB'yi kullandıkları için reddedilirler. Burada MNO, farklı öznitelikler arasında uygun karar vermeye yönelik, düşük ST_R 'lu ASU'ları tutmaya çalışır. Bu nedenle, yüksek ST_E ve ST_R 'ye sahip ASU'ları reddedilme işlemi için tercih edilen ASU'lerdir. R-ASU sayısı t_i 'daki algılanan PU sayısına bağlıdır. Bu sayıya göre, $L_{R-ASU}(t_i)$ listesinde bulunan aday ASU'ların reddedilmesinde MNO en iyi alternatifi ASU'ların her bir özniteliği uygun ağırlıklar (w_j) belirleyerek seçmektedir. Bunun için, tüm R-ASU'ların reddetme oranları (RR) bulunur ve t_i 'deki $RR(t_i)$ listesine konulmuştur:

$$RR(t_i) = \bigcup_{j=1}^{|L_{R-ASU}(t_i)|} (\sum_{k=1}^4 r(j, k)) \times w_k, \quad i = 1, \dots, t_\tau \quad (8.49)$$

Burada r her ASU özniteliğinin normalize edilmiş değeri, w_k ise dört ASU özniteliklerinin her birinin ağırlığıdır. ASU'ler, algılanan PU'ların sayısına bağlı olarak artan $RR(t_i)$ düzenine göre reddedilmektedir. Daha sonra, her R-ASU için CC hesaplanır. Bu CC, gelecekteki isteklerde bir indirim olarak düşünülür ve doğrudan UH özelliği ile ilgilidir. Herhangi bir R-ASU SB'yi istediğinde, P_{SB} 'nin UH özelliğinde ilgili oran uygulanır ve R-ASU gelecekteki taleplerde diğer R-ASU'lardan daha az ödeme yapacaktır. j 'inci R-ASU için CC oranı aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır:

$$CC(t_i) = \bigcup_{j=1}^{|L_{R-ASU}(t_i)|} \frac{P_{SB}(j) \times ST_{Req}(j)}{RR(t_i)}, \quad i=1, \dots, t_\tau \quad (8.50)$$

Burada $RR(t_i)$, j 'inci ASU'nun $L_{R-ASU}(t_i)$ 'deki reddedilme oranıdır. Karara dayanan reddetme işlevselliğinin tüm adımları Algoritma 8.10'de verilmektedir.

 Algoritma 8.10. Reddetme Fonksiyonu

1. Normalized values of ASU_i attributes
 2. Calculate w_i
 3. Check CoR
 4. Calculate $RR_j(t_i)$ for all R-ASUs in the $L_{R-ASU}(t_i)$
 5. Reject candidate ASUs and assign calculated $CC_j(t_i)$
 6. Update ASU and PU lists
-

8.4. Spektrum El Değişirme Mekanizması

Ön-Rezervasyon ve Fazladan Rezervasyon modellerinin yanı sıra, bu bölümde, spektrum kullanımını optimize etmek ve SU'ların memnuniyetini arttırmak için hizmet reddini (Denial of Service, DoS) ortadan kaldırarak, spektrum el değiştirme (spektrum handoff) mekanizmasını sunulmaktadır. Proaktif kararlı spektrum el değiştirme şeması (proactive-decision spectrum handoff scheme) ve performans analizi verilmiştir [112]. Simülatör verileri, LTE-A iç mekanlarda yapılan gerçek ölçümlerle [113] ele alınmıştır. Önerilen modelde, Lisanslı Paylaşımlı Erişim (LSA) teknolojisini içeren 3GPP LTE-A dağıtımını kullanılmıştır. Böylelikle, lisanslı spektruma koordine edilmiş paylaşımlı erişim sağlayarak mevcut frekans bandlarının daha verimli kullanılmasını sağlayan yeni bir çerçeve sunulmuştur. 3GPP LTE-A sistemi, spektrum kullanımının sürekli olarak analiz edildiği üç hücreden oluşmuştur.

Spektrum sahibi (PU) spektrum bandı geri istediğinde ASU'ların servis kesintisini önlemek için diğer mevcut 2 hücreden birine el değiştirmeleri gerekmektedir. Böylelikle kullanıcı memnuniyetini ve hücrelerin performansının (throughput) artmasını göz önünde bulunmaktadır.

Her el değiştirme prosedürünün başında cevaplanacak iki önemli soru vardır:

- (i) ASU'lara tahsis edilebilecek kullanılmayan spektrum bandlarının (FSB) var olup olmaması ve
- (ii) hangi ASU'nun devredilebileceği.

Birinci soruyu yanıtlamak için, mevcut spektrumun durumu her zaman aralığında düzenli olarak analiz edilmektedir. İkinci soru hakkında karar vermek için, diğer bir deyişle hangi ASU'lara spektrum tahsisi yapılması gerektiği konusunda ASU'ların çeşitli öznitelikleri kullanılmıştır.

Simülasyonun ana amacı, hücrelerinin spektrum kullanımını değerlendirmek, her bir ASU için toplam hizmet süresini hesaplamak ve her bir hücre için farklı PU faaliyet oranının olması durumunda spektrum el değiştirme mekanizmasının performansını incelemektir. Bölüm 8.4.1 spektrum el değiştirme mekanizmasının sistem modelini göstermektedir.

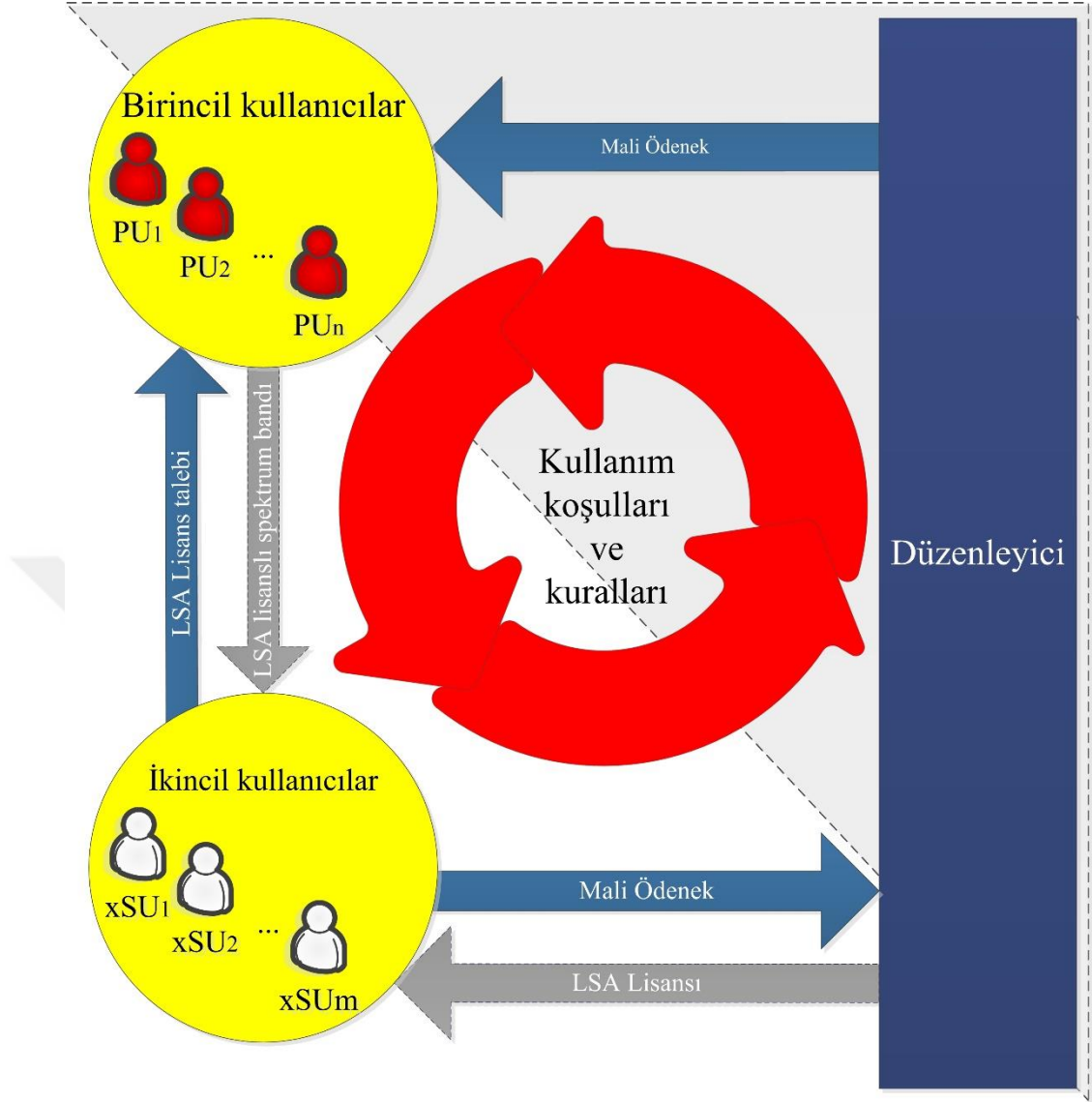
8.4.1. Spektrum El Değiştirme Mekanizmasının Sistem Modeli

Mobil veri trafiğindeki artış, lisanslı spektrumun artık sabit yönetim metodları tarafından iyi bir performans göstermemektedir [114]. Bu nedenle, gelecekteki hücresel sistemlerin kapasitesini artırmak için, sınırlı kaynak olarak spektrumun daha verimli bir şekilde ele alınması gerekmektedir. Bu bölümde, daha iyi spektrum kullanımını ve ayrıca ASU'ların memnuniyetini arttıran bir karar temelli spektrum alışveriş modeli önerilmiştir. Gerçek koşulları mümkün olduğunca taklit edebilmek için, Çek Cumhuriyeti'ndeki Brno Teknoloji Üniversitesinde (BUT) 3GPP LTE-A mobil ağ verileri kullanılmıştır. Bu gelişim son zamanlarda LSA çerçevesi tarafından desteklenmektedir [113].

Bir LSA mekanizmasının kurulması için üç bölüm göz önünde bulunur:

- (i) Görevli (PU),
- (ii) LSA lisans sahipleri (SU) ve
- (iii) Ağ operatörü (MNO).

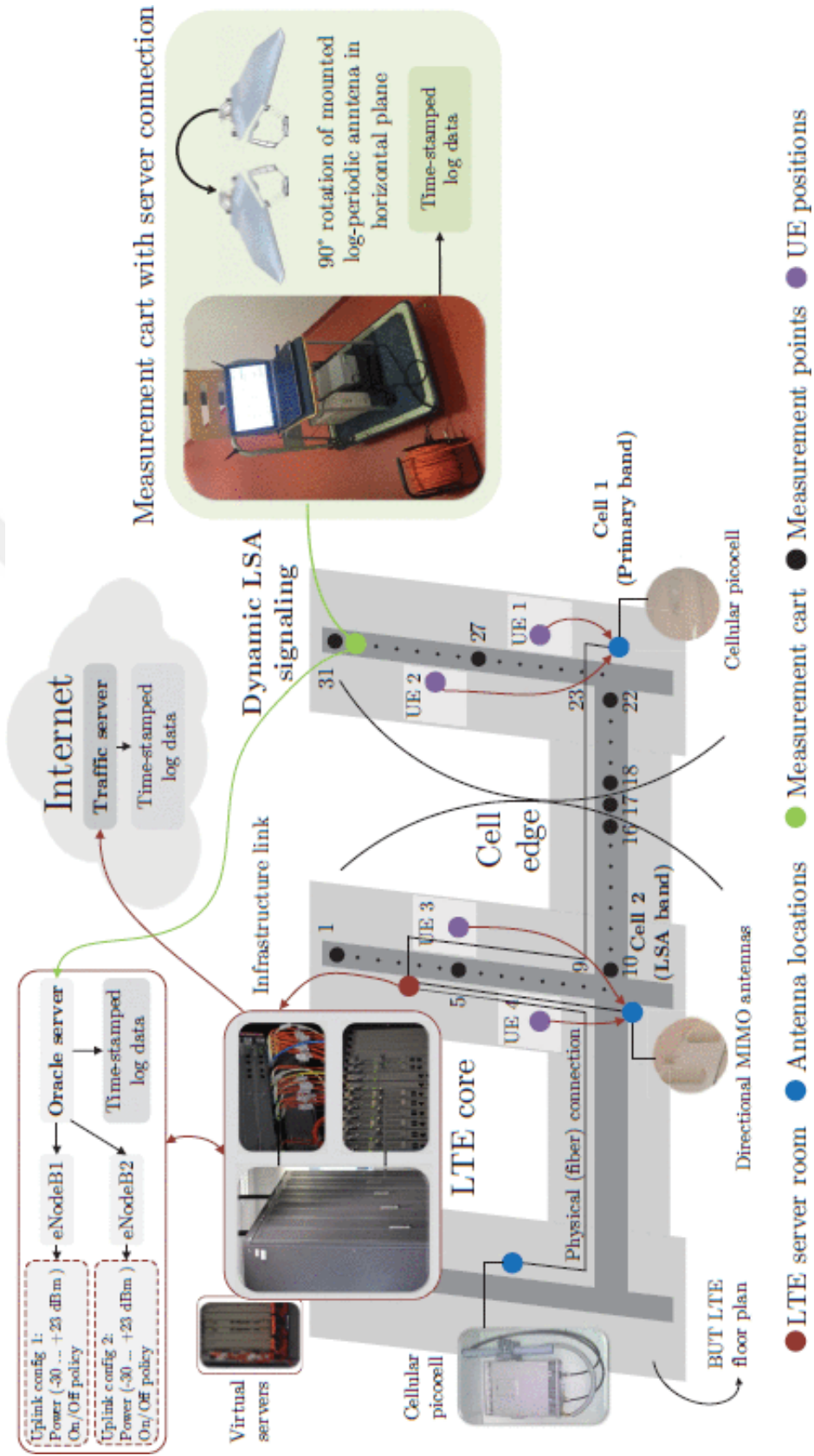
PU, spektrum bandı paylaşım sürecinde ruhsatlı spektrumuna sahiptir. PU erişim hakları şartlarına uymak zorundadır. Bunun yanı sıra, SU kiraladığı spektrum bandlarını kullanmaya yetkilidir. SU kiraladığı spektrum bandı kullanılırken, PU ile yapılan sözleşme koşullarına uymalıdır (Şekil 8.9).



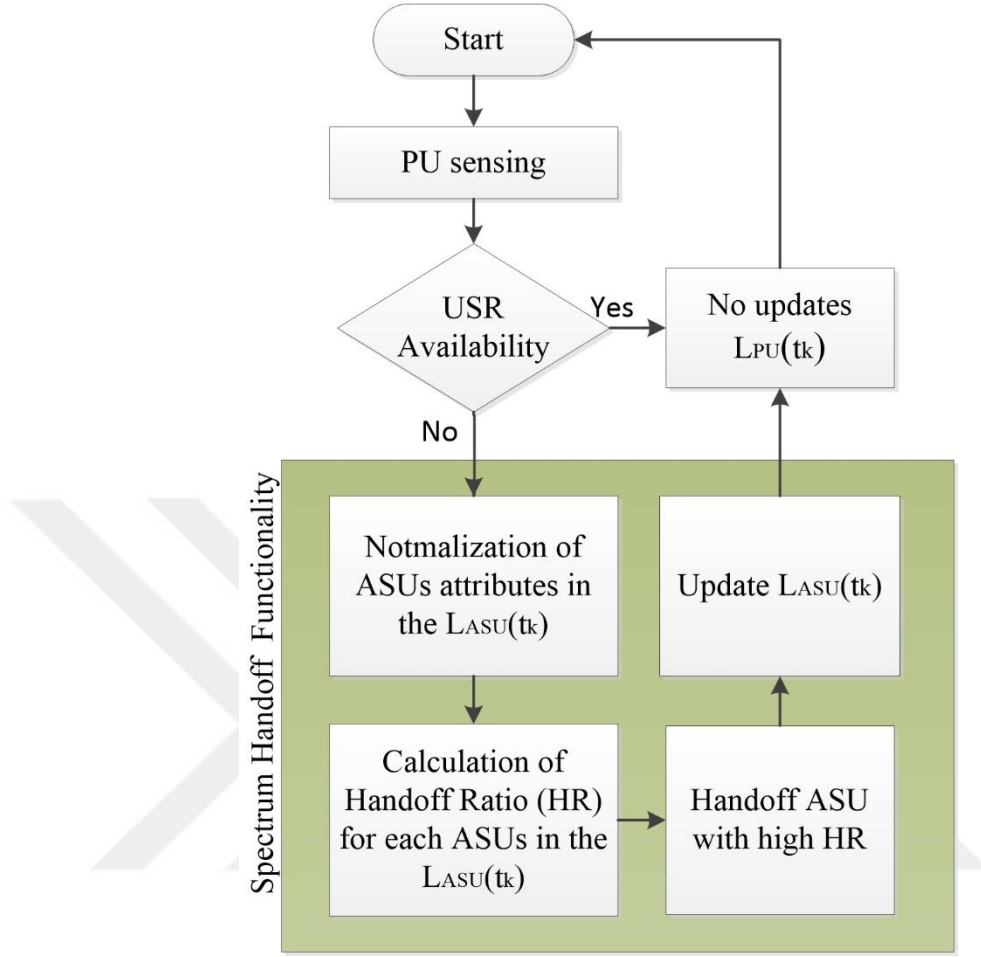
Şekil 8.8. LSA sistem modeli

Şekil 8.10 Çek Cumhuriyeti'ndeki Brno Teknoloji Üniversitesi'nde (BUT) bulunan 3GPP LTE-A sisteminin üzerinde geliştirilmiştir. LTE çekirdeği tam işlevli bir hücre altyapıdan oluşmaktadır. Tanımlanan LTE testbed, araştırma ve eğitim amaçları için kullanılmaktadır [113].

Burada eNodeB 1 (eNB1), iki hücreden (Cell 11 ve Cell 12) oluşmuştur. eNodeB 2 (eNB2), üçüncü hücreyi (Cell22) yönetmektedir. Kapalı piko-hücreler (Picocell) olarak 700 MHz, 2600 MHz ile çalışırken açık ortamlarda 1800 MHz ile çalışmaktadırlar. Önerilen modelde, 700 MHz üzerinde hizmet verilen terminaller için hizmet kalitesi (QoS) ve deneyim kalitesi (QoE) teknikleri uygulanmaktadır.



Şekil 8.9. 3GPP LTE-A testbed [113]



Şekil 8.10. El değişimi mekanizmasının sistem model şeması

8.4.2. Spektrum El Değişirme Mekanizmasının Prosedürü

PU'lar ve SU'ler arasındaki etkileşim ile birlikte önerilen el değişimi prosedürünün sistem modeli Şekil 8.11'de gösterilmektedir.

İlk olarak, spektrum bandına erişim isteyen SU (Requesting SU, RSU), MNO'ya t_i anında talebini gönderir. MNO, FSB'lerin statüsünü kontrol eder istenilen zaman diliminde mevcut FSB varsa, RSU isteği kabul edilir ve durumu ASU olarak değiştirilir. ASU, (i) algılanan PU bulunmadığı takdirde ve (ii) yeterli FSB bulunana kadar hizmet alabilmektedir. Kullanılabilir herhangi bir FSB yoksa algılanan PU için, ASU'nun kullandığı spektrum bandı PU'ya teslim etmek üzere el değişirme prosedürü devreye girecektir. El değişirme durumunu belli eden koşul aşağıdaki gibidir:

$$0 \leq \text{FSB}(t_i) \leq |\text{L}_{\text{PU}}(t_i)| \quad (8.51)$$

t_i zamanında kullanılmayan spektrum bandların sayısı $\text{FSB}(t_i)$ ile belli olurken t_i 'deki PU'lar listesinin sayısı $|\text{L}_{\text{PU}}(t_i)|$ ile gösterilmektedir. Denklem 8.52'e göre MNO, ASU'ların listesini izleyerek atılacak ASU'ların sayısını belli eder. ASU'ların listesi Aşağıdaki gibi belli olmaktadır:

$$L_{\text{ASU}}(t_k) = \{ASU_j = (RSSI_j, RSRP_j, RSRQ_j, SINR_j) \mid 1 \leq j \leq \alpha(t_k), 1 \leq k \leq \phi\} \quad (8.52)$$

Burada $\phi = T \times 60$, T simülasyon işleminin en son zaman dilimini gösterir ve her zaman aralığının arasındaki süre 60 saniyeliliğine simüle edilmektedir. Ayrıca her ASU için dört farklı öznelik kullanılmaktadır ($RSSI_j, RSRP_j, RSRQ_j, SINR_j$). İlgili özelliklerin ayrıntılı açıklaması aşağıda verilmiştir:

- RSSI - Alınan Sinyal Gücü Göstergesi (Received Signal Strength Indicator): Bu parametre, ASU'nun yeterli sinyal gücüne sahip olup olmadığını belirlemek için kullanılmıştır.
- RSRP - Alınan Referans Sinyal Gücü (Reference Signal Received Power): bir RSSI ölçüm türüdür. Tek bir referans sinyalinden alınan ortalama gücü göstermektedir. Genelde aralığı -44dbm (iyi) ila -140dbm (kötü) civarındadır.

$$\text{RSRP} = \text{RSSI} - 10 \times \log(12 \times N) \quad (8.53)$$

Burada N , spektrum bandların sayısıdır. RSRP ve RSSI ölçüm birimi dBm olarak belirlenmiştir [115].

- RSRQ - Alınan Referans Sinyal Kalitesi (Reference Signal Received Quality): RSRQ, alınan referans sinyalinin kalitesini göstermektedir. RSSI ve kullanılan spektrum bandlarının sayısını (aynı bantgenişliği üzerinden) dikkate alarak aşağıdaki gibi ölçülmektedir:

$$\text{RSRQ} = N \times \frac{\text{RSRP}}{\text{RSSI}} \quad (8.54)$$

Burada N , spektrum bandların sayısıdır. RSRQ ölçümü, RSRP güvenilir bir el değiştirme sağlayamadığında veya yeni hücre seçimi kararı vermek için yeterli olmadığında ilave bilgi sağlamaktadır.

- SINR – Sinyal Gürültü Oranı (Signal-to-Noise Ratio): arka plan gürültüsüne göre sinyal kuvvetinin bir ölçüsüdür.

MNO her bir öznitelik için fayda veya maliyet türünü (benefit or cost type) belli ederek normalizasyon işlemi gerçekleştirilir. Burada, RSSI, RSRP ve RSRQ maliyet türünü temsil eder. Öte yandan, SINR, fayda türü anlamına gelir; yani, SINR arttıkça, ASU el değiştirme oranı da yükselmektedir.

El değiştirme prosedüründe, MNO ASU özniteliklerinden RSSI, RSRP, RSRQ, SINR veya hepsini kullanma esnekliğine sahiptir. Öznitelik normalizasyonundan sonra, el değiştirme oranı (Handoff Ratio - HR) aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$HR_{ASU}(t_i) = \sum_{i=1}^{|Cell|} \sum_{i=1}^{\sum_{L_{ASU}}^{Cell_i} t_i} \sum_{z=1}^{|Criterion|} r(j, z) \times \alpha \quad (8.55)$$

Burada, $\sum_{L_{ASU}}^{Cell_i} t_i$, t_i zaman diliminde belirli $Cell_i$ 'deki ASU'ları temsil eder ve $|Criterion|$, dört olarak kabul edilir (ASU özniteliklerin sayısı). Her ASU için özniteliklerin normalize edilmiş değeri $r(j, z)$ olarak verilir; karar matrisi Tablo 8.2'de gösterilmektedir.

Tablo 8.2'de n ASU'ların toplam sayısı ve m $|Criterion| = 4$ olarak belirlenmiştir. Ayrıca, $\alpha = \frac{1}{|Criterion|}$ olarak hesaplanırken ASU'ların özniteliklerinin aynı önem derecesine sahip olduklarını kanıtlamaktadır. HR elde edildikten sonra, en yüksek HR 'si olan ASU'lar, komşu hücrelere aktarılır.

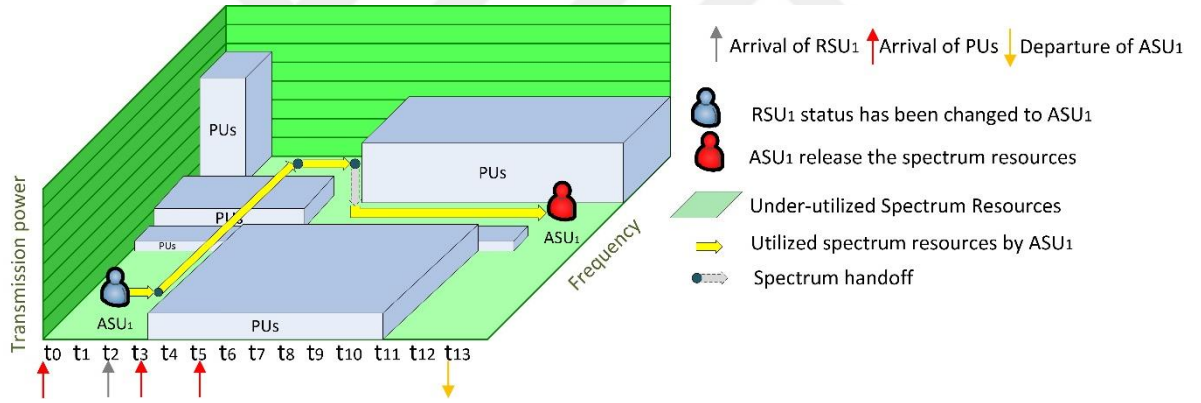
Tablo 8.2. Karar matrisi

ASU listesi	Öznitelikler					
	C_1	C_2	...	C_j	...	C_m
ASU ₁	r_{11}	r_{12}	...	r_{1j}	...	r_{1m}
ASU ₂	r_{21}	r_{22}	...	r_{2j}	...	r_{2m}
⋮	⋮	⋮	...	⋮	...	⋮
ASU _i	r_{i1}	r_{i2}	...	r_{ij}	...	r_{im}
⋮	⋮	⋮	...	⋮	...	⋮
ASU _n	r_{n1}	r_{n2}	...	r_{nj}	...	r_{nm}

Burada, Denklem 8.56 dikkate alınarak karar matrisinde r_{ij} , i 'inci Mesajlar için j 'inci kriterin değerini göstermektedir.

$$\sum_{j=1}^m \alpha_j = 1 \quad (8.56)$$

Şekil 8.12 spektrum el değiştirme prosedürünü detaylı bir şekilde göstermektedir. t_2 zaman aralığında RSU_1 servis alma talebinde bulunmaktadır. MNO t_2 'deki FSB durumunu kontrol eder ve FSB mevcutsa, RSU_1 hizmet almaya başlar ve durumu ASU_1 olarak değiştirilir. Bu durum, PU spektrum bandı geri istediğinde ve ASU_1 'e t_3 'de başka bir FSB teslim edilene kadar devam edecektir. İki zaman aralığı geçtikten sonra tekrar t_5 'de spektrum bandı el değiştirme prosedürü çalıştırılır ve t_{13} 'e kadar başka bir el değiştirme yapmadan ASU_1 servis almaya devam eder ve işlemini t_{13} 'de sona erdirir.



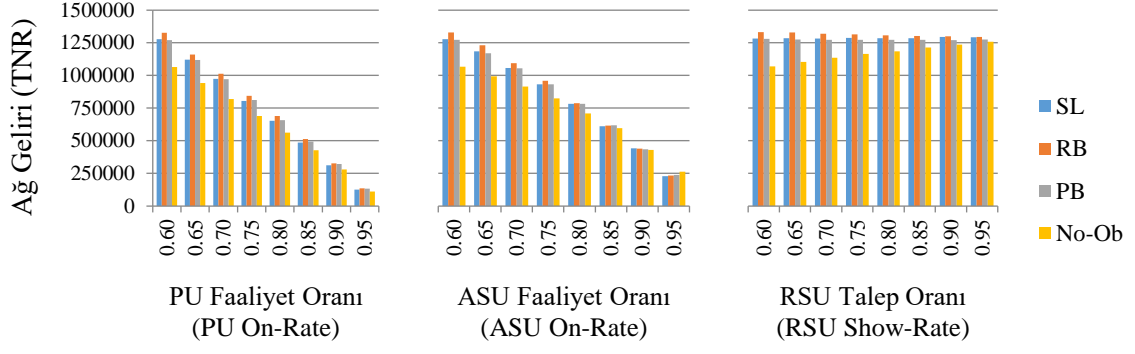
Şekil 8.11. El değiştirme mekanizmasının ayrıntılı sistem modeli

9. BULGULAR VE İRDELEME

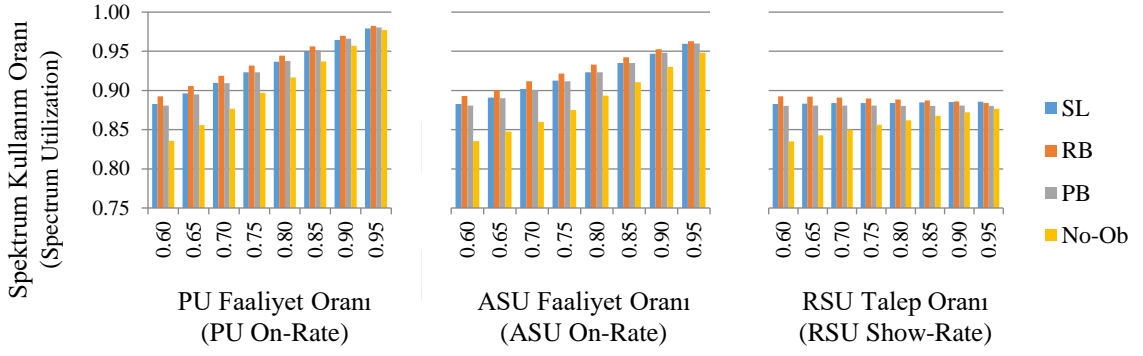
Bu bölümde, çeşitli senaryolar göz önünde bulundurarak önerilen çerçeveler için performans analizleri (Spektrum kullanımı, RSU ve ASU red oranı, Fiyatlandırma politikalarının kıyaslanması, TNR ve CC) değerlendirilmiştir. İlk olarak, Bölüm 9.1 PU, RSU ve ASU faaliyet oranları (on-rate) gibi çevresel parametrelere göre IOFCR performansı incelenmiştir. Bölüm 9.2'de ASU öncelik düzeyi (priority-level) değiştirildiğinde IOFCR çerçevesinin davranışı analiz edilmiştir. Bölüm 9.3, Servis Seviyesine Dayalı politikasında kapasite artırımı ve farklı fiyatlandırma politikalarında eşik (threshold) değişimine ilişkin sonuçlar ile ilgilidir. Bölüm 9.4 IOFCR çerçevesinde PSO analizini gösterirken, Bölüm 9.5 PU faaliyet oranına göre RSU seçimine yönelik analizler sunulmuştur. Bölüm 9.6 Spektrum el değiştirme prosidürünün performans analizini göstermektedir. Bölüm 9.7 ise önerilen farklı fiyatlandırma politikalarının performans analizi, Bölüm 9.8 önerilen fiyatlandırma politikalarının SCP'e karşı performans analizi ve Bölüm 9.9 ASU'lar arasından uygun ASU'yu reddetme fonksiyonunun performans analizini incelemiştir. Bölüm 9.10 fazladan rezervasyon sınırı ve gelir performans analizini göstermektedir. Son olarak, Ön Rezervasyon Yönetim Sisteminin (PRMS) performans analizi Bölüm 9.11 de incelenmiştir.

9.1. PU ve SU Farklı Faaliyet Oranlarına Göre Performans Analizi

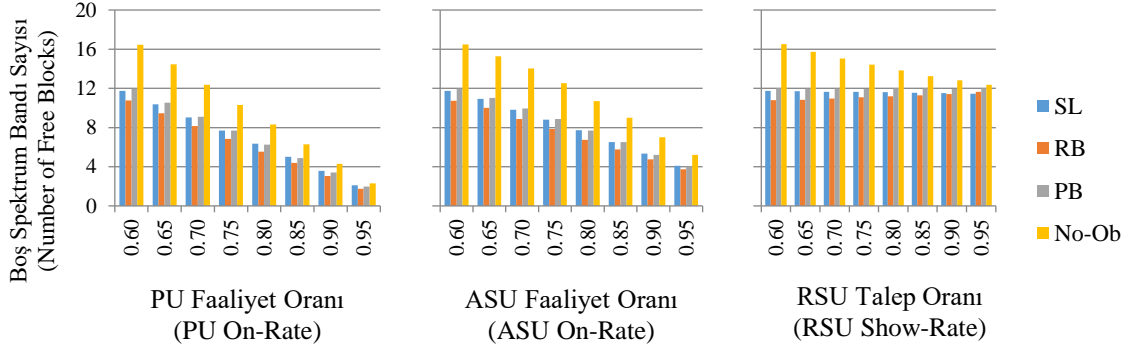
Çevresel parametrelerin IOFCR çerçeve üzerindeki etkilerini değerlendirmek için, uyarlanı fiyatlandırma politikası kullanılmıştır. p_{base} 100 olarak belirlenmiştir. Bu senaryoda ASU'lar ve RSU'ların reddilme durumu rastsal mekanizma ile uygulanmıştır. Kapasite 100 olarak, servis seviyesine dayalı politikasında eşik değeri 0.1, toplam simülasyon süreci (T) değeri 1000, ccr_{ACT} değeri 10, ve ccr_{REQ} değeri 0.25 olarak ayarlanmıştır. Performans ölçümlerinin sonuçları Şekil 9.1'de verilmiştir. Şekil 9.2'deki her sütunda, yalnızca bir çevresel parametre [0.6, 0.95] aralıkta kademeli şekilde artarken diğer parametreler sabit 0.6 olarak ayarlanmıştır.



(a)



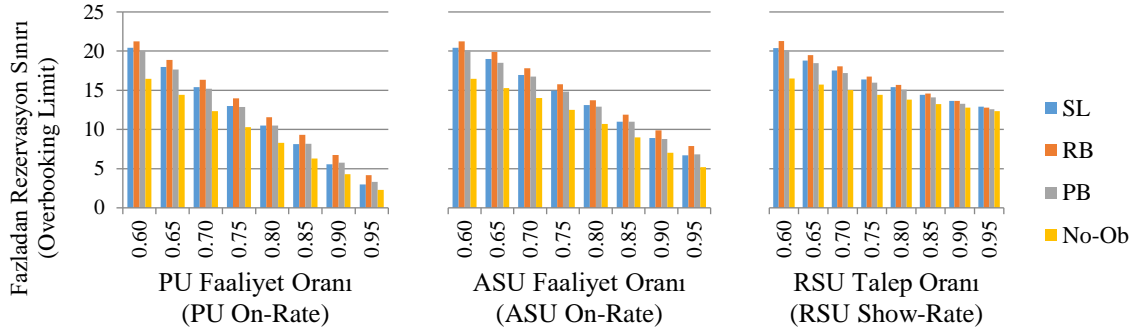
(b)



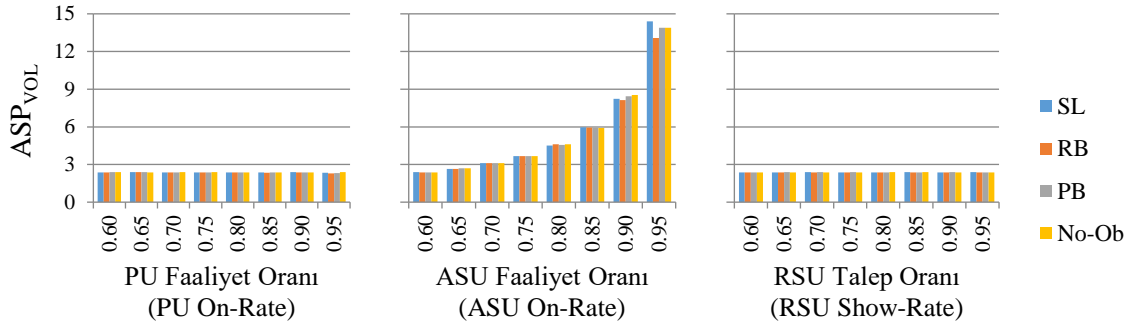
(c)

Şekil 9.1. Kullanıcı faaliyet oranına dayalı IOFCR performansı

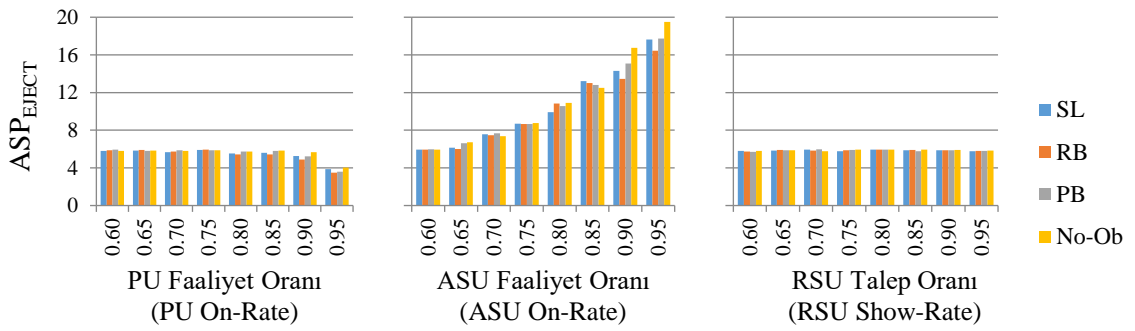
Şekil 9.1'in devamı



(d)

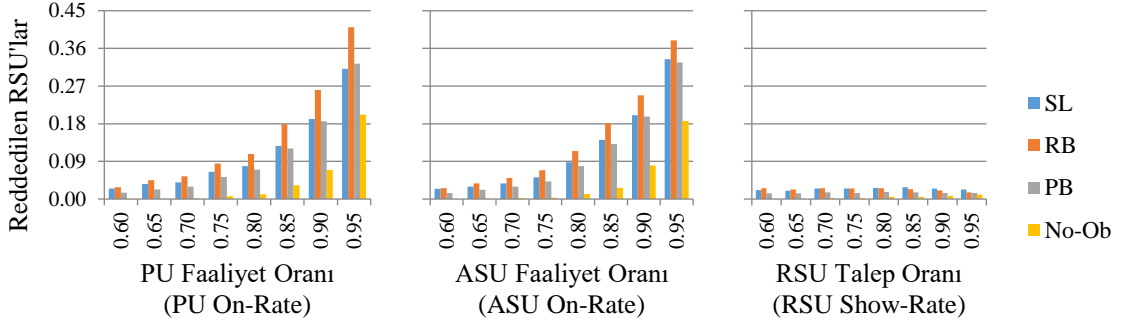


(e)

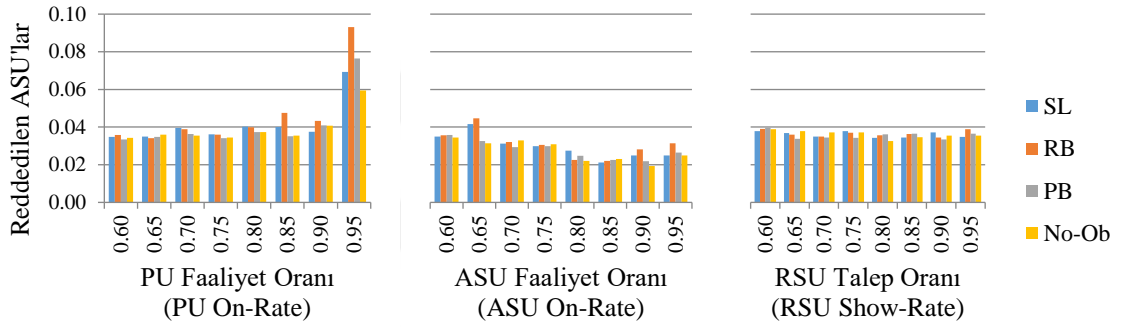


(f)

Şekil 9.1'in devamı



(g)



(h)

PU faaliyet oranı arttıkça, TNR doğrusal olarak azaldığı Şekil 9.1-a'de gözlenmiştir. Bunun nedeni, PU faaliyet oranı arttıkça, rezervasyon aralığındaki FSB'lerin sayısının azalmasıdır. Riske dayalı politikası (RB), tüm PU faaliyet oranlarında en yüksek TNR'e sahip olan fazladan rezervasyon politikasıdır. No-overbooking en düşük TNR'ye sahiptir.

ASU'ların veri iletimine devam etmesi talebi, kaynak yetersizliği problemini beraberinde getirmektedir. Bu nedenle, TNR, tüm fazladan rezervasyon politikalarında, PU faaliyet oranına göre neredeyse benzer hale gelir (Şekil.9.1-a). ASU ve PU faaliyet oranı 0.7'den büyük olduğunda (yüksek PU faaliyet oranı) daha fazla RSU'nun reddedilmesi ve daha fazla ASU'nun çıkartılması ile sonuçlanır. Böylece hem RSU'lar hem de ASU'lar için daha fazla tazminat bedeli (CC) ödenecektir.

Şekil 9.1-a'da farklı bir sonuç daha elde edilmiştir. RSU'ların talep oranı arttıkça, TNR aynı kalmaktadır. Zira, daha yüksek TNR elde etmek, RSU'ların yüksek rezervasyon

talep oranına dayanmamaktadır. Aksine, TNR fazladan rezervasyon sınırına bağlıdır ve bu sınır FSB sayısı ile doğrudan ilişkilidir.

Spektrum kullanımı için performans sonuçları Şekil 9.1-b'de verilmiştir. Yüksek PU faaliyet oranında spektrum kullanımının artması gözükmemektedir. Ayrıca, daha fazla spektrum kullanımını elde etmek için, fazladan rezervasyon politikalarının düşük PU faaliyet oranlarında kullanılması gerekmektedir. Artan PU faaliyet oranıyla birlikte, benzer şekilde TNR ve spektrum kullanımı tüm fazladan rezervasyon politikaları için aynı sonuca yaklaşmaktadır. Şekil 9.1-b, ASU faaliyet oranının artması ile elde edilen spektrum kullanımı, PU faaliyet oranının artması ile elde edilen spektrum kullanımından biraz daha kötü olduğunu ortaya koymaktadır. Bu durumda, daha yüksek spektrum kullanımı için ASU faaliyet oranının artmasının yanı sıra, RSU talep oranının artması gerektiği belirlenmektedir. Yani ASU faaliyet oranı ve RSU talep oranı fazla olduğu muddetce spektrum kullanımından tam verim alınacaktır.

Servis Seviyesine Dayalı (SL), Riske Dayalı (RB) ve Olasılığa Dayalı (PB) fazladan rezervasyon politikalarını (Şekil 9.1-b) kullanarak RSU talep oranının tüm değerleri için, spektrum %89'a kadar kullanılmaktadır ve RSU talep oranı artsa da bu değer neredeyse sabit kalmaktadır. PU ve ASU faaliyet oranları 0,6 olarak sabitlendiğinde, her bir rezervasyon aralığında FSB sayısının neredeyse aynı olması, kabul edilen RSU sayısının her zaman aynı olmasına neden olur.

Genel olarak FSB'lerin sayısı PU ve ASU'ların sayısına bağlıdır. Bu durum, Şekil 9.1-c'de gösterilmiştir; ortalama FSB sayısı, PU ve ASU faaliyet oranına göre analiz edilmiştir. Daha fazla PU ve ASU'lar aktif hale geldiğinde, RSU'lara daha az FSB sağlanmaktadır. Fazladan rezervasyon politikası uygulanmadığında daha fazla FSB bulunduğu belirlenmiştir.

RSU talep oranının farklı değerlerine göre serbest spektrum bandların sayısı neredeyse sabit kalırken, fazladan rezervasyon politikası uygulanmadığında talep oranının artmasıyla FSB sayısı azalmaktadır (Şekil.9.1-c).

Riske Dayalı Politika kullanıldığında artan PU ve ASU faaliyet oranlarını göz önünde bulundurarak, fazladan rezervasyon sınırı daha yüksek değerlere ayarlanır (Şekil 9.1-d). Diğer fazladan rezervasyon politikalarıyla kıyaslandığında, Riske Dayalı Politika daha fazla risk almaktadır. Aynı zamanda fazla risk almakla beraber yüksek TNR elde etmiştir. PU ve ASU faaliyet oranı arttıkça, Servis Seviyesine Dayalı Politikası için fazladan rezervasyon sınırı Olasılığa Dayalı Politikasından daha düşüktür. Zira, yüksek PU ve ASU

faaliyet oranı durumunda, Servis Seviyesine Dayalı Politikası daha düşük risk alır ve reddedilen RSU'ların sayısını en aza indirmeye çalışmaktadır. Öte yandan, fazladan rezervasyon sınırının doğrudan RSU talep oranı ile ilişkili olduğu görülmektedir. Sonuç olarak, RSU ve ASU'lara daha fazla CC ödeme riskini en aza indirmek için RSU talep oranı arttıkça fazladan rezervasyon limiti sınırlandırılmaktadır.

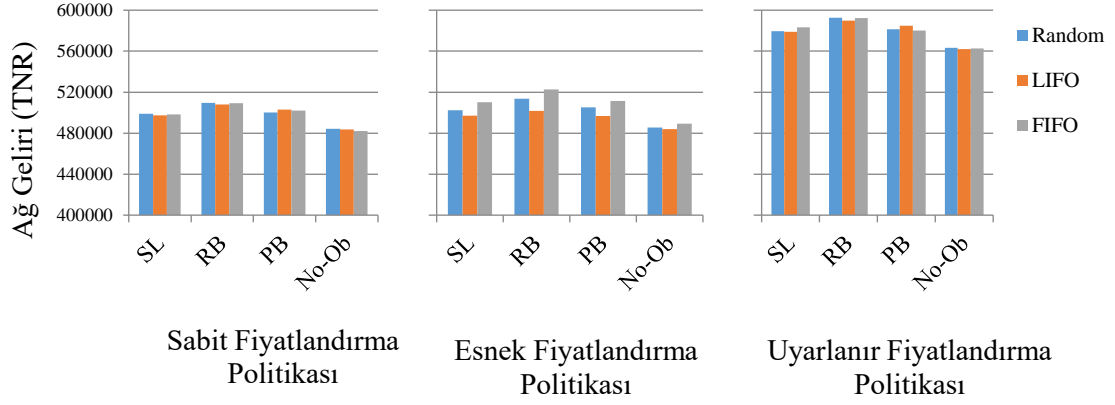
Spektrum bandı gönüllü olarak serbest bırakan ASU'lar (ASP_{VOL}) ve PU faaliyet oranına bağlı olarak spektrum bandı serbest bırakmak zorunda kalan ASU'lar (ASP_{EJECT}) için ortalama hizmet süreleri Şekil 9.1-e ve Şekil 9.1-f'de verilmektedir. Bu performans ölçütleri sırasıyla ASP_{VOL} ve ASP_{EJECT} olarak belirtilmiştir. ASP_{VOL} ve ASP_{EJECT} 'in ASU faaliyet oranı ile orantılı olduğu belirlenmiştir. ASU'lar Spektrum bandları daha fazla süreliğine kullanmak istediklerinde, ASU'ların ortalama hizmet süreleri artmaktadır. Sonuç olarak, ASP_{VOL} ve ASP_{EJECT} 'in PU faaliyet oranı ve RSU talep oranına göre sırasıyla 2,8 ve 6 civarında sabit kaldıkları Şekil 9.1-e ve Şekil 9.1-f'de izlenmektedir.

Şekil.9.1-g, simülasyon sırasında reddedilen RSU'ların yüzdesini göstermektedir. RSU'ların kabul oranı %0,03 civarında sabittir. Öte yandan, yüksek PU ve ASU faaliyet oranı spektrum kıtlığına neden olmaktadır. Buna bağlı olarak, reddedilen RSU'ların yüzdesi de artmaktadır.

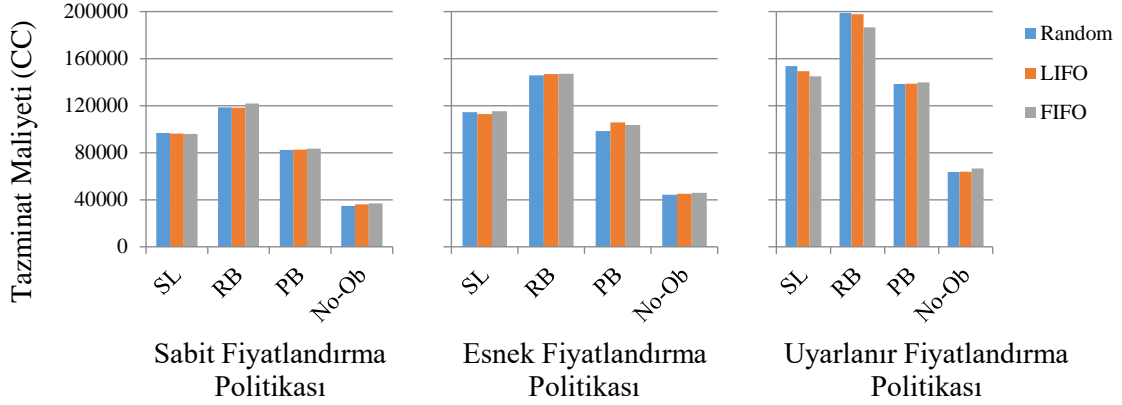
Şekil 9.1-h'de gösterildiği gibi, ASU'lar hizmet almak açısından RSU'lara göre öncelikli değildir. Dışarı atılan ASU'ların yüzdesi, çevre parametrelerine göre %0,02 ile %0,04 arasında değişmektedir. Ancak dışarı atılan ASU'ların sayısı, yüksek PU faaliyet oranlarında belirgin biçimde artmaktadır.

9.2. Fiyatlandırma ve Ret Politikalarında ASU Öncelik Düzeylerine Dayalı Performans Analizi

Fiyatlandırma ve red politikaları ile ilgili, IOFCR çerçevesi davranışını analiz etmek için tüm kullanıcı faaliyet oranları 0.75, kapasite değeri 100, fazladan rezervasyon politikası RB, T değeri 1000, p_{base} 100, ccr_{ACT} 10, ve ccr_{REQ} 0.25 olarak belirlenmiştir.



(a)



(b)

Şekil 9.2. Fiyatlandırma politikalarına dayalı TNR ve CC

Şekil 9.2-a'da gösterildiği gibi, uyarlanır fiyatlandırma politikası, TNR açısından sabit ve esnek fiyatlandırma politikalarından daha iyi performans göstermiştir. Bunun nedeni, uyarlanır fiyatlandırma politikası, FSB sayısına bağlı olarak spektrum bandı fiyatlarını anlık belirlemektedir. Daha fazla spektrum bandı serbest bırakıldıkça uyarlanır fiyatlandırma politikası tarafından düşük fiyatlar önerilmektedir. Aksine, FSB kısıtlı olduğunda spektrum bandı fiyatları yükselmektedir.

IOFR çerçevesinde esnek fiyatlandırma politikası kullanıldığında, RSU için uygun bir red politikasının seçilmesi, yüksek TNR elde etmekte önemlidir. $L_{RSU}(t_{i+1})$ listesindeki tüm RSU'lar, rezervasyon talep süresine göre düzenlenmiştir. RSU'lar rezervasyon taleplerini MNO'ya gönderdikleri zaman rezervasyon için daha az ödeme

yapmaktadır. Fakat, reddetme süreci için erken rezervasyon yapan RSU'ların seçilmesi (FIFO Reddetme Politikası), RSU'ların memnuniyetine zarar verebilir.

Reddedilen RSU'lar ve atılan ASU'lar için verilen tazminat bedeli (CC), rezervasyon aralığında RSU ve ASU tarafından ödenilen fiyatlar vasıtasıyla belirlenmektedir. Böylece, yüksek rezervasyon fiyatları yüksek CC ile sonuçlanır. Şekil 9.2-b'de görüldüğü gibi, CC, Şekil 9.2-a'daki TNR ile uyumludur.

Sabit ve uyarlanır fiyatlandırma politikaları uygulandığında, Fiyatlar rezervasyon aralığının başında belirlendiğinden dolayı ve rezervasyon süresince sabit oldukları için RSU'ların sırasına göre red edilmesi veya rastgele red edilmesi arasında bir fark gözükmemektedir.

Tablo 9.1 Rezervasyon politikalarının yüksek ve düşük öncelikli ASU'lara göre TNR analizini

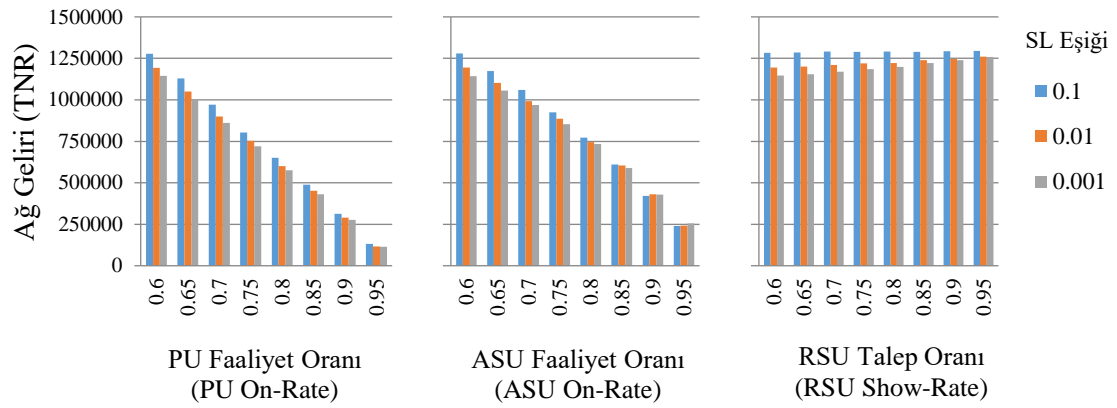
			Fazladan Rezervasyon Politikaları			
			SL	RB	PB	No-Ob
Yüksek Öncelikli ASU'lar (High Priority to ASU)	Ağ geliri (TNR)		543185	555652	546798	526020
	Kabul edilen RSU'lar sayısı		4907	5057	4908	4635
Düşük Öncelikli ASU'lar (Low Priority to ASU)	Ağ geliri (TNR)		572580	588750	577869	551784
	Kabul edilen RSU'lar sayısı		5228	5396	5219	4909

ASU'lar için hizmet sürekliliği (Service continuity) ve RSU'lara adil bir erişim sağlamak, CRN'deki bir rezervasyon çerçevesinde kilit hususlardandır. Sistem gereksinimlerine bağlı olarak ASU'ların öncelik düzeyi, hizmet sürekliliği veya adil erişim için değiştirilebilir. Tablo 9.1, tüm rezervasyon politikalarının yüksek ve düşük ASU önceliklerine göre analizini göstermektedir. Değerlendirmede, reddetmeye ilişkin politika olarak rastgele politikası uyarlanmıştır. Ayrıca, adaptif fiyatlandırma politikası seçilmiştir, tüm kullanıcı faaliyet oranları 0.75, kapasite değeri 100, T değeri 1000, p_{base} 100, ccr_{ACT} 10 ve ccr_{REQ} 0.25 olarak belirlenmiştir. Tablo 9.1'de görüldüğü gibi, TNR ve kabul edilen RSU'lardaki iyileşme yaklaşık %5'dir; Öte yandan, ASU'ların RSU'lara göre daha yüksek önceliğe sahip olması, ASU hizmet devamlılığını sürdürürken, TNR ve RSU'ların kabul oranını düşürmektedir.

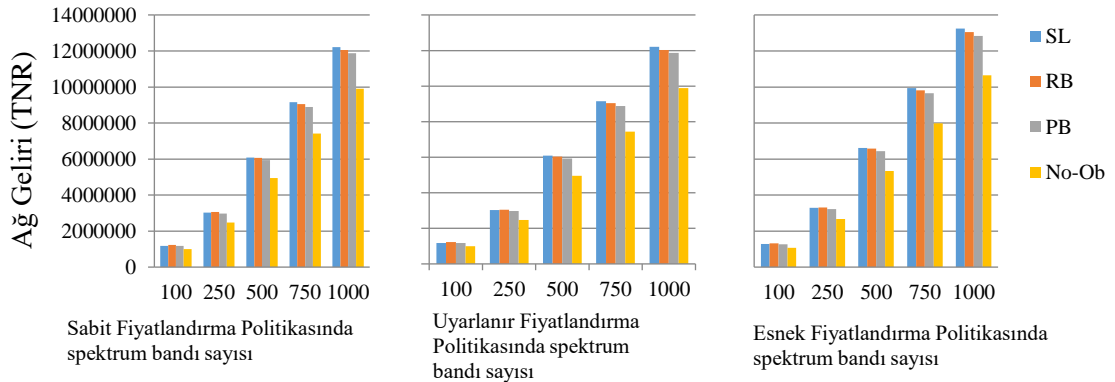
9.3. IOFCR Diğer Performans Sonuçları

Servis Seviyesine Dayalı politikasının servis seviyesi eşliğinin artması, RSU'ların rezervasyon taleplerini kabul ederken fazla risk alınacağını belirler. Servis seviyesi eşliği daha düşük değerlere ayarlanırsa, birçok RSU'nun reddedilmesi meydana gelebilir. Bu nedenle, yüksek TNR ve RSU memnuniyeti arasında bir dengeleme göz önünde bulunmalıdır.

Servis seviyesi eşliğindeki değişikliğin etkisi, PU ve ASU faaliyet oranı ve RSU talep oranına göre analiz edilmiştir ve sonuçlar Şekil 9.3-a'da verilmiştir. p_{base} ve kapasite değeri 100, rastgele red politikaları uygulanmaktadır; ccr_{ACT} ve ccr_{REQ} sırasıyla 10 ve 0.25 olarak belirlenmiştir.



(a)



(b)

Şekil 9.3. SL eşliği ve farklı fiyatlandırma politikaları, farklı kullanıcı faaliyet oranı ve farklı spektrum bandı sayısına dayalı TNR değerleri

TNR'nun PU ve ASU faaliyet oranlarının artmasıyla azaldığı gözükmektedir. Dolayısıyla, ilgili parametreler 0,85'ten büyük olduğunda, servis seviyesi eşliğini daha yüksek değerlere ayarlamak, yüksek TNR elde etmek için herhangi bir avantaj sağlamaz. Daha spesifik olarak, PU faaliyet oranı 0.95'e eşit olduğunda, daha fazla RSU reddedilir ve daha fazla CC ödenmelidir (Şekil 9.3-a).

Farklı Fazladan rezervasyon ve fiyatlandırma politikaları kullanarak kapasite ve TNR arasındaki ilişki Şekil 9.3-b'de analiz edilmiştir. TNR'nun artan kapasite ile doğrusal olarak bağlantısı vardır. Ayrıca kapasite arttıkça SL'nin diğer fazladan rezervasyon politikalarına göre daha iyi performans sergiler. Adaptif fiyatlandırma politikasının çerçevede dahilinde kullanılması, TNR açısından yaklaşık %10'luk bir iyileşme göstermektedir.

9.4. IOFCR PSO Performans Analizi

Bu bölümde PSO tarafından optimize edilmiş IOFCR'ın davranışı analiz edilmektedir. Fazladan rezervasyon fiyatı 100 ve 200 olarak ayarlanmıştır.

Sürü boyutu (Swarm Size) ve tekrarlanma sayısı (number of iterations) 100 olarak belirlenmiştir. PU, RSU ve ASU faaliyet oranı %15 ve %85 aralığında dağılmıştır.

Fazladan rezervasyon politikası, Olasılığa Dayalı (PB) politikaya dayanarak simüle edilmiştir. Uyarlanabilir fiyatlandırma politikası seçilerek, $p_{adaptive}$ değeri 100 olarak belirlenmiştir. ASU ve RSU'ların reddi ise rastgele hepaslanmaktadır. Kapasite 100 olarak belirlenmiştir. Performans ölçümlerinin sonuçları ortalama 100 zaman aralığında Tablo 9.2'de verildiği gibi elde edilmiştir.

PSO tarafından optimize edilmiş IOFCR'deki önerilen fitness fonksiyonu aracılığıyla fazladan rezervasyon fiyatının ve CC oranının optimal değerlerine erişilir. Tablo 9.2'de gösterildiği gibi, PU, ASU ve RSU'nun faaliyet oranları %15 olduğunda, CC oranı minimum değer 0.05 olarak seçilmiştir. Bu durum, CC ödeme olasılığı düşük olduğunda, CC oranının değeri TNR'yi etkilemediği gösteriyor.

Öte yandan, çok sayıda serbest spektrum bandı olduğunda, RSU'lar en az 110,80 ödeyerek spektrum bandı kullanabilirler. Buna karşılık, en kritik durum, PU, ASU ve RSU oranının yüksek olmasıdır (%65 ila %85).

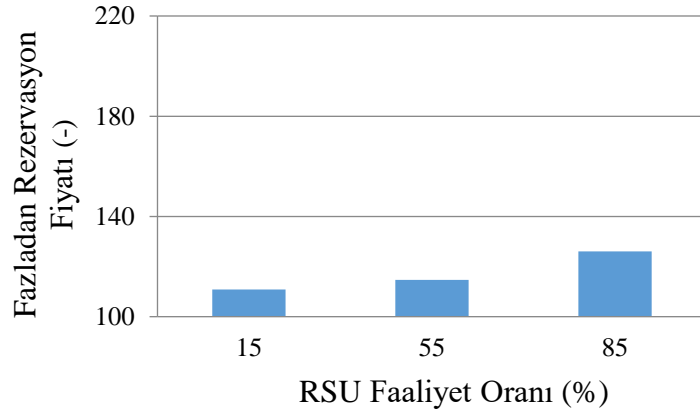
Tablo 9.1. IOFCR çerçevesinde PSO performans analizi

Parametreler		Sonuçlar		
PU faaliyet oranı	ASU faaliyet oranı	RSU faaliyet oranı	CC oranı	Fiyat
0.85	0.85	0.85	0.2415	199.50
		0.55	0.2237	188.20
		0.15	0.1516	160.12
	0.55	0.85	0.2323	189.55
		0.55	0.2185	184.98
		0.15	0.1488	156.50
	0.15	0.85	0.2197	186.20
		0.55	0.1930	178.31
		0.15	0.1341	142.10
0.55	0.85	0.85	0.1819	168.11
		0.55	0.1688	165.05
		0.15	0.1155	138.90
	0.55	0.85	0.1790	169.37
		0.55	0.1601	156.40
		0.15	0.1028	131.20
	0.15	0.85	0.1519	159.50
		0.55	0.1490	157.64
		0.15	0.0964	131.30
0.15	0.85	0.85	0.1478	156.10
		0.55	0.1355	145.99
		0.15	0.0832	129.11
	0.55	0.85	0.1444	154.20
		0.55	0.1201	140.54
		0.15	0.0688	118.98
	0.15	0.85	0.0990	126.01
		0.55	0.0612	114.65
		0.15	0.0500	110.80

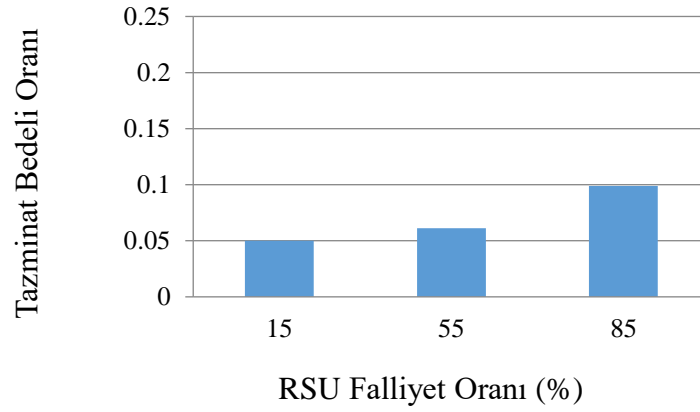
Bu durumda, fazladan rezervasyon fiyatı PSO tarafından optimize edilmiş, IOFCR tarafından 199.50 olarak seçilmiştir. Yani, RSU'ların, sınırlı FSB'ler olduğunda bir spektrum bandı rezervasyon yapmak adına en yüksek değeri ödemeleri gerektiği anlamına gelir. Zira, trafik yüksek olduğunda, serbest spektrum bandı alamayan RSU'ların atılması riski de yüksektir. Böylece, çıkarılan RSU'lara ödenilen CC, CC oranına dayalı en düşük değer olmalıdır. Bununla birlikte, CC oranının değeri de RSU'nun memnuniyetini dikkate alarak yüksek seçilmiştir. PSO tarafından optimize edilmiş IOFCR yüksek gelir ve müşteri

memnuniyeti arasındaki dengeyi koruyarak kritik durumlarda dahi iyi performans göstermektedir.

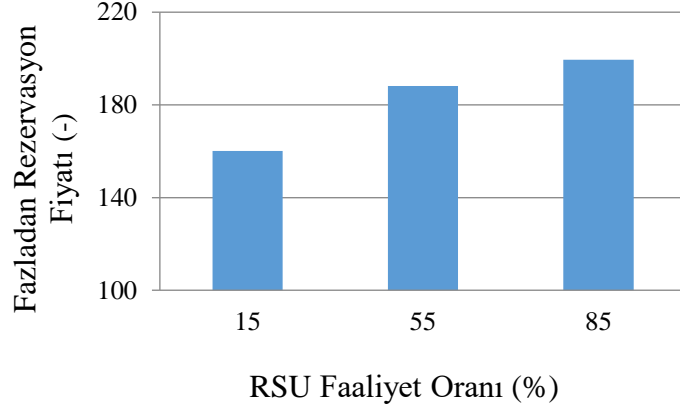
Şekil 9.4 ve Şekil 9.5, Tablo 9.2 sonuçlarını PU ve ASU faaliyet oranı %15 olduğunda göstermektedir. RSU talep oranını artarken, fazladan rezervasyon fiyatının ve CC oranının değerleri de artmaktadır. Fazla fazladan rezervasyon fiyatı ödeyen RSU'lara Şekil 9.5 ve Şekil 9.7'de gösterildiği gibi daha fazla CC ödenmiştir.



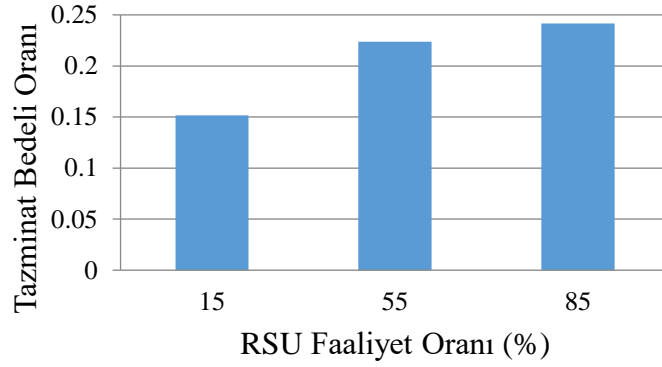
Şekil 9.4. PU ve ASU faaliyet oranları %15 olduğunda RSU talep oranına dayanarak fazladan rezervasyon fiyatı



Şekil 9.5. PU ve ASU faaliyet oranları %15 olduğunda RSU talep oranına dayanarak CC oranı



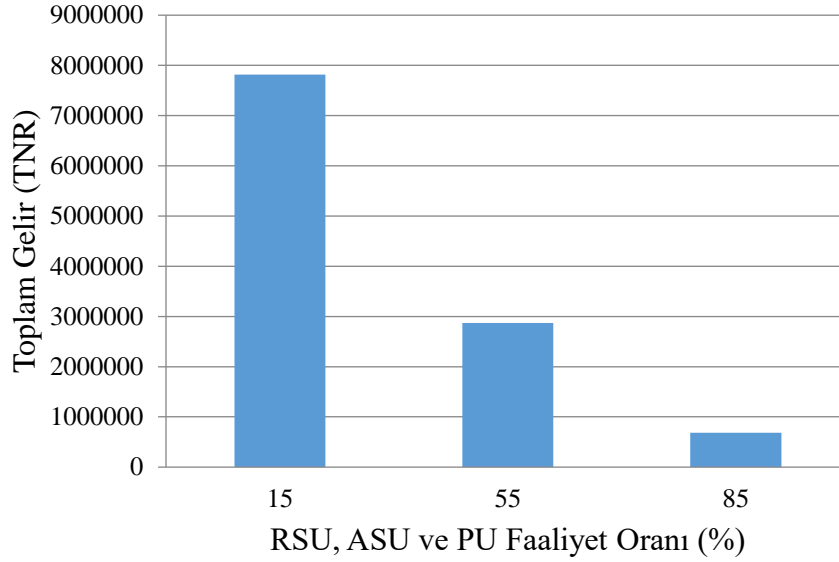
Şekil 9.6. PU ve ASU faaliyet oranları %85 olduğunda RSU talep oranına dayanarak fazladan rezervasyon fiyatı



Şekil 9.7. PU ve ASU faaliyet oranları %85 olduğunda RSU talep oranına dayanarak CC oranı

Fazladan rezervasyon fiyatı ve CC oranı PU ve ASU faaliyet oranı %85 olduğunda Şekil 9.6 ve Şekil 9.7'de gösterilmektedir. Şekil 9.4'le kıyaslandığında, Şekil 9.6'deki fazladan rezervasyon fiyatları çarpıcı bir şekilde artmıştır. Yani PU ve ASU'lar tarafından spektrum kullanım oranının artmasıyla RSU'lar tarafından ödenilen fazladan rezervasyon fiyatının artması biribiri ile ilişkilidir.

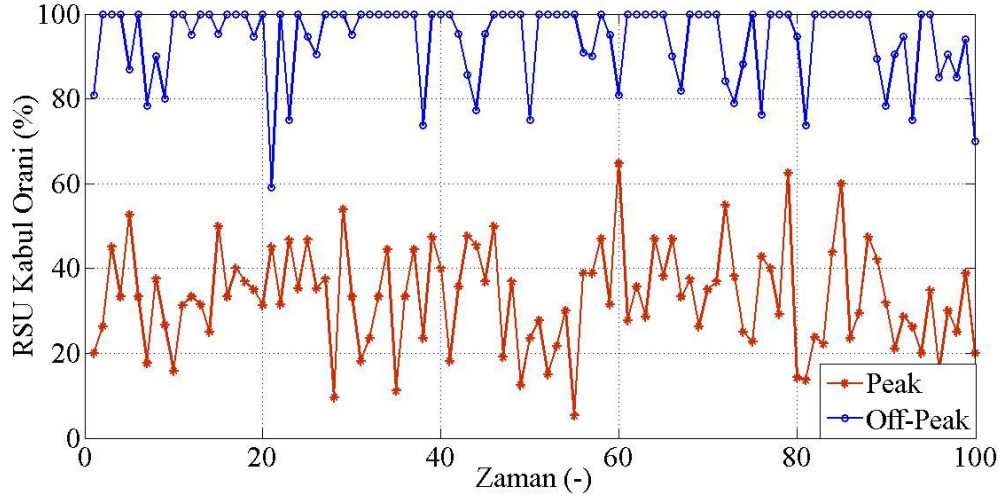
PU, RSU ve ASU faaliyet oranına dayanan TNR Şekil 9.8'de gösterilmiştir. PU'ların yüksek spektrum kullanım oranında TNR önemli ölçüde azalmıştır. Bunun nedeni, PU faaliyeti arttıkça, rezervasyon aralığındaki FSB'lerin sayısının azalmasıdır.



Şekil 9.8. Farklı PU ve ASU ve RSU faaliyet ve talep oranlarına dayanılarak elde edilen gelir

9.5. PU Faaliyet Oranına Göre RSU Seçimi

Bu bölümde, BUT LTE-A sisteminde [113] yapılan araştırmaların detayları sunulmaktadır. Önerilen rezervasyon çerçevesinin ilk olarak yoğun ve yoğun olmayan saatlerde RSU kabul oranı analiz edilecektir. Sonrasında MNO'nun RSU seçimindeki karar incelenmiştir. Önerilen modeli değerlendirmek için, toplam simülasyon süresi 100, FSB ortalama %75 PU'lar tarafından kullanılmıştır. Yoğun olmayan saatlerde PU'ların faaliyet oranı %25'dir. Bu senaryoda kullanıcı öznitelikleri RSSI, bit hızı (BR), Hareket yönü (MD) ve kullanıcı geçmişi (UH) olarak göz önünde bulunmuştur. Telekomünikasyon departmanında kurulu olan LTE-A sistemine göre (BUT), RSSI aralığı [-100 -30] dBm, BR [1 33] Mbit/s ve MD "1" ve "2" ile gösterilmiştir; burada "1" baz istasyonuna doğru RSU yönünü göstermektedir; "2" ise RSU'nun ters yönde olduğunu göstermektedir. Toplam spektrum bandı sayısı, tüm zaman aralıklarında 25 RB'dir. Güvenilir sonuçlar elde etmek için, simülasyon 100 kez çalıştırıldıktan sonra ortalama sonuçlar sunulmaktadır.



Şekil 9.9. RSU'ların yoğun ve yoğun olmayan saatlerde kabul oranı

Şekil 9.9, yoğun ve yoğun olmayan saatlerde ortalama RSU'ların kabul oranını göstermektedir. Yoğun olmayan saatlerde MNO RSU'ların çoğuna hizmet vermektedir, 0.9429. Ancak, spektrumun %75'i PU'lar tarafından kullanıldığında, RSU'ların kabul oranı ortalama 0.3431 olduğuna göre RSU'ların çoğu özellikle RSU talep oranının yüksek olduğu dönemlerde MNO tarafından reddetmiştir. Bu durumda MNO RSU'ları nasıl memnun edebilir ve ağ performansını nasıl artırabilir? Bu soruyu cevaplamak için MNO'nun karar performansını yoğun saatlerde gösteren bir örnek sunulmuştur. Sonuçlar, hangi RSU'ların reddedildiğini ve hangilerinin hizmet aldığını gösterirken, MNO'nun uygun kararıyla RSU'yu nasıl memnun edebileceği açıklanmıştır. Bunun için MNO, her bir RSU için RSSI, BR, MD ve UH gibi dört farklı parametreyi göz önünde bulundurur. Tablo 9.3, MNO'nun bakış açısından özniteliklerin önem sırasını ve AHP yöntemi ile önceliklere göre belirlenmiş ağırlıkları göstermiştir.

Tablo 9.2. Karar kriterlerinin AHP metodundaki önem dereceleri

AHP parametreleri	RSU Öznitelikleri			
	RSSI	BR	MD	UH
MNO tarafından belirlenen öznitelik önem sıraları	1	2	4	3
AHP yöntemine dayalı öznitelik ağırlıkları	0.46	0.27	0.11	0.16

Simülasyon sırasında, “ $C \geq BR$ ve $FSB \geq TH$ ” şarta uyan zaman dilimi t_{17} olarak Tablo 9.4 ile gösterilmiştir. t_{17} 'de 5 RSU bulunmaktadır. $FSB = 2$ olduğu halde, RSU'lardan üçü reddedilecektir. En yüksek ağırlık RSSI'ya tahsis edildiğinden dolayı, kabul edilen RSU'lar RSU_{71} ve RSU_{72} 'dir. Açıklama olarak, BR hakkında aday RSU'lar RSU_{72} ve RSU_{74} . Ancak, $RSU_{74}(MD) = 2$ olduğundan MNO, RSU_{74} yerine RSU_{71} kabul etmeyi tercih etmektedir. Zira, MNO, RSU_{74} kabul etse bile, bu RSU düşük RSSI gücü ve bas istasyona ters yönde ilerlediğinden dolayı muhtemelen spektrum bandı terk edecektir ve otomatik olarak FSB sayısı artacaktır. Bununla birlikte, RSU_{74} reddettiği için $RSU_{74}(UH)$ bir sonraki istek süresince 34 olacak, gelecek taleplerde RSU_{74} kabul oranını artıracaktır. Bu yüzden en mantıklı seçim RSU_{71} ve RSU_{72} .

Tablo 9.3. 17'inci simülasyon zaman aralığındaki RSU parametre değerleri

RSU öznitelikleri	17'inci simülasyon zaman aralığındaki RSU özniteliklerinin değerleri				
ASU_{ID}	71	72	73	74	75
RSSI	-35	-59	-93	-74	-81
BR	85	54	92	36	94
MD	1	1	1	2	1
UH	20	11	33	33	32

9.6. El Değiştirme Prosidürünün Performans Analizi

Bu bölümde, BUT LTE-A testbed üzerinde Spektrum El Değiştirme prosidürünün performansı analiz edilmiştir. BUT LTE-A ağı, üç hücreden oluşmuştur; Cell 11 (ID1); Cell 12 (ID2); Cell 22 (ID3). Her bir hücredeki toplam RB sayısı 25'dir (mevcut 5MHz bantgenişliğinden tahsis edilmiştir). Tablo 9.5, tüm simülasyon parametrelerini listelemiştir.

Şekil 9.10-a, önerilen Spektrum El Değiştirme prosedürü uygulanmadan önce Cell 12'nin spektrum kullanımını göstermektedir. Ayrıca, Şekil 9.10-b, Spektrum El Değiştirme prosidürünün uygulandığı durumu göstermektedir. Her iki durumda da spektrum kullanımı 100 zaman aralığında PU faaliyet oranı [0.25-0.85] bağlıdır. Her iki Şekil 9.10-a ve Şekil 9.10-b'de FSB'lerin oranı, PU'nun faaliyet oranına bağlıdır.

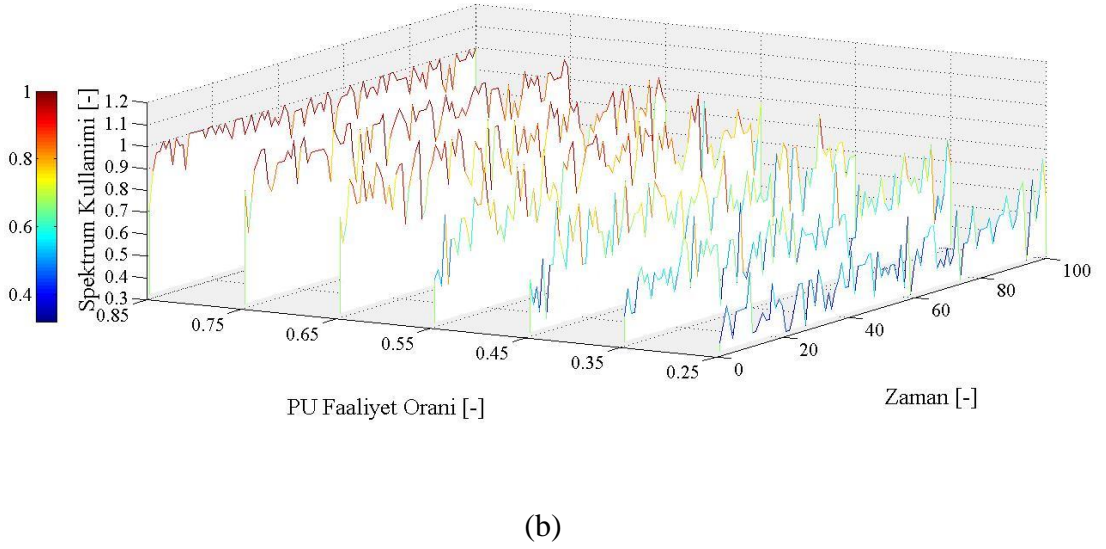
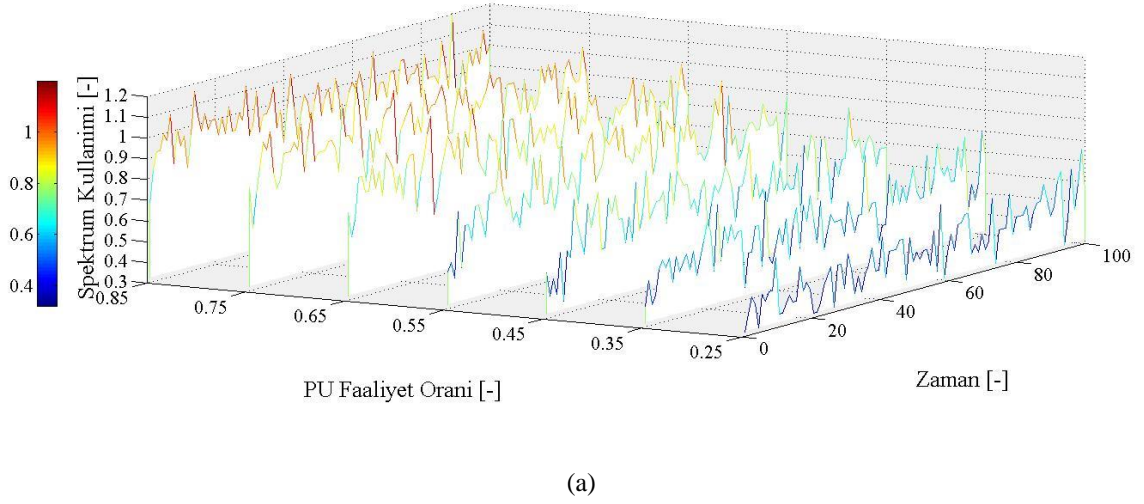
Tablo 9.4. Simulation parametereleri

Parameterler	Parametere değerleri
Cell sayısı (eNBs)	3
Frekans bandı	17 (700 MHz)
Bantgenişliği	5 MHz
Spektrum bandı sayısı (RBs)	25
Simulasyon süreci	[100] Seconds
PU faaliyet oranı	[0.25; 0.85]
Temel fiyat (P_b)	100 mu/SB
RSSI	[-79; -63] dBm
RSRP	[-100; -30] dBm
RSRQ	[-10; -6] dBm
SINR	[1; 30] dB

Daha yüksek PU aktivitesini (0.85) göz önüne alırsak, kullanılabilir spektrum kapasitesinin %100'ün üzerindeki spektrum kullanımı belirgindir - yani belirli zaman aralıklarında, $0 \leq \text{FSB}(t_k) \leq |\text{L}_{\text{PU}}(t_k)|$ durum meydana geldiğine göre bazı ASU'ların ağdan bağlantısı kesilmesi gerekmektedir. Bahsedilen spektrum kullanım durumu ile ilgili olarak, t_{60} 'de $0 \leq \text{FSB}(t_{60}) < |\text{L}_{\text{PU}}(t_{60})|$ durumu oluşmaktadır. $\text{FSB}(t_{60}) = 5$ ve $|\text{L}_{\text{PU}}(t_{60})| = 6$. Böylece 60'ıncı zaman diliminde $\text{L}_{\text{ASU}}(t_{60})$ listesindeki ASU'lardan biri Spektrum El Değiştirme prosedürü sayesinde başka bir Cell'e geçiş yapmalıdır.

Tablo 9.5. t_{60} zaman aralığında el değişimi oranı ($HR_{\text{ASU}}(t_{60})$)

ASU _{ID}	$\text{L}_{\text{ASU}}(t_{60})$				$HR_{\text{ASU}}(t_{60})$
	RSRP [dBm]	RSRQ [dB]	SINR [dB]	RSSI [dBm]	
ASU ₈	-74	-7	30.00	-64	0.5156
ASU ₃₈	-75	-7	17.80	-64	0.4089
ASU ₃₀	-56	-7	30.00	-63	0.3875
ASU ₂₆	-44	-6	14.40	-63	0.1055
ASU ₇₄	-84	-8	19.80	-70	<u>0.6399</u>
ASU ₅₆	-63	-10	3.0	-79	0.6187
ASU ₉₂	-63	-10	3.0	-79	0.6187
ASU ₁₁₅	-62	-6	30.00	-63	0.3625



Şekil 9.10. PU faaliyet oranına göre spektrum kullanımı

Tablo 9.6, t_{60} 'da ASU listesini ($L_{ASU}(t_{60})$) gösterilmektedir. Toplamda 8 ASU ve her ASU için dört öznitelik değerleri bulunmaktadır. HR_{ASU} 'ya göre uygun ASU seçilmiştir. t_{60} 'deki ASU özelliklerine dayanarak, ASU₇₄ seçilir – RSRP değeri en düşük.

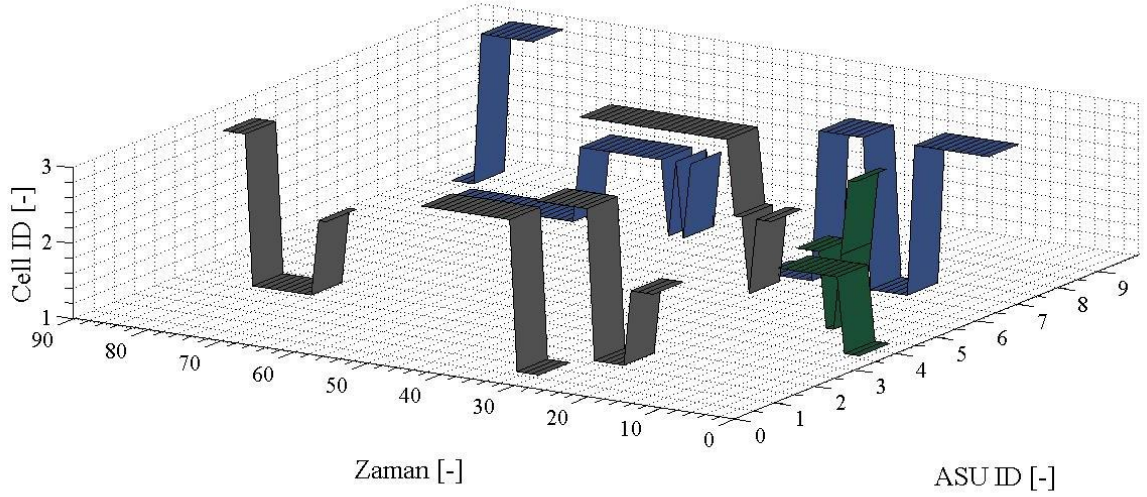
Düşük PU faaliyet oranında (örneğin 0.25) spektrum kullanımına bakarsak, Şekil 9.10-a ve Şekil 9.10-b'de PU faaliyet oranına göre benzer ilerleme gözlemlenmektedir. Son olarak, Şekil 9.11, her bir hücre için Spektrum El Değiştirme mekanizmasını ayrıntılı olarak göstermiştir. Bu senaryoda ASU'ları aşağıdaki gibi kategorilere bölebiliriz:

- ID7, ID8, ID9 (siyah renkle işaretli), Cell 11'de hizmetlerine devam eden grup. Başlangıç koşulları: ASU₇ Cell 11'de, Cell 12'de ASU₈, ve ASU₉ Cell 22'de.
- Yeşil renk ASU'lar, ID4 ve ID5 Cell 12'ye geçmişlerdir.

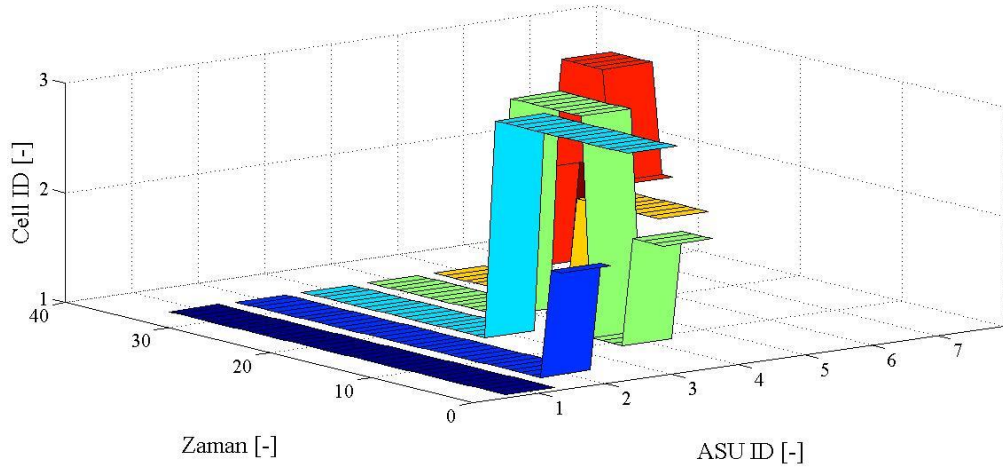
- Gri renkte ASU'lar, ID1 (başlangıçta Cell 11'de bulunur), ID2 (başlangıçta Cell 12'de bulunur), ID3 (başlangıçta Cell 12'de bulunur) ve ID6 (başlangıçta Cell 12'de bulunur) Cell 22'de çalışmalarına devam etmektedirler.

Her bir ASU, farklı zaman aralıklarında servis almaya başlamış ve FSB durumuna dayanarak, başka bir (komşu) hücreye geçiş yapmak zorunda kalmışlardır. Örneği $ASU_{ID(2)}$ t_{20} 'de hizmet almaya başlamıştır. t_{23} 'e kadar Cell 11'de hizmet almış ve t_{28} 'e kadar Cell 12'de hizmet almaya devam etmiş ve tekrar t_{28} 'den t_{37} 'ye kadar Cell 22'de servis almıştır.

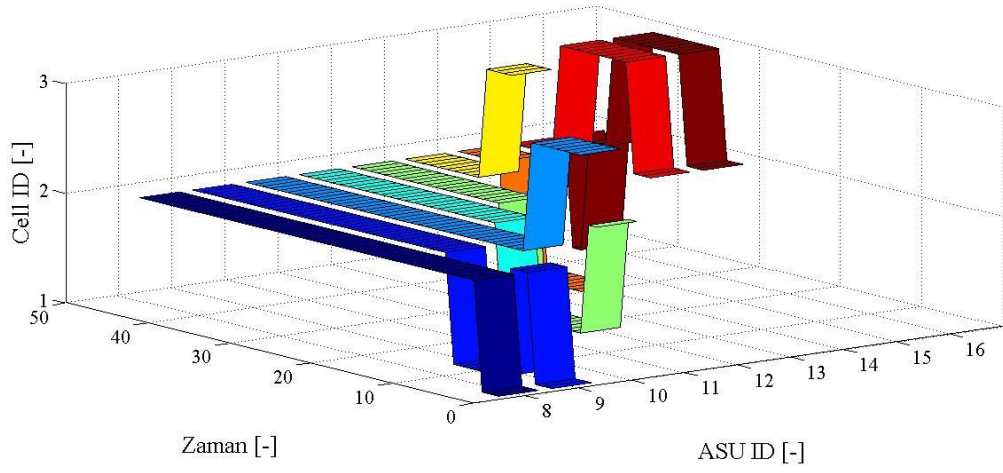
PU'nun faaliyet oranına bağlı olan çeşitli ASU'lar için Spektrum El Değiştirme prosedürü uygulanıyor. Örneğin $ASU_{ID(8)}$ birkaç kez el değiştirmeye maruz kalmıştır. Bu nedenle, spektrum el değiştirme ve sistem verimliliği arasındaki dengeyi korumak adına genel sistem verimliliği ve karmaşıklığı incelenmiştir.



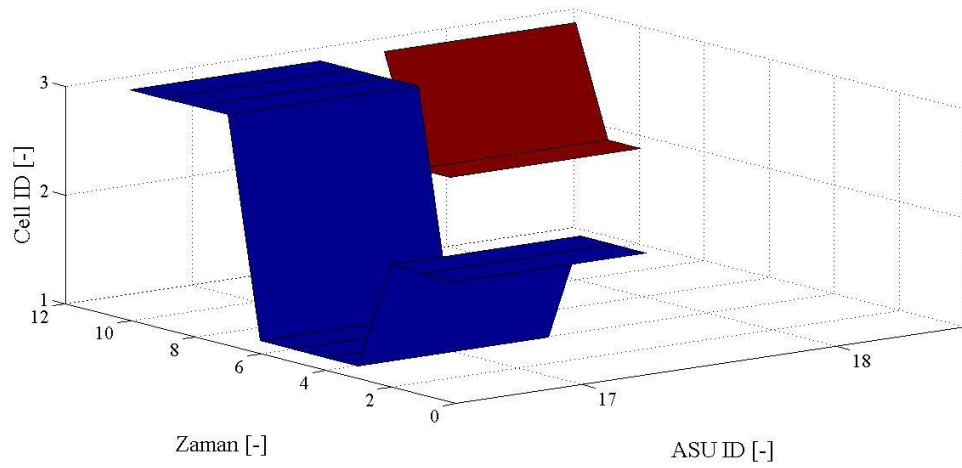
Şekil 9.11. Tüm hücrelerde spektrum kullanımına genel bakış



Şekil 9.12. Cell11'de spektrum kullanımı



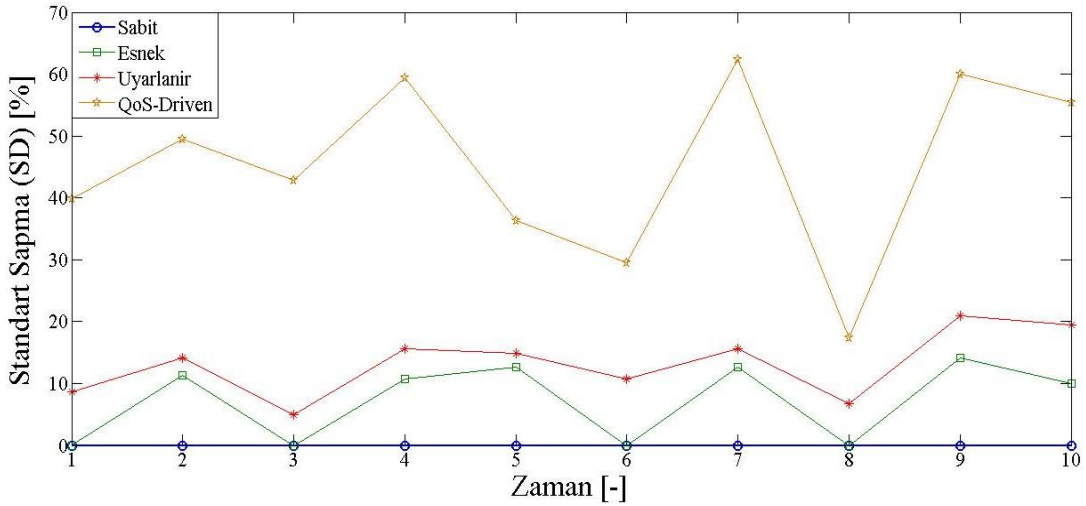
Şekil 9.13. Cell12'de spektrum kullanımı



Şekil 9.14. Cell22'de spektrum kullanımı

Kullanıcı memnuniyeti bakımından Spektrum El Değişirme prosidürüne dayalı, Cell 11, Cell 12 ve Cell 22 için sırasıyla Şekil 9.12, Şekil 9.13 ve Şekil 9.14'de her bir hücredeki spektrum kullanımının kararlılığını göstermektedir. ASU sayısı, PU faaliyet oranına bağlıdır - sabit ve 0.25 olarak ayarlanmıştır. Bu nedenle, zaman aralıklarının çoğunda, ASU'lar el değiştirme gereği duymadan servis almaya devam ederler (özellikle yoğun olmayan saatlerde).

Şekil 9.12, Şekil 9.13 ve Şekil 9.14'de görüldüğü gibi ASU'ların çoğu, servis başlattıkları hücredeki veri iletimlerini sürdürürler veya sadece bir kez el değiştirmişler. Sadece 4, 7, 9, 11, 15, 16 ve 17 no'lu ASU'lar birden fazla kez el değiştirmişler. Bu durum PU faaliyetinin düşük olmasına rağmen ASU'ların yaklaşık %40'ı için gerçekleşmiştir. Bununla birlikte, yoğun PU faaliyet dönemlerinde el değiştirme sayısı ASU'lar için artacaktır. Şekil 9.11'de ASU₈ için meydana gelen sürekli el değiştirme, ASU'ların el değiştirme ve reddetme prosedürü arasındaki dengeyi göz önünde bulundurmaya gerektirmektedir. MNO, ASU özellikleri ve el değiştirme prosedürleri sayısına bağlı olarak ASU'ya farklı Cell'erde servis verebilir veya kullanıcıları reddedebilir.



Şekil 9.15. 10 simülasyon zaman aralığı için farklı fiyatlandırma politikalarının standart sapma (SD) değeri

9.7. Önerilen Farklı Fiyatlandırma Politikalarının Performans Analizi

Bu bölümde IOFCR çerçevesinde QoS-Driven, Sabit, Esnek ve Uyarlanir fiyatlandırma politikalarının performansı hem yoğun ve yoğun olmayan saatlerde ağ geliri

(TNR) ve kalite memnuniyet seviyesi (Quality of Service (QoS Level)- QSL) açısından analiz edilmiştir. Önerilen modelin etkilerini değerlendirmek için, spektrum bandlarının sayısı 100'e ayarlanmıştır ve çerçeve, Matlab'de 20 kez 1000 zaman aralığı (TTL) için çalıştırılmıştır. PU ve RSU faaliyet oranı %15 ve %85 aralığındadır. %85 yoğun saatleri temsil ederken, %15 yoğun olmayan saatleri temsil etmektedir. Simülasyon sonuçları Şekil 9.15, Tablo 9.7, 9.8 ve 9.9 sıra ile ortalama standart sapmayı (SD) ve bazı önemli parametreleri göstermektedir.

Tablo 9.6. PU ve SU faaliyet oranına dayalı TNR

Fiyatlandırma Politikaları		Faaliyet oranına bağlı TNR	
		Yoğun olmayan saatler	Yoğun saatler
IOFCR fiyatlandırma politikaları	Sabit	56500	20200
	Esnek	56500	20200
	Uyarlanır	58740	21242
QoS-Driven		52690	18014

Tablo 9.7. t_{100} 'de ARSU'nun ödeyeceği fiyat

Fiyatlandırma politikaları	Spektrum kullanımı için ödenecek fiyat							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Sabit	100	100	100	100	100	100	100	100
Esnek	80	80	100	100	100	100	120	120
Uyarlanır	106	106	106	106	106	106	106	106
QoS-Driven	121	102	11	30	116	42	104	94

Tablo 9.8. t_{100} 'de ARSUs öznelikleri

ARSUs öznelikleri	t_{100} 'de ARSUs öznelik değerleri							
	1	2	3	4	5	6	7	8
RR	0.32	0.19	0.95	0.86	0.09	0.81	0.29	0.28
Req-BW	1	0.5	0.25	0.25	0.25	1	0.25	0.5
Req-ST	0.356	0.118	0.651	0.634	0.713	0.244	0.559	0.047

Tablo 9.7, yoğun ve yoğun olmayan saatlerde önerilen fiyatlandırma politikalarının TNR'sını sunmuştur. TNR, yoğun olmayan saatlerde yoğun olan saatlerden daha yüksektir. Hem Sabit hem de Esnek fiyatlandırma politikalarında TNR, yoğun ve yoğun olmayan

saatlerde aynı değerlere sahiptirler (Tablo 9.8 bunun nedenini ispatlayacaktır). TNR, QoS-Driven fiyatlandırma politikasında, diğer fiyatlandırma politikalarını aşmadığını göstermektedir. Çünkü QoS-Driven politikasının stratejisi, servis talebinde bulunan kullanıcılar için (ARSU) fiyat hesaplamasında doğrudan belirlenmiş özniteliklere dayanmaktadır. Böylece, ortalama 1000 TTL sırasında, QoS-Driven fiyatlandırma politikasının faydalarını göstermek neredeyse imkansızdır. Önerilen fiyatlandırma politikasını kullanmanın yararı, Tablo 9.8'te ayrıntılarıyla gösterildiği gibi, yüksek QSL RSU'ların elde edilmesi ile uzun vadede kanıtlanacaktır.

Tablo 9.8, bahsedilen dört fiyatlandırma politikasıyla hesaplanan fiyatı t_{100} anında göstermiştir. Sabit fiyatlandırma politikasında, tüm ödeme $P_{base} = 100$ olarak sabittir. Esnek fiyatlandırma politikasında MNO, t_i ve t_{i+1} zamanlarda standart sapma'ya dayalı olarak ARSU'lar arasında dengeyi korur. Bununla birlikte, her zaman anının bitimindeki TNR, hem Sabit hem de Esnek fiyatlandırma politikası için aynı olmuştur. Uyarlanırlı fiyatlandırma politikasında hesaplanan fiyat her zaman anının içerisindeki rezervasyon zamanına göre değişkendir ve t_{100} kısa bir dilim olduğundan dolayı tüm talepler sabit bir fiyat ve 106 olarak hesaplanmıştır. Bu nedenle, yüksek RSU talep oranlarında, Kısa vadede, Uyarlanırlı fiyatlandırma politikasının Sabit bir fiyatlama politikası gibi çalışmaktadır. Son olarak, QoS-Driven fiyatlandırma politikası, t_{100} 'deki ARSU'ların her biri için değişken fiyatları göstermiştir. Daha fazla açıklama için Tablo 9.9, t_{100} 'deki ARSU özniteliklerinin değerini göstermektedir. Örneğin, üçüncü ARSU'nun t_{100} 'deki değerleri sırası ile RR için 0.95, Req-BW için 0.25 ve Req-ST için 0.651 olarak ölçülmüştür. ARSU₃'ün QoS-Driven ile elde edilen fiyatı, Tablo 9.8'te 11 olarak belirlenmiştir ki en düşük fiyata sahip olan kullanıcıdır. Bunun nedeni ise, ARSU₃ neredeyse %95 RR'ye sahiptir ve bu durumda MNO, en düşük fiyat ödemesiyle yüksek QSL elde etmek için bu kullanıcıdan düşük bir ücret almaktadır. Öte yandan, ARSU₁ tüm fiyatlandırma politikaları arasında QoS-Driven politikası ile maksimum fiyat yani 121 ödemek zorundadır. Benzer şekilde, ARSU₁ %32 RR'ye sahiptir ve diğer ARSU'lara kıyaslandığında neredeyse yüksek bantgenişliği talep ediyor. Bu durumda, MNO, yüksek TNR için en yüksek fiyatı tahsil edecektir. Sonuç olarak MNO, her bir ARSU için uygun fiyat belirlemede TNR ve QSL arasında denge sağlamaktadır.

Son olarak, Şekil 9.15, adı geçen dört fiyatlandırma politikalarının standart sapma (SD) değerini, 10 zaman aralığında sunmaktadır. Sabit fiyatlandırma politikasının SD'si, tüm zaman aralıklarında sabit olduğu için 0'dır. QoS-Driven politikası, fiyatların ARSU özniteliklerine dayanan değişkenliğini kanıtlayarak en yüksek SD'ye sahiptir.

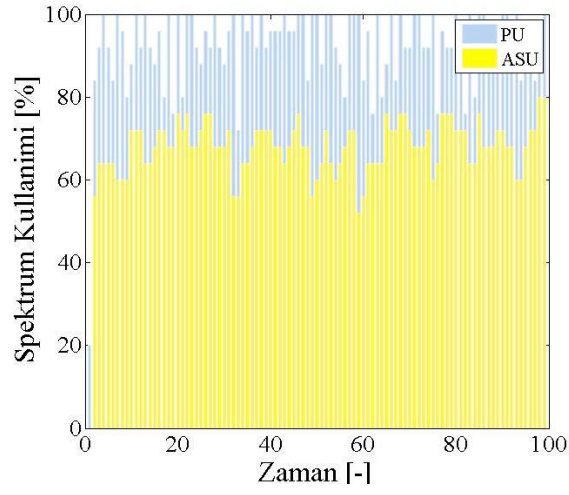
9.8. QoS-Driven, Esnek ve Uyarlanı Fiyatlandırma Politikalarının SCP'e Karşı Performans Analizi

Bu bölümde, spektrum kullanımını ve RSU'ların ödeyecekleri fiyat Esnek (Fixed Pricing -FP), Uyarlanı (Adaptive Pricing -AP), QoS-Driven (QoS-DP) ve Subscriber Class based (SCP) [55] fiyatlandırma politikaları ile verilmiştir. BUT 3GPP LTE-A sisteminde elde edilen veri seti kullanılmıştır.

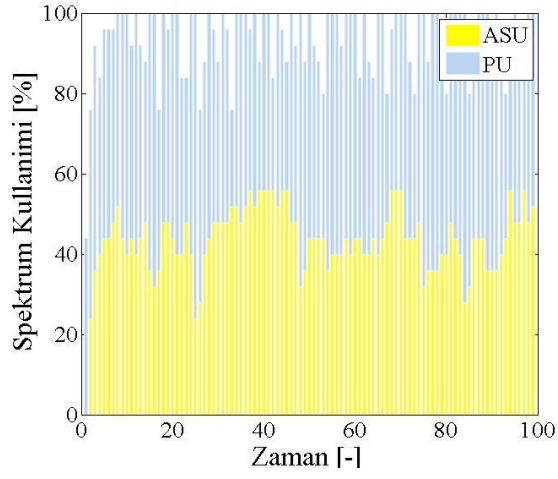
RB = 25 olduğu için, MNO, $N_{assd}(B)$, RB'nin 0.45, yani 11, $N_{assd}(S)$ RB'nin 0.35, yani 9 ve $N_{assd}(G)$ RB'nin 0.2, yani 5 olduğu varsayılmaktadır. PU faaliyet oranı düşükten yükseğe doğru ilerlemektedir [0.25; 0.5; 0.75]. Politikalar arasında daha gerçekçi bir karşılaştırma yapmak için, P_{base} değeri SCP fiyatlandırma politikasındaki [55] p_{fixedj} 'in ortalama değeri yani 5 [μ / RB] olarak ayarlanmıştır.

Şekil 9.16'deki veriler, spektrum kullanımını her bir zaman aralığında 10 simülasyon periyodu için göstermektedir. Elde edilen sonuçlar PU faaliyet oranına bağlıdır. Şekil 9.16(a), düşük trafik oranlarında (TL), RSU kabul oranının yüksek olduğunu göstermektedir ki bu durumda TNR yüksek olacak. Bu durumu ispatlamak için ARSU durumu 10 simülasyon aralığında ayrıntılı bir şekilde gösterilmiştir. Oluşturulan simülasyon senaryosunu çalıştırdıktan sonra kaç RSU kabul edildiği Şekil 9.18 ile gösterilmektedir. Sırasıyla, Şekil 9.17(a), Şekil 9.17(b) ve 9.17(c)'de ARSU sayısını 24, 19 ve 9 olarak belirlemiştir.

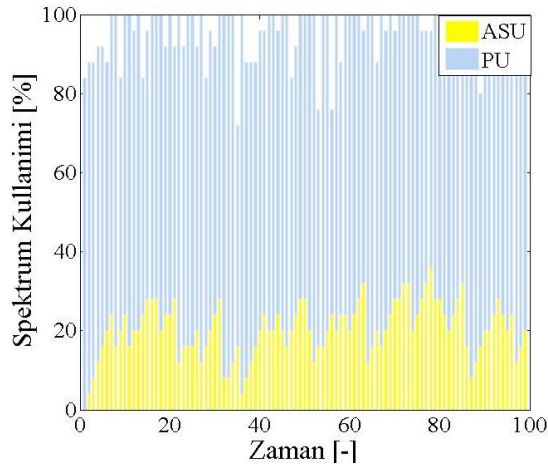
Öte yandan, Şekil 9.17 ARSU'lar tarafından ödenmesi gereken fiyatı dört farklı fiyatlandırma stratejisi ile gösterilmektedir. Şekil 9.17(a), 9.17(b) ve 9.17(c)'de maksimum fiyat, SCP fiyatlandırma politikasına aittir.



(a)

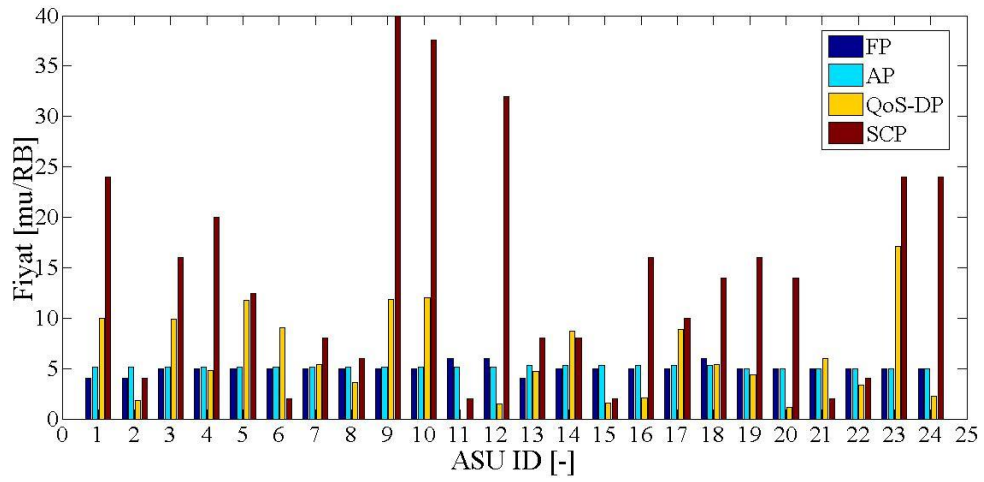


(b)

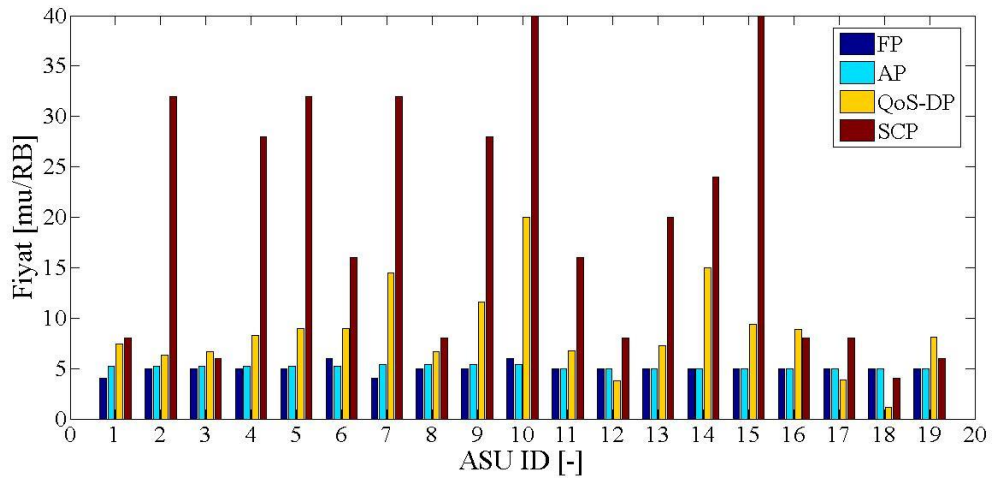


(c)

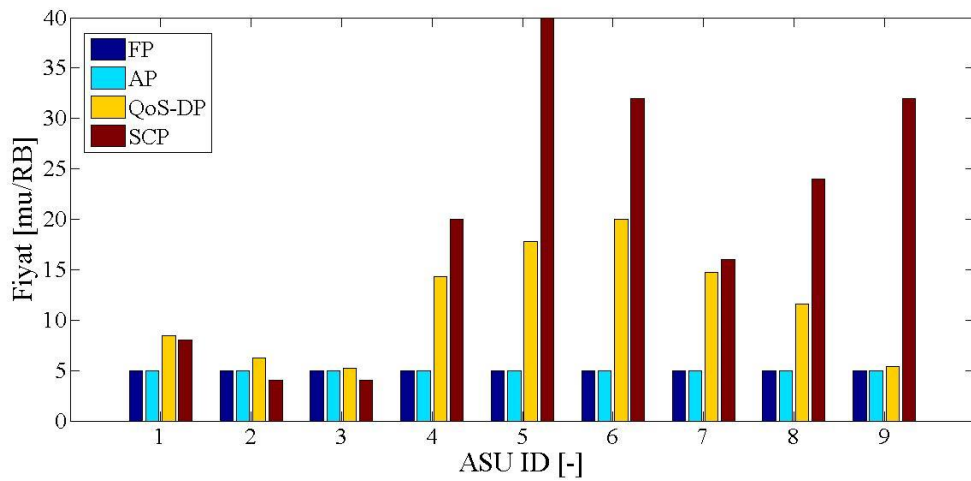
Şekil 9.16. PU ve ASU faaliyet oranına bağlı spektrum kullanımı



(a)



(b)



(c)

Şekil 9.17. Dört farklı fiyatlama politikası ile fiyat hesaplaması

FP ve AP, simülasyon periyodu kısa olduğundan ve talep süresi AP tarafından hesaplanan fiyatı etkilemediğinden dolayı aynı sonuçları yani yaklaşık 5'i göstermektedirler. Öte yandan, QoS-DP, kullanıcıları çeşitli sınıflarda sınıflandırdığından ve daha yüksek trafik yoğunluğu (TL) olduğunda bile RSU özniteliklerine dayalı olduğu için daha fazla esneklik göstermektedir.

Tablo 9.9. PU faaliyet oranına göre TNR

PU Faaliyet oranı	Fiyatlandırma Politikaları			
	Esnek Fiyatlandırma (FP)	Uyarlanır Fiyatlandırma (AP)	Subscriber Class based Fiyatlandırma (SCP)	Proposed QoS-Driven Fiyatlandırma (QoS-DP)
Düşük	140	143.41	172.69	390
Normal	95	97.86	163.42	364
Yüksek	45	45	103.71	180

Son olarak, Tablo 9.10 FP, AP, SCP ve QoS-DP için TNR'yi üç farklı PU faaliyet oranı için göstermektedir. Maksimum değer SCP ile ilgilidir. SCP, TNR'yi artırmasına rağmen, B tipi kullanıcıdan düşük TL'de bile daha yüksek bir fiyat elde ettiği için SU'ları memnun etmemektedir. Bu sebepten dolayı uzun vadeli periyodlarda TNR'da bariz bir düşüş görünecektir.

9.9. MNO Kararına Dayalı Uygun ASU'yu Reddetme Fonksiyonunun Performans Analizi

Bu bölümde önerilen sistem modeli BUT 3GPP LTE-A sisteminden elde edilen veriler ile değerlendirilmiştir. Kullanılan simülasyon parametrelerinin listesi Tablo 9.11'de gösterilmektedir.

Bu çalışmada, PU ve RSU faaliyet oranı 0.25 ve 0.75 olarak yoğun olmayan ve yoğun olan saatler için varsayılmıştır. LTE-A sistemine göre, hareketlilik yönü "1" ve "2" olarak gösterilir, burada "1" bas stasyonuna doğru olan yönü, "2" ise ters yönü temsil etmiştir. Temel fiyat $p = 500$ olarak belirlenmiştir. Simülasyon sonuçları, spektrum kullanma oranını ve ASU reddetme prosedürünü 9.9.1 ve 9.9.2'de açıklamaktadır.

Tablo 9.10. Simülasyon Parametreleri

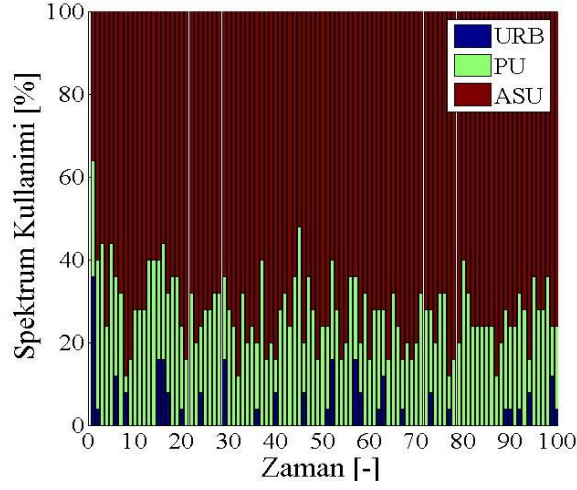
Parameterler	Parametere değerleri
Simülasyon Süresi	[100] s
Spektrum bandı sayısı	[25] RB
PU faaliyet oranı	[0.25 0.75] %
RSU faaliyet oranı	[0.25 0.75]%
RSSI	[-100 -30] dBm
Hareket yönü	[1 2]
Bit Rate	[1 33] Mbit/s
Upload Download Ratio	[0.01 1]

9.9.1. Kullanıcı Faaliyet Oranına Dayalı Spektrum Kullanım Oranı

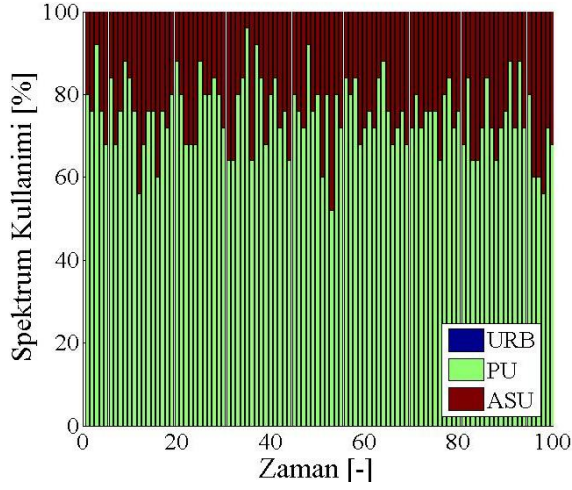
Şekil 9.18(a)'da görüldüğü gibi, RSU'ların çoğu ASU olarak servis almaktadır. Bununla birlikte, belirli zaman aralıklarında yinede boş spektrum bandlar görünmektedir. Yoğun saatlerde (Şekil 9.18(b)), spektrum bandların neredeyse %75'i PU'lara aittir. Bu durumda, boş spektrum bandların bulunmadığının yanı sıra, reddedilen ASU'larada rastlanmıştır.

Simülasyon sürecinde zaman ilerledikçe, her bir ASU'nun durumu FASU, veya RASU olarak değiştirilecek ya da ASU olarak hizmet almaya devam edecektir. Başka bir deyişle, bazı ASU'lar hizmet almayı sonlandıracak (FASU) ve bazı ASU'lar $0 \leq \text{URB}(t_i) \leq |\text{L}_{\text{PU}}(t_i)|$ duruma göre reddedilecektir. Simülasyon sonuçları, yoğun olmayan ve yoğun olan saatler için Tablo 9.12'te detaylandırılmıştır.

Yoğun olmayan saatlerde (622) RSU sayısı, yoğun olan saatlere (1878) göre düşüktür. Ayrıca, RSU'ların yoğun olmayan saatlerde %57.39'u ve yoğun olan saatlerde ise yaklaşık %8.87'lik bir oranda ASU olarak servis almaya başlamıştır. Daha sonra, yoğun saatlerde (%49.39) RASU sayısı, toplam ağ gelirini (TNR) yoğun olmayan saatlere göre daha fazla etkilemiştir. Bununla birlikte, yoğun olmayan saatlerde, ASU'ların %89.91'i veri iletimini başarıyla tamamlamaktadır (FASU = 321) ve ASU'ların %4.76'sı reddedilmiştir.



(a)

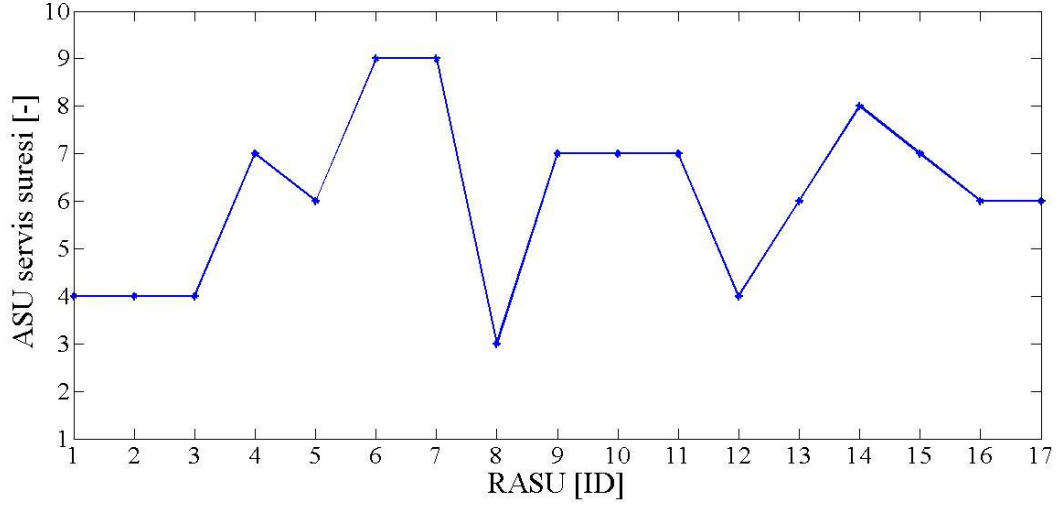


(b)

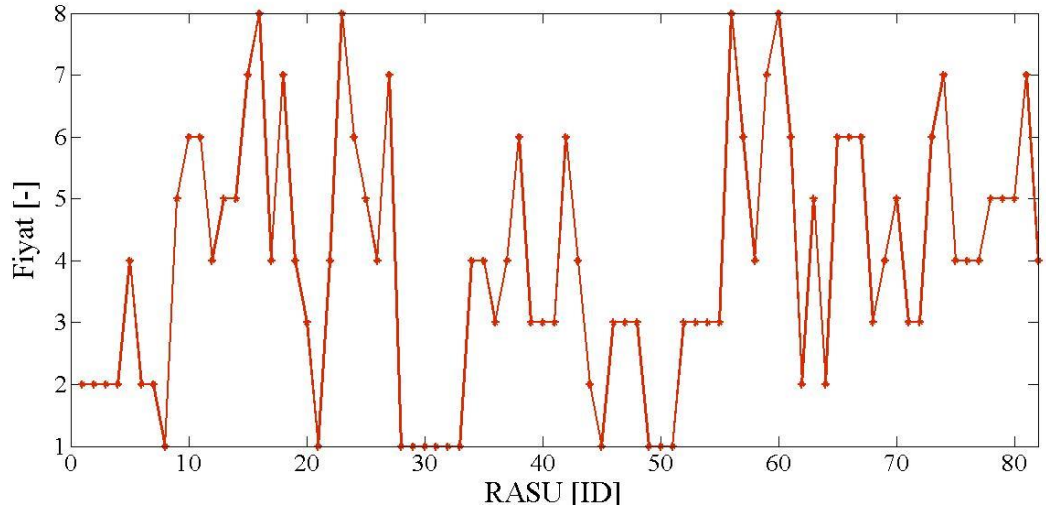
Şekil 9.18. Yoğun olmayan ve yoğun olan saatlerde spektrum kullanımı

Tablo 9.11. Yoğun olan ve yoğun olmayan saatlere göre kullanıcı sayısı

Parametreler	Parametre değerleri	
	Yoğun olmayan saatler	Yoğun olan saatler
Toplam RSU sayısı	622	1878
Toplam ASU sayısı	357 (57.39 %)	166 (8.86 %)
Toplam FASU sayısı	321 (89.91 %)	76 (45.78 %)
Toplam RASU sayısı	17 (4.76 %)	82 (49.39 %)
Geriye kalan ASU sayısı	19 (5.32 %)	8 (4.82 %)
TNR	147603	78532



(a)



(b)

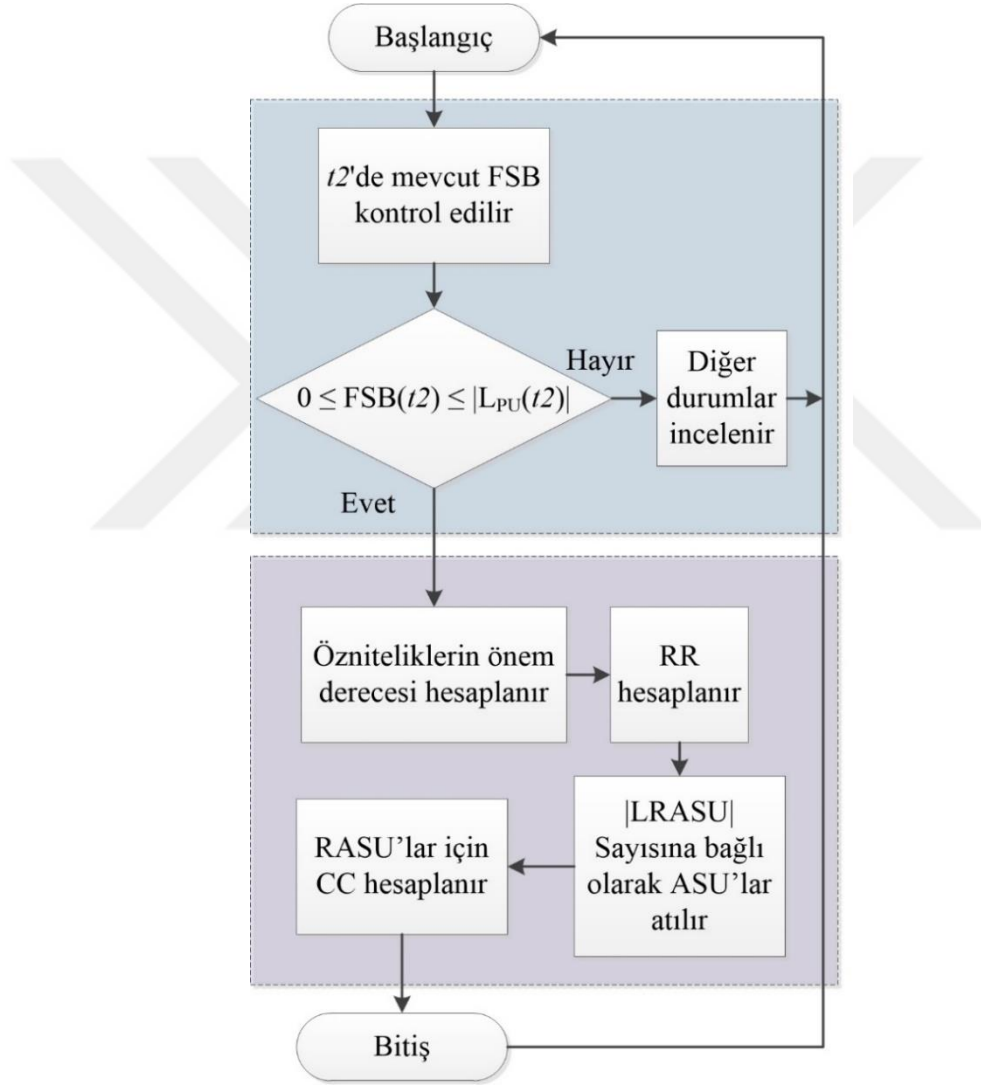
Şekil 9.19. ASU'ların servis süresi ve bir sonraki hizmet talebinde ödeyecekleri fiyat

Tablo 9.12, yoğun olmayan ve yoğun olan saatlerde toplam RASU sayısını 82 ve 17 olarak göstermiştir. Şekil 9.19, ağ içerisindeki ASU'ların elenmeden önceye kadar faaliyetini (Şekil 9.19(a)) ve RASU'ların gelecek seferde hizmet talebinde bulduklarında ödeyecekleri fiyatı göstermektedir (Şekil 9.19(b)). Elde edilen sonuçlar aynı Ortalama Hizmet Süresine (AvrST) sahip ASU'lar için bile farklıdır. Örneğin, AvrST (ASU6) ve AvrST (ASU7) 9 zaman aralığı olarak belirlenirken tahmini hesaplanan fiyatlar farklıdır (ASU6 = 334.083; ASU7 = 320.629). Bu durum, önerilen modelde CC hesaplanırken AvrST

haricinde farklı özniteliklerin önemini açıkça göstermektedir. Bölüm 9.9.2 önerilen modelin performans analizini incelemiştir.

9.9.2. ASU Reddedilme Fonksiyonunun Performans Analizi

Bu bölümde, yeterli boş spektrum bandı olmadığında uygun ASU'ların reddedilmesi analiz edilmiştir.



Şekil 9.20. Hizmet alan kullanıcıların seçim fonksiyonselliği

Şekil 9.20, LSA bandı kullanılabilirliği fonksiyonselliği ve karar temelli reddetme fonksiyonselliği gibi iki ana fonksiyonsellik vasıtasıyla adım adım hizmet alan kullanıcıların seçim fonksiyonselliğini göstermektedir. Bu senaryoda ikinci zaman anı (t_2) incelenmiştir.

MNO ilk başta LSA bandının kullanılabilirliğini t_2 'de kontrol ederek RASU'ların sayısı $|L_{RASU}(t_2)|=2$ elde etmiştir. Bir sonraki adımda, ASU öznitelikleri ve AHP'de her öznitelik için önem derecesi hesaplanmıştır. Önerilen modelde, MNO 6 ASU özniteliğini dikkate almıştır.

Tablo 9.12. AHP metoduna göre özniteliklerin önem derecesi

AHP parametreleri	Kullanıcı öznitelikleri					
	BR	RH	RSSI	AvrST	DUR	MD
MNO tarafından belirlenen öznitelik önem sıraları	5	3	2	1	6	4
AHP yöntemine dayalı öznitelik ağırlıkları	0.0573	0.2005	0.2526	0.3460	0.0422	0.1010

Önem dereceleri Tablo 9.13'de verilmiştir. Daha sonra, MNO Tablo 9.14'deki parametrelerin değerlerini kullanarak, t_2 'deki ASU'ların durumuna dayanarak RR'yi hesaplamıştır. Ortalama hizmet süresi olan AvrST, MNO ve Kullanıcı için en önemli özniteliktir ve bu yüzden, önceliği yüksektir. Ardından, RSSI ikinci önemli öznitelik, üçüncü olarak kullanıcının reddedilme oranı RH, ve hareket modeli MD dördüncü önem derecesine sahiptir. Son olarak, bit hızı BR ve yükleme oranı DUR neredeyse aynı önem derecesine sahiptir.

Tablo 9.14'de, tüm ASU'lar için AvrST parametresi 1'dir. Bu nedenle, yalnızca bu özniteliğe dayanan politikalar ASU'lar arasındaki karşılaştırmayı yerine getiremezler. Daha sonra, ikinci önemli öznitelik RSSI'dur. RSSI nedeniyle reddedilen iki aday ASU sırasıyla en düşük RSSI -82 ve -78 ile ID'si 5 ve 3 olan ASU'lar olacaktır. Bir sonraki önemli öznitelik, reddedilme oranının en düşük olduğu ASU'lar yani ID'si 4 ve 1 olan ASU'ların aday olduğu RH'lerdir. Bununla birlikte, MD'yi göz önüne alarak, reddedilen ASU'lar 1 ve 2 ID'ye sahip olan ASU'lardır. Bundan sonra BR değeri dikkate alınacak ve bu öznitelik 1 ve 5 ID'leri olan ASU'ların reddedileceğini öngörmektedir.

Tablo 9.13. t_2 'de ASU listesi ve öznitelikleri

Parametreler	$L_{ASU}(t_2)$					
ASU_ID	1	2	3	4	5	6
Kalan servis süresi	7	12	3	42	7	30
Spektrum fiyatı	468.5535	380.5031	402.5157	474.8428	427.673	391.5094
RSSI	-66	-71	-78	-31	-82	-60
Hizmet süresi	1	1	1	1	1	1
İndirme/ yükleme oranı	36	32	1	67	89	43
Hareket yönü	2	2	1	1	1	1
Bit oranı	33	6	17	21	27	14
Kullanıcı red geçmişi	0.2	0.76	0.62	0.16	0.46	0.69

Son olarak, DUR için t_2 'de maksimum yükleme oranı olan 4 ve 5 ID'li ASU'lar seçilmektedir. İlgili bilgiler elde edindikten sonra, MNO, hangi kullanıcıyı red etsin diye tüm özniteliklere bağlı olarak toplam en çok tekrar edilen ID'ye ve $|L_{RASU}(t_2)|$ göre sırası ile 2 tane ASU'yu red etmelidir. t_2 'de en çok tekrarlanan ASU ID'ler 1 ve 5 olarak belirlenmiştir. Ayrıca, Tablo 9.14'de görüldüğü gibi, ARSU'lar tarafından LSA bandını kullanmak için ödenilen fiyat, ret oranına (RR) ve tazminat bedeline (CC) bağlıdır. Bu değişken fiyatlar hem MNO hem de kullanıcıları tatmin edecektir. Böylece, RASU'lar için CC, 0.24 ve 0.21 olarak hesaplanmıştır.

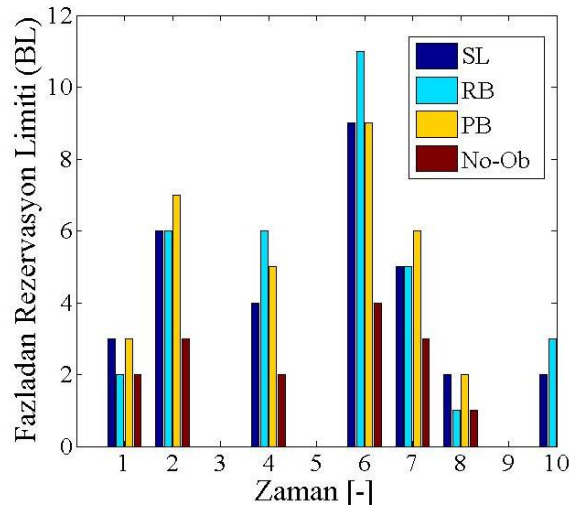
Tablo 9.14. t_2 'de servis dışı olacak ASU'lerin sıralaması

Parametreler	Parametre değerleri					
RR	0.86084	0.640409	0.645008	0.673629	0.857106	0.601851
Red sıralaması	1	5	4	3	2	6

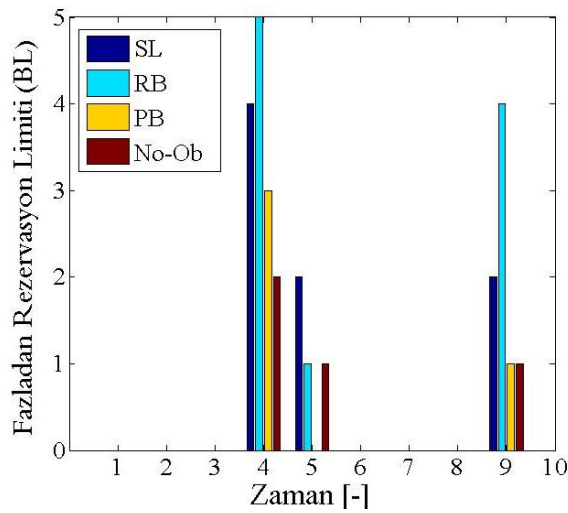
Tablo 9.15, ASU'lerin RR ve reddedilen sırasını göstermektedir. Sonuç olarak, önerilen model tüm olasılıkları dengeleyebilen ve ağ performansını ve kullanıcı memnuniyetini arttıran bir fonksiyon olarak gözükmektedir.

9.10. Fazladan Rezervasyon Sınırı ve Gelir Performans Analizi

Bu bölümde önerilen modelin yoğun olan ve yoğun olmayan saatlerindeki performansı PU ve SU faaliyet oranına göre analiz edilmiştir. Başlangıçta, $PU_{UsageRate} = 0.25$ ile yoğun olmayan saatler varsayılmıştır. Simülasyonda toplam zaman aralığı ağ performansını daha ayrıntılı gözlemlemek için 10 olarak ayarlanmıştır. Spektrum kapasitesi ile, ağ kapasitesi kısıtlamalarını temsil etmek için 50'ye ayarlanmıştır. Diğer sistem parametreleri sürekli değişmekte ve her t_i 'de ölçülmektedir.



Şekil 9.21. Yoğun olmayan saatlerde fazladan rezervasyon sınır tahsisi



Şekil 9.22. Yoğunluğun fazla olduğu saatlerde fazladan rezervasyon sınır tahsisi

Şekil 9.21 rezervasyon sınırını 10 zaman aralığında göstermektedir. Görüldüğü gibi RSU'lar ve PU'ların dağıtımı ve tabii ki FSB'lerin durumu, yoğun olmayan saatlerde düşük trafiği göstermektedir. Simülasyon sonuçlarına göre $[t_1 t_{10}]$ zaman anında FSB sayısı, $[2, 3, 0, 2, 0, 4, 3, 1, 0, 1]$ şeklindedir. No-Overbooking politikasının rezervasyon sınırı FSB sayısı ile aynıdır. t_5 zaman diliminde boş spektrum bandı olmadığından dolayı, önerilen yöntemde fazladan rezervasyon politikası, CC'yi önlemek için herhangi bir fazladan rezervasyon sınırı tahsis etmemektedir.

Şekil 9.22'de yoğun olan saatler dikkate alınmıştır, $PU_{UsageRate}=0.75$. Önerilen yöntemde dört farklı durum değerlendirilmesi yapılmıştır. Şekil 9.22'teki bilgilere istinaden tüm politikaların maksimum fazladan rezervasyon sınırını gösteren t_4 zaman dilimini göz önünde bulunmuştur. No-Overbooking rezervasyon politikasına göre FSB sayısı ikidir. Bu nedenle, Risk-Based politikasının üç tane fazladan spektrum bandı göz önünde bulundurarak, fazladan rezervasyon sınırı beş olur. Simülasyona göre $|L_{RSU}(t_4)| = 7$ olduğu için, beş RSU, RB politikasıyla FIFO'ya dayalı olarak kabul edilir; RSU'ların dördü SL politikası ve üçü de PB politikası tarafından kabul edilir. Bu nedenle, t_4 'teki en yüksek toplam gelir, RB politikasına aittir. Sorun şu ki, PU'ların faaliyet oranının yükselme ihtimali olduğunda MNO, ASU'ları servis dışı bırakmak zorundadır. Buna istinaden, servis dışı bıraktığı her bir ASU için CC ödemek zorundadır. Bu sorunu çözmek adına dinamik fazladan sınır tahsisi ile beraber uygun fiyatlandırma politikaları devreye girer. Bu da fiyat ile CC arasında dengeyi koruyacak ve toplam zaman aralığının sonunda uygun toplam gelir elde etmesini sağlayacaktır.

9.11. Ön Rezervasyon Yönetim Sisteminin (PRMS) Performans Analizi

Bölüm 10'da önerilen sistem modelini değerlendirmek için, BUT simülasyon parametreleri ve verileri kullanılmıştır. Ön Rezervasyon Yönetim Sisteminde (PRMS) kullanılan simülasyon parametrelerinin listesi Tablo9.11'de sunulmuştur. $P_b = 100$ mu/SB ve toplam kanal sayısını 100 olarak ayarlanmıştır ($\phi = 100$).

Bu bölümde, önerilen modelin performansı, spektrum kullanımı, PRSU'nun kabul oranı, N-PRSU'nun PRSU'ya oranı, R-PRSU'nun PRSU'ya oranı, ASU olarak servis alan PRSU oranı ve ağın toplam net geliri (TNR) yoğun olmayan ve en yoğun saatlerde gösterilmektedir. Önerilen modelin TNR'si tüm fiyatlandırma politikaları ile karşılaştırılmıştır. Tüm ASU faaliyetlerinin simülasyon süresinin sonunda tamamlanması

gerektiği varsayılmaktadır. MNO, RSU öznitelliklerini ve önceliklerini fiyatlandırma ve ret prosedürleri için belirlemiştir.

Tablo 9.15. RSU fiyatlandırma öznitellikleri için çift-bazlı karşılaştırma matrisi

Kullanıcı Öznitellikleri	ST_{Req}	UH	WT
ST_{Req}	1	(1/3, 1/2, 4, 6)	(2, 1/2, 3, 5)
UH	(3,2,1/4, 1/6)	1	(2, 2, 1/2, 2)
WT	(1/2, 2, 1/3, 1/5)	(1/2, 1/2, 2, 1/2)	1

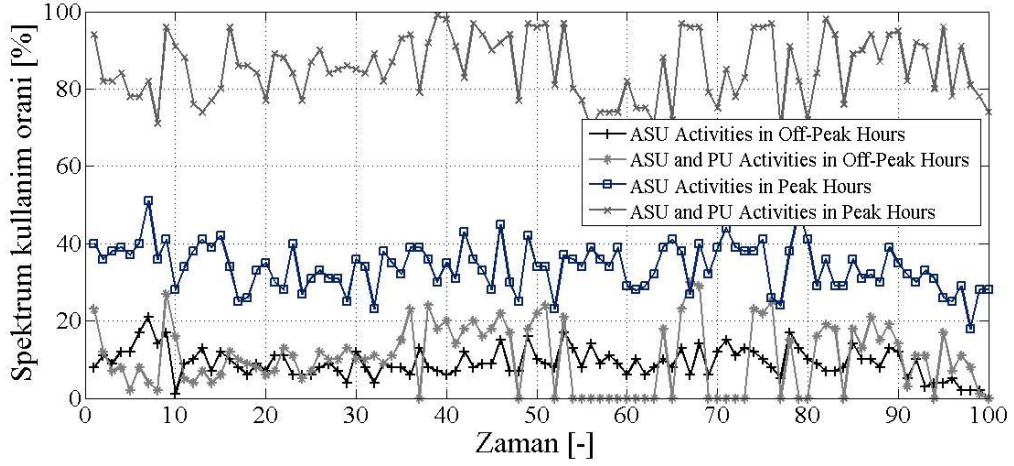
Tablo 9.16. RSU fiyatlandırma öznitellikleri için ağırlık değerleri

Ağırlık		w_{RTI}	w_{UH}	w_{WT}
Ağ durumu	$CB > TH_B$ & $TL \geq TH_T$ (1'inci durum)	0.263074	0.547216	0.189710
	$CB > TH_B$ & $TL < TH_T$ (2'inci durum)	0.195800	0.493386	0.310814
	$CB \leq TH_B$ & $TL < TH_T$ (3'üncü durum)	0.625013	0.136500	0.238487
	$CB \leq TH_B$ & $TL \geq TH_T$ (4'üncü durum)	0.728584	0.162580	0.108836

Tablo 9.17. Dört farklı ağ durumlarında tutarlılık oranı (CoR)

Ağ durumu	1'inci durum	2'inci durum	3'üncü durum	4'üncü durum
Tutarlılık Oranı (CoR)	0.08	0.03	0.01	0.05

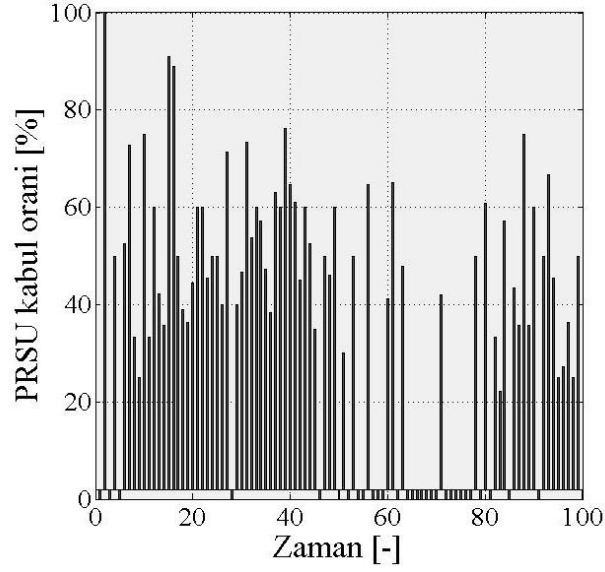
Fiyatlandırma prosedürüne ilişkin Tablo 9.16, RSU fiyatlandırma öznitellikleri için çift-bazlı karşılaştırma matrisini göstermektedir ve bu öznitellikler için ağırlıklar Tablo 9.17'de sunulmuştur. Öznitelliklerin önceliği, ağ'ın yoğunluk durumuna göre ayarlanır. Son olarak, tutarlılık oranı (CoR) kontrol edilmiştir (Tablo 9.18). Reddetme prosedüründe kullanılan tüm ASU öznitelliklerinin önem derecesi fiyatlandırma prosedüründe kullanılan önem dereceleri ile aynıdır. Önerilen senaryoda MNO, ağ'ın durumu ile RSU öznitellikleri arasında bir denge kurmaktadır. Örneğin, Bölüm 10.1.4.2'de açıklanan 1'inci durumda, TL yüksek olsa bile, w_{UH} diğer öznitelik ağırlıklarından daha yüksektir. Reddedilme oranının hesaplanmasında yüksek UH 'e sahip kullanıcıların önceliği, CB 'nin yüksek olması nedeniyle P_{SB} hesaplamasında da önemli bir etkiye sahiptir.



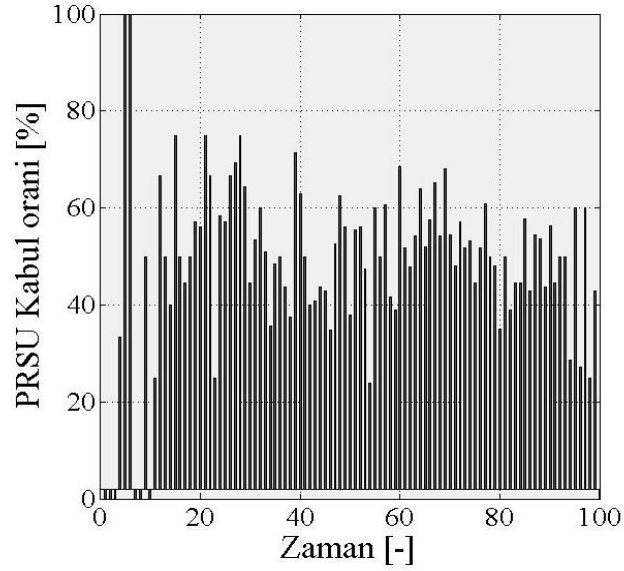
Şekil 9.23. ASU ve PU faaliyet oranına dayanarak spektrum kullanım oranı

Şekil 9.23, yoğun olmayan ve yoğun olan saatlerde spektrum kullanma oranını göstermektedir. Yoğun olmayan saatlerde, düşük PU faaliyetininin dolaylı ($PU_{ActivityRatio} = 0,25$) sonuçlarda pek bir fark gözükmemektedir. Öte yandan, yoğunluğun fazla olduğu saatlerde kullanıcı faaliyetleri arasında belirgin bir fark vardır. Spektrum kullanımını yoğun saatlerde neredeyse %100, ki bu oranın neredeyse %30'u ASU'lerle ilişkili olduğu gözlenmektedir. Böylece, $PU_{ActivityRatio}=0,75$ olduğunda ASU'ların çoğu reddedilmektedir. Paralel olarak MNO, yüksek bir ağ performansı ve QoE elde etmek için doğru ASU'lar servis dışı olmalıdır. Bu nedenle, ağın PRSU'larının ve TNR'nin kabul oranına bağlı olarak yoğun olan ve yoğun olmayan saatler arasındaki farkları göstermek için, $PU_{ActivityRatio}=0,25$, ve $RSU_{ActivityRatio}$, yoğun olan ve yoğun olmayan saatlerde sırasıyla 0,25 ve 0,75 olarak kabul edilmiştir.

Şekil 9.24 ve Şekil 9.25, yoğun olan ve yoğun olmayan saatlerine göre PRSU'ların kabul oranını göstermektedir. Şekil 9.24'da, %0 kabul oranına sahip bazı zaman aralıkları vardır; bu, PRSU tarafından herhangi bir FSB talebi olmadığı anlamına gelir veya FSB'lerin tümü, PU'lar ve IRSU'lar tarafından kullanılmaktadır. Benzer şekilde, Şekil 9.25'de simülasyon süresinin başlangıcında kabul oranı %0'iken, %100 olan bazı zaman aralıkları vardır. Kabul oranı %100, yüksek kullanıcı faaliyetleri anlamına gelirken, herhangi bir FSB talebinin eksikliği veya spektrumun PU'lar ve IRSU'lar tarafından eksiksiz bir şekilde kullanılması, kabul oranının %0 olması ile doğrudan ilişkilidir. Ortalama olarak, PRSU'nun %45'i farklı zaman dilimlerinde kabul edilmektedir.

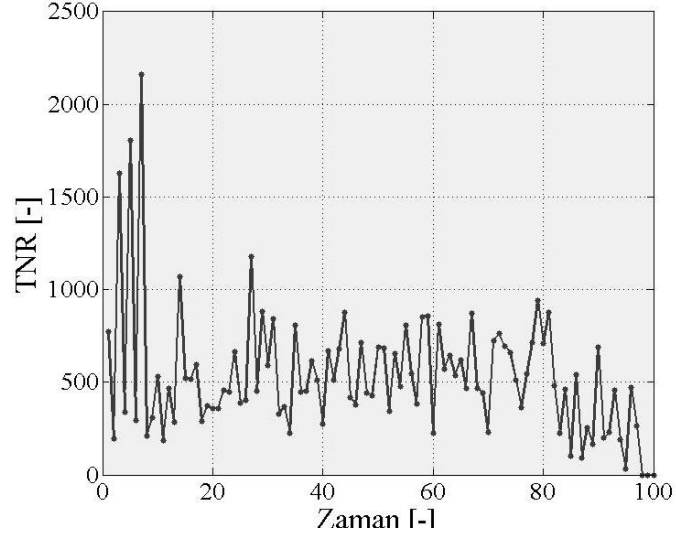


Şekil 9.24. Yoğun olmayan saatlerde PRSU kabul oranı

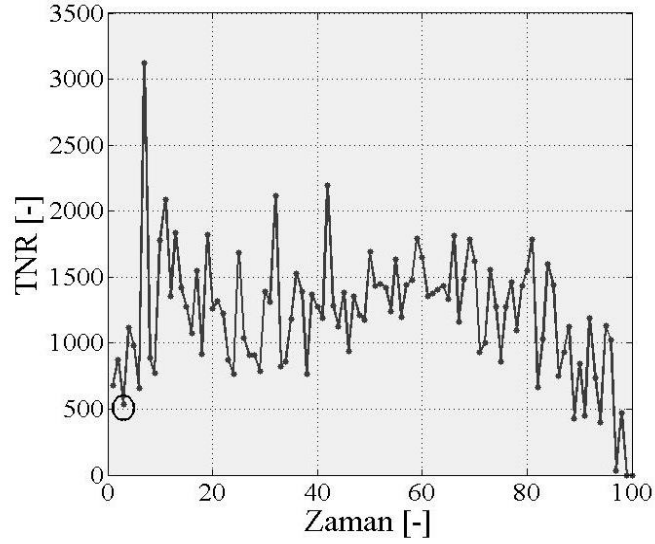


Şekil 9.25. Yoğun olan saatlerde PRSU kabul oranı

PRMS, IOFCR ve SCP yöntemleri için ayrı ayrı her zaman aralığının TNR'ları sırasıyla Şekil 9.26, 9.27, 9.28, 9.29, 9.30 ve 9.31'de verilmiştir. Aynı zamanda, üç farklı modelin TNR'larını daha spesifik olarak karşılaştırmak adına, kullanıcıların sayısı aynı olan bir zaman dilimi seçilmiştir. Bu zaman dilimleri Şekil 9.32'de detaylandırılmıştır.

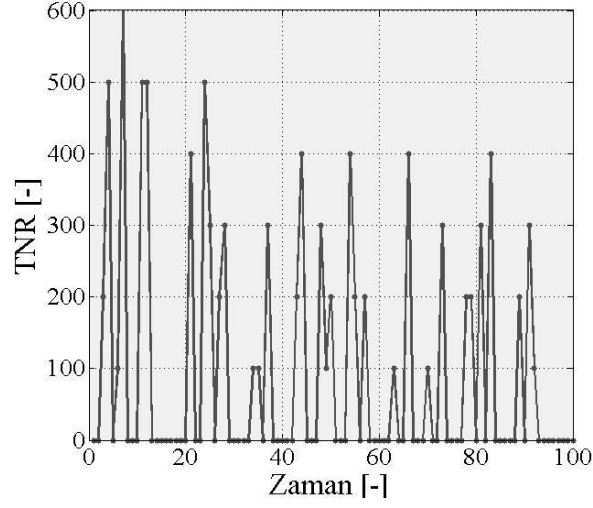


Şekil 9.26. Ön Rezervasyon yönteminde (PRMS) yoğun olmayan saatlerde zaman dilimine dayalı TNR

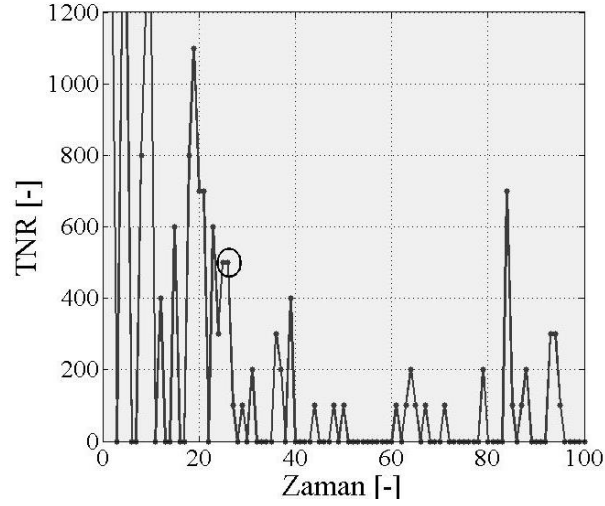


Şekil 9.27. Ön Rezervasyon yönteminde (PRMS) yoğun olan saatlerde zaman dilimine dayalı TNR

TNR'deki dalgalanmalar doğrudan PRSU kabul oranı için belirtilen nedenlerle ilgilidir. Ayrıca reddedilen ASU'lar için CC ödenmektedir. Şekil 9.27'de, t_3 'te toplam beş kullanıcı bulunan Şekil 9.32'de daha ayrıntılı olarak detaylandırılmıştır. Bu gelir, iki tür kullanıcıdan elde edildiğinden, TNR yaklaşık IRSU ve PRSU için 510.

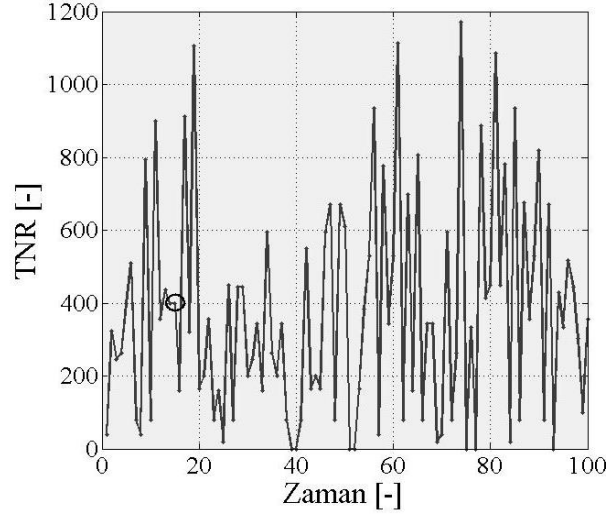


Şekil 9.28. IOFCR yönteminde yoğun olmayan saatlerde zaman dilimine dayalı TNR

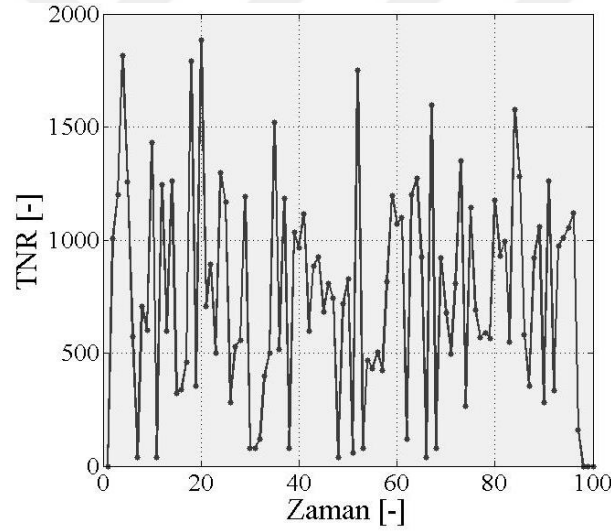


Şekil 9.29. IOFCR yönteminde yoğun olan saatlerde zaman dilimine dayalı TNR

Önerilen yöntemin TNR'usunun karşılaştırılması ile ilgili olarak, Şekil 9.28, 9.29, 9.30 ve 9.31, sırasıyla yoğun olmayan ve yoğun olan saatlerde Esnek fiyatlandırma politikası ve SCP için gösterilmektedir. Daha gerçekçi bir karşılaştırma yapmak için IOFCR'deki fazladan rezervasyon sınırı, en düşük değere ayarlanır (Şekil 9.28 ve Şekil 9.29). Şekil 9.28'de maksimum TNR, simülasyonun başında, yoğun saatlerde neredeyse yoğun olmayan saatlerin iki misli olarak hesaplanmıştır. Şekil 9.29'da t_{24} ile ilgili daha fazla ayrıntı Şekil 9.32'de gösterilmektedir.



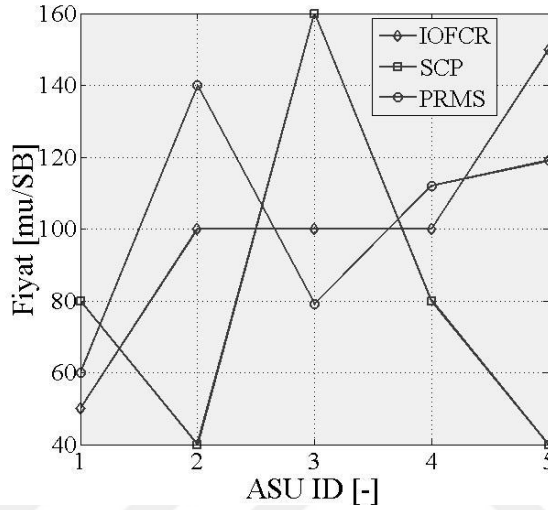
Şekil 9.30. SCP yönteminde yoğun olmayan saatlerde zaman dilimine dayalı TNR



Şekil 9.31. SCP yönteminde yoğun olan saatlerde zaman dilimine dayalı TNR

Başka bir karşılaştırma, Ağ Yükü Tabanlı Fiyatlandırma (NLP), QoS Profili ve Teklif Temelli Fiyatlandırma (QPBP) ve Trafik Tarafından Farklılaştırılmış Fiyatlandırma (TDP) politikaları arasında en iyi performansı gösteren SCP yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Daha güvenilir bir karşılaştırma sunmak için, altın (G), gümüş (S) ve bronz (B) tip kullanıcılara belirlenen fiyat sırasıyla 160, 80 ve 40'nun ortalaması olarak önerilen yöntemimizde P_{fixed_j} 'nin $P_b = 100$ 'e yakın olan 93 olacaktır. Öte yandan, FSB oranları, G, S ve B tipi kullanıcılar için sırasıyla %45, %35 ve %20 olarak belirlenmiştir.

Şekil 9.30 ve Şekil 9.31, SCP'nin, IOFCR'ın TNR'sunden daha iyi olduğunu, yoğun olmayan ve en yoğun saatteki TNR performansını göstermektedir. Ancak, önerilen yöntemin TNR'yusu PRMS'den daha düşüktür. Şekil 9.30'de, yoğun olmayan saatlerde kazancın olmadığı zaman dilimleri mevcuttur ki bu durum yoğun saatlerde gözükmemektedir (Şekil 9.31). Şekil 9.30'deki t_{14} , diğer yöntemlerle karşılaştırılması için seçilen zaman aralığıdır (Şekil 9.32).



Şekil 9.32. IOFCR, PRMS v SCP için seçili zaman dilimindeki TNR

Şekil 9.32'de görüldüğü gibi, her bir yöntem için beş RSU gözükmemektedir. Her biri bir IRSU veya bir PRSU olabilirler. Bu kullanıcılardan adı geçen farklı yöntemler ile kazanılan TNR'ler aşağıdaki gibidir: $IOFCR_{t_{14}} = [50; 100; 100; 100; 150]$, $SCP_{t_{24}} = [80; 40; 160; 80; 40]$, ve $PRMS_{t_3} = [60; 140; 79; 112; 119]$ burada TNR'ler sırasıyla 500, 400 ve 510 olarak hesaplanmıştır. PRMS, diğer yöntemlerden daha iyi performans gösterirken SCP'nin diğerlerine göre en kötü TNR değerine sahiptir. PRMS'in fiyat hesaplama sürecindeki esnekliği IOFCR ve SCP'ye karşı daha uyarlanabilir. SCP ile ilgili olarak, kullanıcı sınıflandırması (G, S ve B tipi) TNR'yi yoğun olan ve yoğun olmayan saatlerde etkileyebilir ve bu da düşük seviyeli kullanıcılara (B Tipi) bir sınırlama getirmektedir. Bunun nedeni, G Tipleri FSB'lerin çoğunu ele aldıkları için B-Türlerinin düşük QoS gerektirmesine rağmen özellikle yoğun saatlerde hizmet almak için yüksek fiyat ödemesi gerektiğinden kaynaklanmıştır. Burada SCP fiyatlandırma politikasının düşük TNR'ya sahip olması random olarak gelen kullanıcı tipine bağlıdır. Bu sonuçlar ortalama 1000 simülasyondan

elde edilmiştir. Fakat bazı istisna durumlarda eğerki tüm kullanıcılar G tipinden olurlar ise ozaman TNR farklı durumda ve en Max seviyeye çıkma durumu mevcuttur.

Tablo 9.18. PRSU durum analizi

Trafik durumu	RB sayısı	PRSU durum analizi						
		PRSU kabul oranı	PRSU toplam sayısı	Kabul edilen PRSU sayısı	ASU sayısı	No Show-olan PRSU sayısı	Reddedilen PRSU sayısı	Gecikmeyi kabul etmeyen PRSU sayısı
Yoğun olmayan saatler	10	49.38	366	160	79	81	0	0
	100	45.27	3793	1677	899	778	0	0
Yoğun olan saatler	10	47.48	377	179	38	42	54	44
	100	45.09	3701	1670	538	515	97	80

PRMS'e göre PRSU analizi Tablo 9.19'de verilmiştir. FSB sayısını 10 veya 100 olarak olduğunda, 10 FSB'de yoğun olmayan saatlerde FSB talep eden toplam PRSU sayısı 366, ki burada 160 talep kabul edilmiştir. Kabul edilenlerden 81 PRSU gelmeyerek hizmet almamaktadır. Öte yandan, kabul edilenlerden 79'u belirlenen FSB fiyatını (P_b) ödeyerek ASU olarak hizmet almaya başlamıştır. Yoğun olmayan saatlerde, isteğini iptal etmek zorunda kalan veya daha az FSB bulunan bir ağda bile hizmet alma konusunda gecikme yaşayan herhangi bir PRSU gözükmemektedir.

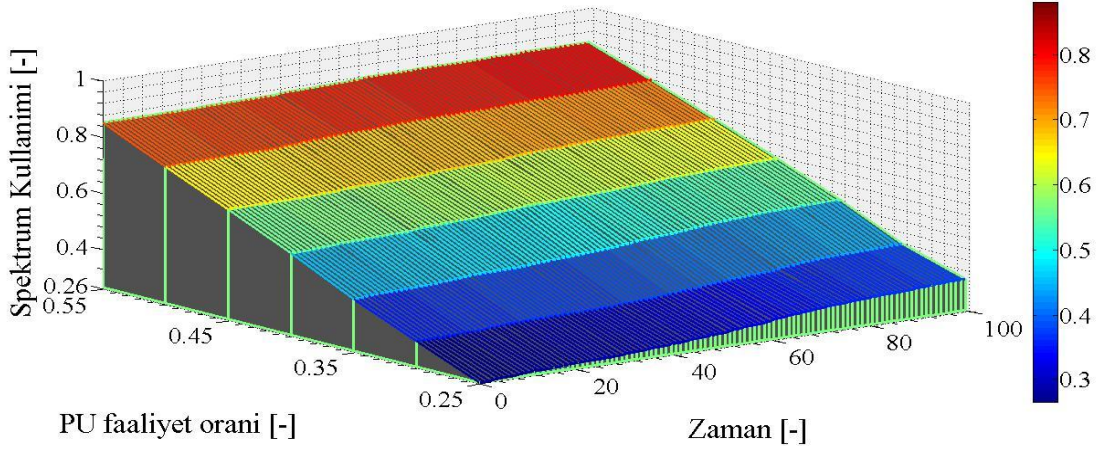
Yoğun saatlerde FSB sayısı düşerek bu durum MNO tarafından bazı PRSU'ların reddedilmesine ve bazılarının talep edilen hizmet süresine göre bir gecikme teklif edilmesine neden olmuştur.

Tablo 9.20, TNR'ye göre PRMS, SCP ve IOFCR arasındaki performans farkı belirlenmiştir. SCP ve IOFCR'de herhangi bir PRSU ile ilgili terim olmadığından, farklı PRSU ve IRSU faaliyet oranlarını hesaba katan tek yöntem PRMS'dir. Özellikle, IRSU faaliyet oranı neredeyse sıfır (0.01) olduğunda, SCP, kazanılan TNR'nun yalnızca bir B tipi kullanıcıyı kabul ettiği için 40 olarak belirlenmiş ve IOFCR için TNR sıfır olarak belirlenmiştir.

Tablo 9.19. IOFCR ve PRMS yöntemlerinin kıyaslaması

Trafik durumu	Faaliyet oranı		TNR	
			IOFCR	PRMS
Yoğun olmayan saatler	PRSU	0.5	47000	55546
	IRSU	0.5		
Yoğun olan saatler	PRSU	0.5	27500	47470
	IRSU	0.5		
Yoğun olmayan saatler	PRSU	0.01	40200	42656
	IRSU	0.99		
Yoğun olan saatler	PRSU	0.01	79300	81374
	IRSU	0.99		
Yoğun olmayan saatler	PRSU	0.99	0	106919
	IRSU	0.01		
Yoğun olan saatler	PRSU	0.99	200	87816
	IRSU	0.01		

Yoğun saatlerde PRSU faaliyet oranı 0.01 olduğunda, 0.99 oranda IRSU faaliyet oranı gözükmemektedir. Bu durumda bile, PRMS, geliştirilen yöntemin MCDM fiyatlandırma prosedurunun IOFCR fiyatlandırma politikasından daha iyi bir şekilde hareket etmesi nedeniyle avantajlıdır. Bununla birlikte, SCP'nin TNR oranı yoğun olmayan saatler için en yüksek değeri elde etmiştir. Bu da G-Tipi kullanıcı etkinliği oranının yüksek olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak, SCP, her kullanıcı kategorisi için ayrılmış FSB'ler göz önünde bulundurduğu için kullanıcılara servis vermek için sınırlamıştır. SCP, bazı durumlarda MNO için yüksek TNR elde etse bile, SCP fiyatlandırma çerçevesinde herhangi bir karar tabanlı strateji olmadığı için tüm senaryolarda geçerli değildir. Dolayısıyla, kullanıcı türlerinin yanı sıra kullanıcı öznitelikleri dikkate alındığında, TNR ve QoE açısından daha etkili olmaktadır. Yoğun saatlerde RSU'lar FSB'yi kullanmak için çok fazla ücret ödemektedirler. Bununla birlikte, MNO, PRMS'deki ağ kullanımı ve kullanıcı memnuniyeti arasında bir dengeyi sağlamaktadır. Dolayısıyla, RSU geçmişi (UH) ve bekleme süresi (WT) RSU tarafından ödenilen fiyatı etkilemektedir. Uygun UH ve ST_S 'ye sahip bir RSU, yüksek trafik yükü durumunda çok hizmet süreli istekte bulunsa bile uygun bir indirim kazanabilmektedir.



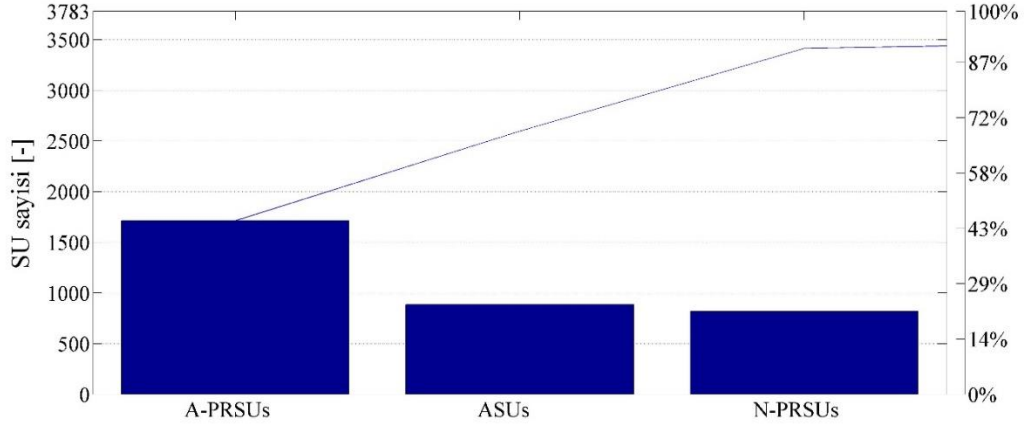
Şekil 9.33. PRMS Spektrum kullanımı

Son olarak, önerilen modelin spektrum kullanımı, her zaman aralığı için PU faaliyet oranına dayanarak Şekil 9.33'te gösterilmiştir. Ön Rezervasyon Yönetim Sistemi (PRMS), yüksek PU faaliyet oranında bile spektrum kullanımını geliştirdiğini gösteriyor. Zaman eksenini üzerindeki spektrum kullanım eğimi, PU faaliyet oranı 0.85 olduğunda 0.28'dir. Öte yandan, PU faaliyet oranı 0.25 olduğunda kullanım eğimi 1.11 olarak gözlemlenmiştir.

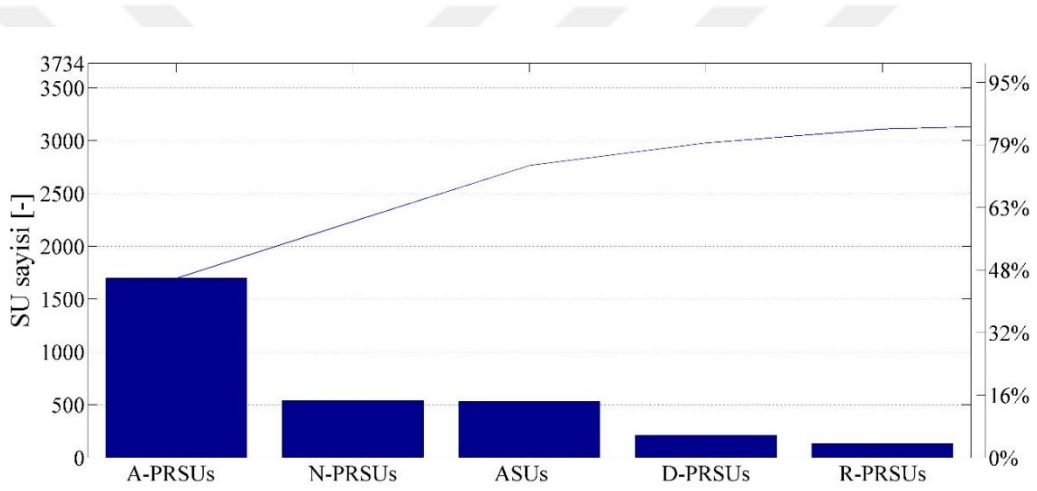
9.12. Pareto Analizi

Kullanıcı memnuniyeti açısından önerilen rezervasyon yönteminin performansı Pareto analizi ile elde edilmiştir. Önerilen algoritma, yoğun ve yoğun olmayan saatlerde ağ gelirini artırma amacıyla kullanıcıları hizmet almaya teşvik etmektedir. Bu konu simülasyon sonuçları haricinde Pareto analizi ile ispatlanmıştır.

Düşük PU faaliyet oranında (yoğun olmayan saatlerde) kullanıcı memnuniyeti Şekil 9.34'te verilmiştir. Bu senaryoda, RSU'ların faaliyet oranı değeri, yoğun olmayan ve yoğun olan saatler için 0.75 olarak sabitlenmiştir. Reddedilen PRSU'ların (R-PRSU's) sayısı sıfır olarak belirlenmiştir. Spektrum bandına erişmek için herhangi bir gecikme kabul eden 49 kullanıcı (D-PRSU) vardır. Ancak, D-PRSU'ların miktarı, 3783 olan toplam PRSU sayısı ile karşılaştırıldığında Pareto analizinde önemsiz hale gelmektedir. PRSU'ların %23,36'sı ASU'lar olarak hizmet almaktadırlar, PRSU'ların %21.59 ise N-PRU ve toplam Kullanıcı memnuniyeti %89 civarındadır.



Şekil 9.34. Pareto analizi ile yoğun olmayan saatlerde kullanıcı memnuniyeti



Şekil 9.35. Pareto analizi ile yoğun saatlerde kullanıcı memnuniyeti

Şekil 9.35, yüksek PU faaliyet oranında PRSU'lar için Pareto analizini göstermektedir. Bu senaryoda, tüm rezervasyon stratejisinin işlevleri kullanılır (Bölüm 10). 1697 kabul edilmiş PRSU (A-PRSU), 538 N-PRSU, 532 ASU, 211 D-PRSU ve 133 R-PRSU, sıra ile %45,44, %14,40, %14,24, %5,65 ve %3,56 oranındadır. Sonuç olarak, yoğun saatlerde %81 kullanıcı memnuniyeti elde edilmiştir; bu değer, yoğun olmayan saatlerde kullanıcı memnuniyeti seviyesinden sadece %7 oranında azdır.

9.13. Önerilen Rezervasyon Yönetim Sisteminin Hesaplama Karmaşıklığı

Önerilen Ön Rezervasyon algoritmasının zaman karmaşıklığı Tablo 9.21'de sunulmuştur. En uygun çözüme ulaşmak için simülasyon tekrar sayısı karmaşıklık ölçüsü olarak alınmıştır [116, 117].

Tablo 9.20. Ön-Rezervasyon Yönetim Sisteminin zaman karmaşıklığı

Ön-Rezervasyon Algoritması		Cost	Zaman Karmaşıklığı
WT 'nin ST_C 'ye kadar hesaplanması	Algorithm 13.2	C_1	$O(n)$
FSB_{Est} hesaplanması		C_2	$O(n)$
CB ve TL hesaplanması		C_3	$O(n)$
Ağırlıklar ve CoR hesaplanması		C_4	$O(\min\{k.n^2, 1\})$
P_r 'in Algorithm 8.9'da hesaplanması		C_5	$O(\min\{n.log n, 1\})$
RR ve CC 'nin Algorithm 8.10'da hesaplanması		C_6	$O(\min\{n.log n, 1\})$
Algoritmanın toplam karmaşıklığı		$T(n)$	$O(n)$

Ön Rezervasyon algoritmasında hesaplama karmaşıklığını etkileyen farklı parametreler mevcuttur. Bazı varsayımların dikkate alınmasıyla, hesaplama karmaşıklığı iki temel kategoriye ayrılır (Denklemler 9.1 ve 9.2). Birinci kategori ile ilgili olarak, seçilen herhangi bir PU / SU faaliyet oranı için doğrusal bir zaman karmaşıklığı vardır. $T(n)$ çalışma süresini hesaplamak için, n kullanıcının spektrum bandı isteğini var sayarak maliyet ve zaman sütunları toplanmıştır:

$$T(n) = C_1.n + C_2.n + C_3.n + C_6.log n = O(\max(n, log n)) = O(n) \quad (9.1)$$

AHP'nin, ikili karşılaştırma matrislerinin $n \times m$, n 'nin seçim özniteliğinin sayısı ve m 'nin karar alternatiflerinin sayısı olduğu $O(\min\{m.n^2, m^2.n\})$ sürede hesaplanabilmektedir [116, 117]. Ön-Rezervasyon algoritmasında, n kullanıcı özelliklerinin ($n = 3$) ve tutarlılık oranının (CoR) önem derecesi, herhangi bir kullanıcı faaliyeti durumunda mevcut zaman aralığının başlangıcında hesaplanmaktadır. Öte yandan, m , her seferinde RSU sayısına bağlıdır, $0 \leq m \leq |L_{RSU}(t_i)|$. Bazı zamanlar içinde, SB'yi isteyen herhangi bir PRSU veya IRSU yoktur. Bahsedilen varsayımların dikkate alınmasıyla, önerilen algoritma $O(n)$ lineer zamanda hesaplanabilir. Asıl nokta, AHP'nin karmaşıklığının AHP hiyerarşisindeki seviyelerin sayısı ile temsil edilmesidir. Bu nedenle, birkaç kullanıcı özniteliği, AHP'deki

hierarchy levels and the result as a calculation complexity will increase and thus, a higher calculation complexity is owned by an algorithm in large scale networks. This shows that the calculation complexity is linear. Therefore, the calculation complexity should be minimum as much as possible.

On the other hand, MNO's different scenarios are related to the weight of the priority. The calculation and the result as a high user activity ratio in the CoR's each calculation is required. That is $O(k.n^2)$. Here k is the number of AHP hierarchy levels. The algorithm is recommended and any other priority is not 1 as a parameter. Also, the rejection level t_i is calculated in the rate $CC |L_{R-ASU}(t_i)| > 1$ of the R-ASU's. Therefore, the calculation complexity is as follows:

$$T(n) = n.(C_1 + C_2 + C_3 + C_4.n + C_5.logn) + C_6.logn = O(\max(n, n^2, n.logn, logn)) = O(n^2) \quad (9.2)$$

As a result, the calculation complexity analysis shows that the Multi-Criteria Decision Making (MCDM) methods, known as certain priorities, are suitable for scenarios.

10. SONUÇLAR

Gelişen Lisanslı Paylaşımlı Erişim (LSA) çerçevesi ve Bilişsel Radyo (CR) teknolojisi, gezgin ağlarda aynı frekans bandlarına erişen kullanıcılar arasında esnek spektrum paylaşımına olanak tanımaktadırlar. Bu yeni teknolojiler sayesinde, birincil kullanıcı (PU) ile ikincil bir kullanıcı (SU) arasındaki spektrumun kontrollü bir şekilde paylaşılmasına izin verilmektedir. Spektrum yönetimi ile ilgili bir çok çalışma kullanıcı sınıflandırması ve ağ gelirinin artması üzerine odaklanmıştır. Bu çalışmalarda kullanıcı memnuniyeti ve aynı zamanda uzun zaman dilimlerinde spektrum kullanım oranının artması için bir aşama bulunmamaktadır. Fakat, spektrum bandına olan talep kullanıcılar tarafından giderek artarken spektrum bandların daha etkin kullanılması ve dolayısıyla spektrum yönetim teknikleri ile birlikte kullanıcı memnuniyeti dikkate alınmalıdır. Bu tezde, CR ağlarında (CRN'ler) esnek spektrum yönetimi için kullanıcı memnuniyeti ile uyumlu bir spektrum yönetimi stratejisi önerilmiştir.

Bu tez çalışmasının genel çerçevesi fazladan rezervasyon, ön rezervasyon ve spektrum el değiştirme olarak üç aşamadan oluşmaktadır. Çalışmanın literatüre kattığı yenilik ise fazladan rezervasyon ve ön rezervasyon stratejilerinin LSA teknolojisine dayanarak CRN'de kullanılmasıdır.

Önerilen fazladan ve ön Rezervasyon çerçeveleri, fiyatlandırma ve reddetme kurallarına dayanarak, PU'nun aktif olmadığı durumlarda SU'nun nasıl hizmet alabileceğine karar veren Çok Ölçütlü Karar Verme (MCDM) yöntemleri ile mobil şebeke operatörleri (MNO) karar politikasını temel almaktadır. Bu çalışmada, çeşitli kullanıcı tiplerinin (Altın, Gümüş ve Brnoz), yanı sıra farklı öznitelikler (RSSI, RSRP, RSRQ, SINR, MD, UH, ST_{Req} , WT, DUR, AvrST, BR) MCDM yöntemleri ile her kullanıcı için uyarlanmıştır. Her bir kullanıcı için bir dizi operatörün karar senaryosuna dayanan bir sınıflandırma bulunmaktadır. Ayrıca özniteliklerin sayısı ve türü farklı senaryolarda değerlendirilerek kullanılmaktadır. Adı geçen değerlerin yanı sıra farklı fazladan rezervasyon politikalarıyla birlikte (RB, PB, SL) yoğun olan ve yoğun olmayan kullanıcı faaliyet oranlarında farklı fiyatlandırma politikalarına (Sabit, Esnek, Uyarlanabilir ve QoS-Driven) dayanarak hem QoE hem ağ gelirinin artması simülasyon sonuçlarıyla tesbit edilmiştir.

Öte yandan, önemli konulardan biri, SU'ları kiralanan spektrum bandından hareket ettirme ihtiyacıdır. Başka bir deyişle, PU aktif olduğu zaman SU'ların işgal edilen lisanslı spektrum bandların boşaltmasına yardımcı olmayı amaçlayan spektrum el değiştirme (Spectrum handoff) yöntemlerinin tasarlanmasıdır. Böylelikle, aktif SU'lar (ASU) başka bir

spektrum bandında servis almaya devam edebilirler. Bundan esinlenerek spektrum el değiştirme prosedürünü etkin bir şekilde uygulamak ve SU'ların memnuniyetini artırarak toplam hizmet süresini, spektrum kullanımını ve deneyim kalitesini (QoE) üst düzeye çıkarmak için bir karar verme modeli önerilmiştir. Karar verme modeli için özniteliklerin sayısı, değerleri ve öncelikleri Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) yöntemi ile hesaplanmaktadır.

Simülasyon modeli için girdi olarak, Brno University of Technology, Çek Cumhuriyeti'nde bulunan 3GPP LTE-A kapalı hücrenel sistemde gerçekleştirilen ölçüm seti kullanılmıştır. Elde edilen simülasyon sonuçları üç LTE hücresinin spektrum kullanımını değerlendirir ve her bir ASU için toplam hizmet süresini gösterilirken, her bir hücre için farklı PU faaliyet oranı dikkate alınmıştır. Bunun yanı sıra, önerilen esnek anahtar sistemine dayalı çerçeve ile ilgili olarak, MNO maliyet-performansını ağın farklı fazladan rezervasyon (overbooking) eşikleri ve önerilen fiyatlandırma ve reddetme politikalarının aracılığıyla ölçmektedir.

Simülasyon sonuçları, uygun politikaların ve özniteliklerin seçilmesi, SU'ları spektrum bandı fiyatı hakkında adil bir şekilde değerlendirmesine sebep olmaktadır. Ayrıca spektrum kullanımını iyileştirirken yoğun olmayan ve yoğun olan saatlerde ağ gelir verimliliğini artırmaktadır. Öte yandan, ASU'ların daha az servis dışı olması ve böylelikle kullanıcı memnuniyetinin sağlanması neden olduğunu göstermektedir. Başka bir değişle, ASU'ların daha az servis dışı olmasıyla birlikte daha az CC ödenmektedir ve böylelikle ağ geliri artmaktadır. Sonuç olarak yoğun saatlerde CC ödeme ihtimalini azaltmak adına önerilen dinamik yöntem fazladan rezervasyon sınırını ayarlamaktadır.

Simülasyon sonuçlarında belirlendiği gibi kullanıcı faaliyet oranına dayanarak çerçeve yapısında fazladan rezervasyon veya ön rezervasyon stratejisi uygun özniteliklerle beraber değerlendirildiğinde kullanıcı kabul oranı peşinden spektrum kullanımı ve ağ geliri artmaktadır. Sonuçların QoE açısından isbatlamak adına Pareto Analizi kullanılmıştır.

11. ÖNERİLER

Günümüzde bilişsel radyo Ağlarında (Cognitive Radio Networks, CRN) spektrum bandı kullanımının artmasıyla birlikte, spektrum kullanım yönetimi önem taşımaktadır. Bu nedenle, farklı teknolojilere dayanarak uyarlanabilir spektrum yönetim tekniklerinin geliştirilmesini göz önünde bulundurarak tezin ana çerçevesi oluşmuştur.

Bu tez çalışmasında ele alınan spektrum bandı yönetimi, hem yoğun olan hem de yoğun olmayan faaliyet oranlarında ele alınması ile gerçekleştirilmiştir. Bu sayede, hangi durumlarda fazladan rezervasyonun uygulanıp uygulanmayacağını ve hangi durumlarda ön rezervasyon stratejisinin uygulanması gerektiğine karar verilerek farklı açılardan kullanıcı ve ağ operatörünün memnuniyeti sağlanmaktadır.

Kullanıcı fiyatlandırma politikaları ile ilgili olarak AHP yanı sıra Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP) yöntemini uygulayarak bu tezde tasarlanan fiyatlandırma politikalarıyla kıyaslanması planlanmıştır. Ayrıca, spektrum yönetiminde karara dayalı mekanizmaların yanı sıra oyun teorisinin çalışma performansının incelenmesi ve farklı ağ teknolojilerinde uygulanması amaçlanmaktadır.

Spektrum el değiştirme konusuna ilişkin, yoğun olan saatlerde fazla el değiştirme kullanıcı memnuniyetini ters yönde etkilemektedir. Bu konu ile ilgili gecikme ve ağ zaman karmaşıklığını göz önünde bulundurarak dinamik el değiştirme eşiği sayesinde el değiştirmenin anlık olarak uygulanıp veya uygulanmadan tazminat bedeli ödenmesi hususunda karar mekanizmasının tasarlanıp gerçek ortamda uygulanması amaçlanmaktadır.

12. KAYNAKLAR

1. Patil, K., Prasad, R. ve Skouby, K., A Survey of Worldwide Spectrum Occupancy Measurement Campaigns for Cognitive Radio, *Int. Conf. Devices and Commun. (ICDeCom)*, Feb. 2011, Mesra, India, 1, 1-5.
2. FCC, Spectrum Policy Task Force Report, ET Docket, Nov. 2002, 02-155.
3. Liang, Y.-C., Chen, K.-C., Li, G. Y., ve Mahonen, P., Cognitive Radio Networking and Communications: An Overview. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 60, 7 (2011) 3386–3407.
4. Matinmikko, M., Mustonen, M., Sarvanko, H., Hoyhtya, M., Hekkala, A., Mammela, A., Katz, M. ve Kiviranta, M. A Motivating Overview of Cognitive Radio: Foundations, Regulatory Issues and Key Concepts, First International Workshop on Cognitive Radio and Advanced Spectrum Management(CogART 2008), Aalborg, Denmark, 1-5.
5. Mitola, J. ve Maguire, G., Cognitive Radio: Making Software Radios More Personal, *IEEE Personal Commun.*, 6, 4 (1999) 13 -18.
6. FCC, Second Report and Order and Memorandum Opinion and Order: In the Matter of Unlicensed Operation in the TV Broadcast Bands, 2008, 08-260.
7. FCC, Third Memorandum Opinion and Order, (2012) 12-36.
8. OFCOM, Regulatory Requirements for White Space Device in the UHF TV Band, Tech. Rep., July 2012.
9. Sum, C.-S. ve et al, Cognitive Communication in TV White Spaces: An Overview of Regulations, Standards, and Technology, *IEEE Commun. Mag.*, 51, 7 (2013) 138-145.
10. Nekovee, M., Cognitive Radio Access to TV White Spaces: Spectrum Opportunities, Commercial Applications and Remaining Technology Challenges, in *IEEE Symp. DySPAN*, April 2010, Singapore, 1-10.
11. Akyildiz, F., Lee, W.Y., Vuran, M.C. ve Mohanty, S., Next Generation/Dynamic Spectrum Access/Cognitive Radio Wireless Networks: A Survey. *Computer Networks*, Elsevier, 50, 13 (2006) 2127–2159.
12. Zhao, Q. ve Sadler, B.M. A Survey of Dynamic Spectrum Access, *IEEE in Signal Processing Magazine*, IEEE, 24, 3 (2007) 79-89.
13. Akyildiz, I.F., Lee, W.Y. ve Chowdhury, K.R., CRAHNs: Cognitive Radio Ad Hoc Networks, *Ad Hoc Networks*, 7, 5 (2009) 810-836.
14. Kim, D.I., Le, L.B. ve Hossain, E., Joint Rate and Power Allocation for Cognitive Radios in Dynamic Spectrum Access Environment, *IEEE Trans. Wireless Commun.* 7,12 (2008) 5517-5527.
15. Wang, B., Ji, Zhu., Liu, K.J.R. ve Clancy, T.C., Primary-Prioritized Markov Approach for Dynamic Spectrum Allocation, *IEEE Trans. Wireless Commun.* 8, 4 (2009) 1854-1865.
16. Wang, F., Krunz, M. ve Shuguang Cui, Price-Based Spectrum Management in Cognitive Radio Networks, *IEEE J. Sel. Topics Signal Process.* 2, 1 (2008) 74-87.
17. Ji, Zhu. Ve Liu, K.J.R., Multi-Stage Pricing Game for Collusion-Resistant Dynamic Spectrum Allocation, *IEEE J. Sel. Areas Commun.* 26, 1 (2008) 182-191.
18. Niyato, D. Ve Hossain, E., Competitive Spectrum Sharing in Cognitive Radio Networks: A Dynamic Game Approach, *IEEE Trans. Wireless Commun.* 7, 1 (2008) 2651-2660.

19. Zhao, Zh., Peng, Zh., Zheng, Sh. ve Shang, J., Cognitive Radio Spectrum Allocation Using Evolutionary Algorithms, IEEE Trans. Wireless Commun. 8, 9 (2009) 4421-4425.
20. Li, Ch., Liu, Wei., Li, Ji., Liu, Q. ve Li, Ch., Aggregation Based Spectrum Allocation in Cognitive Radio Networks, in: IEEE International Conference on Communications- Workshops (CIC/ICCC), China, August 2013, 50-54.
21. Wang, W., Shin, K.G. ve Wang, W., Joint Spectrum Allocation and Power Control for Multihop Cognitive Radio Networks, IEEE Trans. Mobile Comput. 10, 7 (2011) 1042-1055.
22. Chai, R., Li, Y. ve Chen, Q., Joint Pricing and Spectrum Allocation for Cognitive Radio Network, 8th International ICST Conference on Communications and Networking (CHINACOM), China, August 2013, 633-637.
23. Elias, J. Ve Martignon, F., Joint Spectrum Access and Pricing in Cognitive Radio Networks with Elastic Traffic, IEEE International Conference on Communications (ICC), Cape Town, South Africa, May 2010, 1-5.
24. Hoang, A.T. ve Liang, Y.-C., Dynamic Spectrum Allocation with Second-Price Auctions: When Time Is Money, 3rd International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications, Singapore, 15-17 May 2008, 1-6.
25. Li, Ch., Liu, Zhe., Geng, X., Dong, M., Yang, F., Gan, X., Tian, X. ve Wang, X., Two Dimension Spectrum Allocation for Cognitive Radio Networks, IEEE Trans. Wireless Commun. 13, 3 (2014) 1410-1423.
26. Kraines, D.P., Optimal Overbooking, The UMAP J. 23, 3 (2002) 283-299.
27. Sulistio, A., Kim, K. ve Buyya, R., Managing Cancellations and No-Shows of Reservations with Overbooking to Increase Resource Revenue, IEEE 8th International Symposium on Cluster Computing and the Grid, Lyon, France, May 2008, 267-276.
28. Sulistio, A., Kim, K. ve Buyya, R., Using Revenue Management to Determine Pricing of Reservations, IEEE Third International Conference on e-Science and Grid Computing, Bangalore, India, December 2007, 396-405.
29. Birkenheuer, G. ve Brinkmann, A., Reservation-based Overbooking for HPC Clusters, IEEE International Conference on Cluster Computing (CLUSTER), Texas, USA, September 2011, 537-541.
30. Zhao, Y. ve Chen, Ch., A Redundant Overbooking Reservation Algorithm for OBS/OPS Networks, Computer Networks J. 51, 13 (2007) 3919-3934.
31. Tomas, L. ve Tordsson, J., An Autonomic Approach to Risk-Aware Data Center Overbooking, Proc. IEEE Trans. Cloud Comput., 2, 3 (2014) 292 - 305.
32. Georgiadis, G. ve Tang, C.S., Optimal Reservation Policies and Market Segmentation, International Journal of Production Economics 154 (2014) 81-99.
33. Koide, T. ve Ishii, H., The Hotel Yield Management with Two Types of Room Prices, overbooking and cancellations, International Journal of Production Economics, 93, 94 (2005) 417-428.
34. Amaruchkul, K. ve Sae-Lim, Airline Overbooking Models with Misspecification, Journal of Air Transport Management 17, 2 (2011) 143-147.
35. Huang, Y., Ge, Y., Zhang, X. ve Xu, Y., Overbooking for Parallel Flights with Transference, International Journal of Production Economics 144, 2 (2013) 582-589.
36. Bharill, R. ve Rangaraj, N., Revenue Management in Railway Operations: A Study of the Rajdhani Express, Indian Railways, Transportation Research Part A: Policy and Practice 42, 9 (2008) 1195-1207.

37. Mastroeni, L. ve Naldi, M., Pricing of Spectrum Reservation Under Overbooking, 9th Conference on Electronic Commerce Research and Applications, Minneapolis, USA, 2011, 10, 5, 565-575.
38. Li, J., Yang, Q., Hanzo, L. ve Kwak, K., Over-Booking Approach for Dynamic Spectrum Management, IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2011), Texas, USA, December 2011, 1-5.
39. Philips, R.L., Pricing and Revenue Optimization, Stanford University Press, 2005.
40. Talluri, K.T. ve Ryzin, K.T., The Theory and Practice of Revenue Management, Springer Science + Business Media, Inc., (2004) 129-172.
41. AlQerm ve Shihada, B., Adaptive Decision-Making Scheme for Cognitive Radio Networks, 28th International Conference on Advanced Information Networking and Applications. IEEE, 2014, 321–328.
42. Zeydan, E., Tan, A.S., Karatepe, I. A. ve Er, A.S., Connectivity Management Using Multiple Attribute Decision Making in Heterogeneous Networks, International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS). IEEE, 2015, 461–465.
43. Martin T. ve Chang, K.-C., Assessing User Decision Behaviors for Dynamic Spectrum Sharing and Pricing Models, 19th International Conference on Information Fusion (FUSION). ISIF, 2016, 1011– 1018.
44. Niyato, D. ve Hossain, E., Competitive Pricing for Spectrum Sharing in Cognitive Radio Networks: Dynamic Game, Inefficiency of Nash Equilibrium, and Collusion, IEEE J. Sel. Areas Commun. 26, 1 (2008) 192-202.
45. Niyato, D. ve Hossain, E., Competitive Pricing for Spectrum Sharing in Cognitive Radio Networks: Dynamic Game, Inefficiency of Nash Equilibrium, and Collusion, IEEE J. Sel. Areas Commun. 26, 1 (2008) 192-202.
46. Wang, X., Ma, K.Q., Liu, Z. ve Guan, X., Pricing-Based Spectrum Leasing in Cognitive Radio Networks, IET Networks, 1, 3 (2012) 116-125.
47. Yang, L., Kim, H., Zhang, J., Chiang, M. ve Tan, C.W., Pricing-Based Decentralized Spectrum Access Control in Cognitive Radio Networks, Netw. IEEE/ACM Trans. 21, 2 (2013) 522-535.
48. Xie, X., Yang, H., Vasilakos, A.V. ve He, L., Fair Power Control Using Game Theory With Pricing Scheme in Cognitive Radio Networks, Journal of Commun. Netw. 16, 2 (2014) 183-192.
49. Kavurmacioglu, E., Alanyali, M. ve Starobinski, D., Competition in Private Commons: Price War or Market Sharing?, Netw. IEEE/ACM Trans. 24, 1 (2016) 29-42.
50. Turhan, A., Alanyali, M. ve Kavurmacioglu, E., Starobinski, Dynamic Pricing of Preemptive Service for Secondary Demand, IEEE Trans. Cog. Commun. Netw. 2, 2 (2016) 208-222.
51. Yang, Y., Park, L.T., Mandayam, N.B., Seskar, I., Glass, A.L. ve Sinha, N., Prospect Pricing in Cognitive Radio Networks, IEEE Trans. Cog. Commun. Netw. 1, 1 (2015) 56-70.
52. Mastroeni, L. ve Naldi, M., Pricing of Spectrum Reservation Under Overbooking, Electronic Commerce Research and Applications, Elsevier, 10, 5 (2011) 565-575.
53. Wallenius, E. ve Hmlinen, T., Pricing Model for 3G/4G Networks, IEEE PIMRC, Lisbon, 2002, 187-191.
54. Ibrahim, W. et al. QoS Satisfaction Based Charging and Resource Management Policy Fornext Generation Wireless Networks, International Coference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, WCNM, Wuhan 2015, 868-873.

55. Mir U. ve Nuaymi, L., LTE Pricing Strategies, 77th Vehicular Technology Conference (VTC Spring), IEEE 2013, 1–6.
56. Saaty, T.L., Decision Making with the Analytic Hierarchy Process, Int. Journal of Serv. Sci. 1, 1 (2008) 83-98.
57. Stanujkic, D., Dordevic, B. ve Dordevic, D., Comparative Analysis of Some Prominent MCDM Methods: A Case of Ranking Serbian Banks, Serbian J. Man. 8, 2 (2013) 213–241.
58. Rodriguez-Colina, E., Ramirez P., C. ve Carrillo A., C.E., Multiple Attribute Dynamic Spectrum Decision Making for Cognitive Radio Networks, Wireless and Optical Communications Networks Conference, WOCN 2011, 1-5.
59. Hernandez, C., Pedraza, L. ve Rodriguez-Colina, E., Multivariable Adaptive Handoff Spectral Model for Cognitive Radio Networks, Contemporary Engineering Sciences, 10, 2 (2017) 39-72.
60. Hernandez, C., Pedraza, L. ve Rodriguez-Colina, E., Fuzzy Feedback Algorithm for the Spectral Handoff in Cognitive Radio Networks, *Revista Facultad de Ingeniería* · December, 80 (2016) 47-62.
61. Mir, U. ve Munir, A., An Adaptive Handoff Strategy for Cognitive Radio Networks, Wireless Networks, Springer, (2017) 1-16.
62. T.C. Bilgi Teknolojileri ve İletişim Kurumu Spektrum Yönetimi Dairesi Başkanlığı, <https://www.btk.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Milli-Frekans-Plani-ve-Diger-Planlar>.
63. FCC, <https://www.ntia.doc.gov/files/ntia/publications/2003-allochrt.pdf>.
64. FCC, Notice of Proposed Rule Making and Order: Facilitating Opportunities for Flexible, Efficient, and Reliable Spectrum Use Employing Cognitive Radio Technologies, ET Docket ,(2003) 03-108.
65. Mitola, J. ve Maguire, G.Q. Cognitive Radios: Making Software Radios More Personal. IEEE Personal Communications, 6 (1999) 13-18.
66. Akyildiz, I. F., Lee, W.-Y., Vuran, M. C. ve Mohanty, S., A Survey on Spectrum Management in Cognitive Radio Networks. IEEE Communications Magazine, 46, 4 (2008) 40-48.
67. Ariananda, D.D., Lakshmanan, M.K. Ve Nikookar, H., A Survey on Spectrum Sensing Techniques for Cognitive Radio, the Second International Workshop on Cognitive Radio and Advanced Spectrum Management (CogART 2009), 74-79.
68. Hossain, E., Niyato D. ve Han Z., Dynamic Spectrum Access and Management in Cognitive Radio Networks, Cambridge University Press, 2009.
69. CHU, J.H., MA, R.T. ve FENG, K.T., Stochastic Spectrum Handoff Protocols for Partially Observable Cognitive Radio Networks, Wireless Networks, 20 (2014) 1003-1022.
70. Cordeiro, C., Challapali, K., Birru, D. ve Sai Shankar, N., IEEE 802.22: The First Worldwide Wireless Standard based on Cognitive Radios, IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, Baltimore, USA, 2005, 328-337.
71. Palola, m., Matinmikko, M. ve Prokkola, J., Live Field Trial of Licensed Shared Access (LSA) Concept Using LTE Network in 2.3 Ghz Band, Dynamic Spectrum Access Networks (DYSPAN), IEEE International Symposium on USA, 2014, 1-9.
72. CEPT, ECC Report, Technical and Operational Requirements for the Possible Operation of Cognitive Radio Systems in the ‘White Spaces’ of the Frequency Band 470-790 Mhz, ECC Report 159, Jan. 2011.
73. RSPG, Report on Collective Use of Spectrum (CUS) and Other Spectrum Sharing Approaches, RSPG11-392, European Commission, Radio Spectrum Policy Group, Nov. 2011.

74. RSPG, Opinion on Licensed Shared Access, RSPG13-538, European Commission, Radio Spectrum Policy Group, Nov. 2013.
75. ECC Report 205. Licensed Shared Access. 2014.
76. ECC's Frequency Management Working Group (WG FM), Report on ASA Concept, FM(12)084 Annex 47, 2012.
77. ETSI, Mobile Broadband Services in the 2 300 MHz - 2 400 MHz Frequency Band under Licensed Shared Access Regime. ETSI RRS System reference document. TR 103 113, 1.1.1. July 2013.
78. Khun-Jush J. et al., Licensed Shared Access as Complementary Approach to Meet Spectrum Demands: Benefits for Next Generation Cellular Systems, ETSI Workshop on Reconfigurable Radio Systems, Cannes, France, 2012, 1-7.
79. Gudkova, I., Samouylov, K., Ostrikova, D., Mokrov, E., Ponomarenko-Timofeev, A., Andreev, S. ve Koucheryavy, Y., Service Failure and Interruption Probability Analysis for Licensed Shared Access Regulatory Framework, ICUMT, Brno, Czech Republic, 2015, 123-131.
80. Loganathan, J. ve Janakiraman, S., Improved History Based Channel Allocation Scheme for Cognitive Radio Networks, WCFTR, Coimbatore, India, 2016.
81. Çınar, Y., Çok Nitelikli Karar Verme ve 'Bankaların Mali Performanslarının Değerlendirilmesi' Örneği, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi 2004.
82. Chankong, V. ve Haimes, Y.Y., Multiobjective Decision Making: Theory and Methodology, North-Holland, New York, 1983.
83. Ozernoi, V.M. ve Gaft, M.G., Multicriterion Decision Problems, D.E. Bell, R.L. Keeney, H. Raiffa (Eds.), *Conflicting Objectives in Decisions*, John Wiley, Chichester, England, 1978, 17-39.
84. Po-Lung Yu., *Multiple-Criteria Decision Making: Concepts, Techniques, and Extensions*, Springer US, 1985.
85. Triantaphyllou, E., *Multi-Criteria Decision Making Methods: A Comparative Study*, Springer Science+Business Media Dordrecht, 2000.
86. Saaty, T.L., How to Make A Decision: The Analytic Hierarchy Process, *Eur. J. Oper. Res.*, 48, 1 (1990) 9–26.
87. Saaty, T.L., *Conflict Resolution: The Analytic Hierarchy Process*. New York : Praeger, 1989.
88. Beck, M.P. ve Lin, B.W., Selection of Automated Office Systems: A Case Study, *OMEGA*, 9, 2 (1981) 169-176.
89. McGill, J.I. ve Ryzin, G.J.V., Revenue Management: Research Overview and Prospects. *Transportation Science*, 33, 2 (1999) 233-256.
90. Thompson, H.R., Statistical Problems in Airline Reservation Control. *Operations Research Quaterly*, 12 (1961) 167-185.
91. Air Travel Consumer Report. In Office of Aviation Enforcement and Proceedings (OAEP), Washington, DC, USA, April 2007.
92. Belghith, et al. Pricing of real-time applications in WiMAX systems, *IEEE VTC-Fall 2008*, 21-24.
93. Public Safety Communications Research (PSCR), Priority, Preemption, QoS, Department of Commerce-Boulder Labs.
94. Ayvaziyan, White Paper: Heavy Reading, LTE TDD Operator Business Case & Adoption Forecast, March 2011.
95. Tang, K.S., Man, K.F., Kwong, S. ve He, Q., Genetic Algorithms and Their Applications, *IEEE Signal Processing Magazine*, 13, 6 (1996) 22-37.

96. Ortaç, Y., Özel, C. ve Alli, H., Genetik Algoritmalar ile İki Kademeli Düz Redüktör Mekanizmaları İçin Optimum Hacim Ve Ağırlık Tasarımı, Akıllı sistemlerde yenilikler ve uygulamaları sempozyumu, İstanbul (2004) 135-140.
97. Farmer, J.D., Packard, N.H. Ve Perelson, A.S., The Immune System, Adaptation and Machine Learning, 22, 3 (1986) 187-204.
98. Akyol, S. ve Alataş, B., Güncel Sürü Zekası Optimizasyon Algoritmaları, Nevşehir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitü Dergisi, 1(2012) 36-50.
99. Kennedy, J., ve Eberhart, R., Particle Swarm Optimization, Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks, WA, USA, (1995) 1942-1948.
100. Çura, T., Modern Sezgisel Teknikler ve Uygulamaları, Papatya Yayıncılık Eğitim, 2008.
101. Gözde, H., Kocaarslan, İ., Taplamacıoğlu, M.C. ve Çam, E., İki Bölgeli Güç Sisteminde Parçacık Sürüsü Algoritması İle Yük-Frekans Kontrolü Optimizasyonu, ELECO'08, Bursa, Türkiye, 2008, 212-216.
102. Chen, J., Ren, Z. ve Fan, X., Particle Swarm Optimization with Adaptive Mutation and Its Application Research in Tuning of PID Parameters, Systems and Control in Aerospace and Astronautics, ISSCAA 1st International Symposium, Changzhou, China, 2006.
103. Jalilvand, A., Kimiyaghalam, A., Ashouri, A., ve Mahdavi, M., Advanced Particle Swarm Optimization-Based PID Controller Parameters Tuning, 12th IEEE International Multitopic Conference, Karachi, Pakistan (2008).
104. Kim, D. H., GA-PSO Based Vector Control of Indirect Three Induction Motor, Applied Soft Computing, 7, 2 (2007) 601-611.
105. Kim, D. H. ve Hirota, K., Vector Control for Loss Minimization of Induction Motor Using GA-PSO, Applied Soft Computing, 8, 4 (2008).
106. Özyön, S., Yaşar, C. ve Temurtaş, H., Parçacık Sürü Optimizasyon Algoritmasının Termik Birimlerden Oluşan Çevresel Ekonomik Güç Dağıtım Problemlerine Uygulanması, 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), Elazığ, Turkey(2011).
107. Tamer, S. ve Karakuzu, C., Parçacık Sürüsü Optimizasyon Algoritması ve Benzetim Örnekleri, ELECO 2006 Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Sempozyumu, Elektronik Bildirileri Kitabı, Bursa, Türkiye (2006) 302-306.
108. Allaoua B., Gasbaoui B., ve Mebarki B., Setting Up PID DC Motor Speed Control Alteration Parameters Using Particle Swarm Optimization Strategy, Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies, 14, (2009) 19-32.
109. Çavdar, T., Güler, E., ve Sadreddini, Zh. Instant Overbooking Framework for Cognitive Radio Networks. Computer Networks, 76, (2015) 227-241.
110. Çavdar, T., Sadreddini, Zh., ve Güler, E., Pre-Reservation based Spectrum Allocation for Cognitive Radio Network, Telecommunication Systems Journal, Springer (2018) 1-21.
111. Ginevicius, R. Normalization of Quantities of Various Dimensions. Journal of Business Economics and Management, 9, 1 (2008) 79-86.
112. Wang, L.C. ve Wang, C.W., Spectrum Handoff for Cognitive Radio Networks: Reactive-Sensing or Proactive-Sensins?, IEEE International Performance, Computing and Communications Conference, Dec 2008, 343-348.
113. Masek, P., Slabicki, M., Hosek, J. ve Grochla, K. Transmission Power Optimization in Live 3GPP LTE-A Indoor Deployment. In 8th International congress on ultra-modern telecommunications and control systems and workshops ICUMT 2016, 164-170.
114. Cisco, Global Mobile Data Traffic Forecast 2016-2021, 2017.

115. Sadreddini, Zh., Masek, P., Cavdar, T., Ometov, A., Hosek, J., Gudkova, I. ve Andreev, S., Dynamic Resource Sharing in 5G with LSA: Criteria-Based Management Framework, Wireless Communications and Mobile Computing, Hindawi 2018.
116. Jenab, K., Khoury, S. ve Sarfaraz, A.R., Manufacturing Complexity Analysis with Fuzzy AHP, International Journal of Strategic Decision Sciences (IJSDS), 3,4 (2012).
117. Mamat, N.J.Z. ve Daniel, J.K., Statistical Analyses on Time Complexity and Rank Consistency Between Singular Value Decomposition and the Duality Approach in AHP: A Case Study of Faculty Member Selection,” Mathematical and Computer Modelling, 2007, 1099-1106.



13. EKLER

Algoritma 13.1. IOFCR çerçevesi

1. *while* $t_i < T$ *begin*
2. $FB(t_i) \leftarrow \varphi - [|L_{PU}(t_i)| - |L_{ASU}(t_i)|]$;
3. *if* $FB(t_i) > 0$ *then*
4. $BL(t_i) \leftarrow \text{Overbooking}(FB(t_i), \text{BookingPolicy})$;
5. *else*
6. $BL(t_i) \leftarrow 0$;
7. *end*
8. *while* $|L_{RSU}(t_{i+1})| < BL(t_i)$ *begin*
9. $L_{RSU}(t_{i+1}) \leftarrow L_{RSU}(t_{i+1}) \cup \{\text{new RSU}\}$;
10. *end*
11. $|L'_{RSU}(t_{i+1})| \leftarrow |L_{RSU}(t_{i+1})| * \delta(t_{i+1})$;
12. $|L_{PU}(t_{i+1})| \leftarrow \varphi * \alpha(t_i)$;
13. *if* $\text{priority}_{ASU} = 1$ *then*
14. $|L_{ASU}(t_{i+1})| \leftarrow |L_{ASU}(t_i)| * \beta(t_i)$;
15. $L_{ASU}^{Eject}(t_{i+1}) \leftarrow \{ASU_j | sp_j > E(SP) + 2 * \sigma(SP)\}$
16. $|L_{ASU}(t_{i+1})| \leftarrow |L_{ASU}(t_{i+1})| - |L_{ASU}^{Eject}(t_{i+1})|$;
17. $CC_{ASU}(t_{i+1}) \leftarrow \sum_{k=1}^{|L_{ASU}^{Eject}(t_{i+1})|} \left[p_k - \left(sp_k * \frac{p_k}{ccr_{act}} \right) \right]$;
18. *elseif* $\text{priority}_{ASU} = 2$ *then*
19. $|L_{ASU}(t_{i+1})| \leftarrow |L_{ASU}(t_i)| * \beta(t_i)$;
20. *end*
21. $FB(t_{i+1}) \leftarrow \varphi - [|L_{PU}(t_{i+1})| + |L_{ASU}(t_{i+1})|]$;
22. *if* $|L'_{RSU}(t_{i+1})| \leq FB(t_{i+1})$ *then*
23. $L'_{ASU}(t_{i+1}) \leftarrow L_{ASU}(t_{i+1}) \cup L'_{RSU}(t_{i+1})$;
24. $TNR \leftarrow \sum_{j=1}^{|L'_{RSU}(t_{i+1})|} p_j$;
25. *elseif* $0 \leq FB(t_{i+1}) \leq |L'_{RSU}(t_{i+1})|$
26. $L_{RSU}^{Deny}(t_{i+1}) \leftarrow \text{Deny}(L'_{RSU}(t_{i+1}), \text{DenialPolicy})$;
27. $L''_{RSU}(t_{i+1}) \leftarrow L'_{RSU}(t_{i+1}) \setminus L_{RSU}^{Deny}(t_{i+1})$;

28. $L'_{ASU}(t_{i+1}) \leftarrow L_{ASU}(t_{i+1}) \cup L''_{RSU}(t_{i+1}) ;$
 29. $CC_{RSU}(t_{i+1}) \leftarrow \sum_{j=1}^{|L_{RSU}^{Deny}(t_{i+1})|} [p_j * (ccr_{REQ} + 1)] ;$
 30. $TNR \leftarrow \sum_{j=1}^{|L'_{RSU}(t_{i+1})|} p_j - CC_{RSU}(t_{i+1}) ;$
 31. *elseif* $FB(t_{i+1}) < 0$ and $0 \leq (\varphi - |L_{PU}(t_{i+1})|) < |L_{ASU}(t_{i+1})|$ *then*
 32. $L_{ASU}^{Eject}(t_{i+1}) \leftarrow Eject(L_{ASU}(t_{i+1}), EjectionPolicy) ;$
 33. $L'_{ASU}(t_{i+1}) \leftarrow L_{ASU}(t_{i+1}) \setminus L_{ASU}^{Eject}(t_{i+1}) ;$
 34. $CC_{RSU}(t_{i+1}) \leftarrow \sum_{j=1}^{|L'_{RSU}(t_{i+1})|} [p_j * (ccr_{REQ} + 1)] ;$
 35. $CC_{ASU}(t_{i+1}) \leftarrow \sum_{k=1}^{|L_{ASU}^{Eject}(t_{i+1})|} \left[p_k - \left(sp_k * \frac{p_k}{ccr_{act}} \right) \right] ;$
 36. $TNR \leftarrow \sum_{j=1}^{|L'_{RSU}(t_{i+1})|} p_j - [CC_{RSU}(t_{i+1}) + CC_{ASU}(t_{i+1})] ;$
 37. *elseif* $|L_{PU}(t_{i+1})| = \varphi$ *then*
 38. $CC_{RSU}(t_{i+1}) \leftarrow \sum_{j=1}^{|L'_{RSU}(t_{i+1})|} [p_j * (ccr_{REQ} + 1)] ;$
 39. $CC_{ASU}(t_{i+1}) \leftarrow \sum_{k=1}^{|L_{ASU}(t_{i+1})|} \left[p_k - \left(sp_k * \frac{p_k}{ccr_{act}} \right) \right] ;$
 40. $TNR \leftarrow \sum_{j=1}^{|L'_{RSU}(t_{i+1})|} p_j - [CC_{RSU}(t_{i+1}) + CC_{ASU}(t_{i+1})] ;$
 41. $L_{ASU}(t_{i+1}) \leftarrow \{ \} ;$
 42. *end*
 43. $L_{RSU}(t_{i+1}) \leftarrow \{ \} ;$
 44. *end*
-

 Algoritma 13.2. Ön-Rezervasyon Yönetim Sistemi

1. if $BM == 1$ then
 2. Calculate PRSU's waiting time (WT) up to ST_S
 3. if $WT > \mu$
 4. Cancel the Request
 5. else
 6. Update $PU_{Est}(ST_S)$ and $ASU_{Est}(ST_S)$
 7. Calculate $FSB_{Est}(ST_S)$
 8. end if
 9. if $FSB_{Est}(ST_S) > 0$ then
 10. Calculate *Price* through Algorithm 8.9
 11. Calculate Deposit D
 12. if *PRSU* accepts D then
 13. Update TNR and $L_{PRSU}(t_i)$
 14. else
 15. Request cancellation
 16. end if
 17. else if $FSB_{Est}(ST_S) \leq 0$ then
 18. Find nearest time slot t_z
 19. Update $PU_{Est}(t_z)$ and $ASU_{Est}(t_z)$
 20. Calculate $FSB_{Est}(t_z)$
 21. **if** $FSB_{Est}(t_z) > 0$
 22. Goto 11
 23. else if $FSB_{Est}(t_z) \leq 0$
 24. Request cancellation
 25. end if
 26. end if
 27. end if
-

ÖZGEÇMİŞ

1984 yılında İRAN’da doğan Zhaleh SADREDDİNİ; okul ve üniversite eğitim hayatına Tebriz/İRAN’da devam etmiştir. Eğitim süresince Ajor Sofal Tabriz firmasının Bilişim Teknolojileri Sorumlusu olarak üç yıl süreyle çalışmıştır. 2013 yılında KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Türkiyede Doktora eğitimine başlamıştır. Doktora ders dönemini 4.00 ortalamayla bitirip Yabancı Uyruklu Başarı Destek Burs’dan yararlanmıştır. Doktora tez aşamasında Erasmus+ programı ile Brno University of Technology, Çek Cumhuriyetinde araştırmalarına devam etmiştir. Aynı zamanda 2014-2017 yılları arasında Avrasya Üniversitesinde Öğretim Görevlisi olarak çalışmıştır. Çalışma süresince Erasmus Program ve Uzem Koordinatörlüğü yapmış; çalışma döneminin son senesinde Avrasya Üniversitesi Meslek Yüksel Okulu Bilgisayar Programcılığı Bölümünün Bölüm Başkanlığını üstelenmiştir. 2017 yılından itibaren yabancı uyruklu prosedüründe Giresun Üniversitesinde Öğretim Görevlisi olarak çalışmaktadır. İyi derecede İngilizce bilmektedir. Çalışmaları bilişsel radyo ağlar, kablosuz ağlarda kaynak yönetimi ve çok ölçütlü karar verme yöntemleri alanlarındadır.

Hakemli dergilerde yayınlanan makaleler

1. Zhaleh Sadreddini, Pavel Masek, Tugrul Cavdar, Aleksandr Ometov, Jiri Hosek, Irina Gudkova, ve Sergey Andreev, Dynamic Resource Sharing in 5G with LSA: Criteria-Based Management Framework, Wireless Communications and Mobile Computing, Hindawi 01/2018.
2. Tuğrul Çavdar, Zhaleh Sadreddini, ve Erkan Güler, Pre-Reservation based Spectrum Allocation for Cognitive Radio Network, Telecommunication Systems Journal, Springer 01/2018.
3. Nurhan Gürsel Özmen, Ebru Durmuş, ve Zhaleh Sadreddini, Müzik Sınıflandırması Beyin Bilgisayar Arayüzü Uygulamaları İçin Bir Alternatif Olabilir Mi?, Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 08/2017.
4. Zhaleh Sadreddini, ve Tuğrul Çavdar, QoS-driven pricing policy for cognitive radio networks, Sakarya University Journal Of Science, 08/2017.
5. Pavel Masek, Zhaleh Sadreddini, Tugrul Cavdar and Jiri Hosek, On the Performance of Spectrum Handoff Framework for Next-generation 5G Networks. Infocommunications Journal; Volume IX, 10/2017.
6. Tuğrul Çavdar, Erkan Güler, ve Zhaleh Sadreddini, Instant Overbooking Framework for Cognitive Radio Networks, Computer Networks, Elsevier 01/2015.
7. Zhaleh Sadreddini, Impact of Using Several Criteria for Buffer Management in Vehicular Delay Tolerant Networks, World Applied Sciences Journal, 09/2013.

Conference Yayınları

1. Pavel Masek, Zhaleh Sadreddini, Tugrul Cavdar, ve Jiri Hosek, Dynamic User-centric Spectrum Handoff in 5G Systems: Optimized Criteria Based Resource Management Framework, 9th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT), Munich, Germany, 11/2017.
2. Pavel Masek, Zhaleh Sadreddini, Tugrul Cavdar, ve Jiri Hosek, Modeling of spectrum handoff in 3GPP LTE-A indoor deployment, 40th Anniversary of International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP), Barcelona, Spain; 07/2017.
3. Zhaleh Sadreddini, Pavel Masek, Tugrul Cavdar, Jiri Hosek, ve Erkan Guler, Dynamic Decision-Based Spectrum Sharing Framework for Next-generation (5G) Systems, 25th Signal Processing and Communications Applications Conference, Antalya, SIU 2017.
4. Zhaleh Sadreddini, ve Tugrul Cavdar, Performance analysis of dynamic spectrum management in cognitive radio networks, Electric Electronics, Computer Science, Biomedical Engineerings' Meeting (EBBT), 04/2017.
5. Zhaleh Sadreddini, Tuğrul Çavdar, ve Hossein Barghi Jond, A Distance Measurement Method Using Single Camera For Indoor Environments, 39th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP 2016), Vienna, Austria; 06/2016.
6. Zhaleh Sadreddini, Tuğrul Çavdar, ve Erkan Güler, Performance Analysis of the Dynamic Switch System Based on User Activity in Cognitive Radio Network, 39th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP 2016), Vienna, Austria; 06/2016.
7. Zhaleh Sadreddini, ve Tugrul Cavdar, General resource management via several message criteria in Vehicular Delay Tolerant Networks, 24th Signal Processing and Communication Application Conference (SIU); 05/2016.
8. Zhaleh Sadreddini, Erkan Güler, ve Tuğrul Çavdar, PSO-Optimized Instant Overbooking Framework for Cognitive Radio Networks. 38th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP 2015), Prague, Czech Republic, 07/2015.
9. Erkan Güler, Zhaleh Sadreddini, ve Tuğrul Çavdar, Multi-Path Route Discovery Algorithm for Cognitive Radio Ad Hoc Networks Using Algebraic Connectivity, 38th International Conference on Telecommunications and Signal Processing, Prague, Czech Republic, TSP 2015.
10. Zhaleh Sadreddini, Ebru Durmuş, ve Nurhan Gürsel Özmen, EEG Verilerinden Farklı Müzik Türü ve Zihinsel Görevlerin Ayırt Edilmesi, Akıllı Sistemlerde Yenilikler ve Uygulamaları (ASYU), İzmir; 10/2014.
11. Ebru Sayılğan, Zhaleh Sadreddini, ve Nurhan Gürsel Özmen, Beyin Bilgisayar Arayüzü Sistemleri İçin Uygun Öznitelik Ve Siniflandırıcı Seçimi, Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı, Kocaeli, 09/2014.
12. Zhaleh Sadreddini, Evaluating the impact of using several criteria for buffer management in VDTNs, Proceeding of the third international conference on contemporary issues in computer and information sciences, IRAN, 05/2012.