

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YENİ NESİL HABERLEŞME SİSTEMLERİ İÇİN YENİ BİR ZAMANLAMA
ALGORİTMASININ GELİŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Fatih Burak KOYUN

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Telekomünikasyon Mühendisliği Programı

HAZİRAN 2019

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YENİ NESİL HABERLEŞME SİSTEMLERİ İÇİN YENİ BİR ZAMANLAMA
ALGORİTMASININ GELİŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Fatih Burak KOYUN
(504151310)**

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı

Telekomünikasyon Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mesut KARTAL

HAZİRAN 2019

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 504151310 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Fatih Burak KOYUN, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “YENİ NESİL HABERLEŞME SİSTEMLERİ İÇİN YENİ BİR ZAMANLAMA ALGORİTMASININ GELİŞTİRİLMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Mesut KARTAL**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Sedef Kent PINAR**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Dr. Serdar KARGIN**
Beykent Üniversitesi

Teslim Tarihi : **03 Mayıs 2019**
Savunma Tarihi : **13 Haziran 2019**





Eşim ve aileme,



ÖNSÖZ

Bu konuda bana çalışma fırsatı veren, bilgi tecrübe ve katkılarıyla beni sürekli destekleyip yol gösteren danışman hocam Prof. Dr. Mesut Kartal'a,

Çalışmalarımın başından sonuna kadar hiçbir zaman benden yardımını esirgemeyip bilgi ve tecrübesiyle elinden gelen katkıyı sağlayan Dr. Mehmet İzzet SAĞLAM'a,

Eğitim hayatım boyunca maddi ve manevi destekleriyle her zaman arkamda duran aileme ve tez çalışmam boyunca beni sürekli cesaretlendiren eşime teşekkürlerimi sunarım.

Mayıs 2019

Fatih Burak Koyun
Elektrik-Elektronik Mühendisi



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xix
SUMMARY	xxi
1.	GİRİŞ
....1	
2. RADYO KAYNAK YÖNETİMİ	5
2.1 Hibrit Otomatik Tekrar Talebi	5
2.2 CQI Raporlama	5
2.3 Adaptif Modülasyon ve Kodlama	6
2.4 Kaynak bloğu	6
2.5 Kaynakların Zamanlanması.....	8
3. BAŞLICA ZAMANLAMA ALGORİTMALARI	11
3.1 Best CQI.....	11
3.2 Round Robin	11
3.3 Proportional Fair	12
3.4 Zamanlayıcılarda Performans Parametreleri	13
3.4.1 Adalet	13
3.4.2 Througput.....	14
3.5 Literatürdeki Çalışmalar	14
4. ÖNERİLEN ALGORİTMA.....	17
4.1 Önerilen Algoritmanın Açıklaması	17
5. SİMÜLASYON SONUÇLARI.....	21
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	29
KAYNAKLAR	31
ÖZGEÇMİŞ.....	33



KISALTMALAR

FDMA	: Frequency Division Multiple Access
TDMA	: Time Division Multiple Access
3G	: Third Generation
LTE	: Long Term Evolution
DFTS	: Discrete Fourier Transform Spread
OFDMA	: Orthogonal Frequency-Division Multiple Access
SC-FDMA	: Single-Carrier Frequency Division Multiple Access
MIMO	: Multiple-Input And Multiple-Output
OFDM	: Orthogonal Frequency-Division Multiplexing
PAPR	: Peak to Average Power Ratio
EDGE	: Enhanced Data rates for GSM Evolution
RR	: Round Robin
CQI	: Channel Quality Indicator
PF	: Proportional Fair
TTI	: Transmission Time Interval
RB	: Resource Block
UE	: User Equipment
RNC	: Radio Network Controller
BSC	: Base Station Controller
eNodeB	: Evolved NodeB
RRM	: Radio Resource Management
HARQ	: Hybrid Automatic Repeat Request
ARQ	: Automatic Repeat Request
AMC	: Adaptive Modulation and Coding
ACK	: Acknowledge
NACK	: Negative Acknowledgement
DTX	: Discontinuous Transmission
PDSCH	: Physical Downlink Shared Channel
PDCCH	: Physical Downlink Control Channel
SINR	: Signal to Interference plus Noise Ratio
MCS	: Modulation and Coding Scheme
QPSK	: Quadrature Phase Shift Keying
QAM	: Quadrature Amplitude Modulation

RE	: Resouce Element
QoS	: Quality of Service
CSI	: Channel State Indicator
MAC	: Media Access Controller
PDU	: Protocol Data Unit
PMI	: Precoding Matrix Indicator
QCI	: QoS Class Identifier
GBR	: Guaranteed Bit Rate
MBR	: Maximum Bit Rate
AMBR	: Aggregate Maximum Bit Rate
MCS	: Modulation and Coding Scheme



SEMBOLLER

M	: Öncelik Metriği
T	: Geçmişteki Ortalama Hız
τ	: Anlık Zaman
Δ	: En Son Kaynak Tahsis Zamanı
R	: Anlık Hız
k	: Kullanıcı İndisi
α	: Sabit Sayı
β	: Sabit Sayı
t_c	: Pencere boyutu
t	: Zaman
α	: Sabit Sayı



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : CQI – MCS eşleştirme tablosu	6
Çizelge 2.2 : Bant genişliğine karşı düşen RB sayıları.....	8
Çizelge 5.1 : Simülasyon parametreleri.....	21
Çizelge 5.1(devam) : Simülasyon parametreleri.....	22
Çizelge 5.2 : Simülasyon sonuçları	24
Çizelge 5.3 : Best CQI algoritmasına göre yüzdesel fark sonuçları	25



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : LTE Radyo çerçevesi	7
Şekil 2.2 : Kaynak bloğu ve elementi	7
Şekil 2.3 : OFDMA alttaşıyıcıları.....	8
Şekil 2.4 : Zamanlayıcı blok diyagramı.....	10
Şekil 3.1 : Zamanlama algoritmaları	13
Şekil 4.1 : Best CQI algoritması blok diyagramı.....	18
Şekil 4.2 : Önerilen algoritmaya ait blok diyagramı.	20
Şekil 5.1 : Önerilen algoritmanın diğer modellere karşılaştırma grafiği	23
Şekil 5.2 : Simülasyon sonuçları grafik gösterimi.....	26
Şekil 5.3 : Dağıtım adaleti karşılaştırması.....	28



YENİ NESİL HABERLEŞME SİSTEMLERİ İÇİN YENİ BİR ZAMANLAMA ALGORİTMASININ GELİŞTİRİLMESİ

ÖZET

İlk mobil haberleşme sistemi 1980'lerde hayatımıza girmiştir. Analog sistemler üzerine kurulu ilk nesilden sonra ikinci nesil sistemlerle birlikte mobil şebeke üzerinden ses trafiğine ek olarak veri trafiğinin taşınmasına da başlanmıştır. Üçüncü nesil sistemlerle birlikte artan bant genişliği ve veri hızları mobil cihazlardan multimedya servislere erişimi mümkün kılmıştır. Bu gelişmeler mobil kullanıcı ve cihaz sayısını büyük bir hızla arttırmıştır.

Dördüncü nesil sistemlerle birlikte sağlanan yüksek hızlı bağlantı imkanıyla birlikte bu artış hızı daha da yükselmiştir. Müşteri tarafındaki artan mobil cihaz ve kapasite ihtiyacı, mobil operatörler tarafında gün geçtikçe yönetimi zorlaşan, sistem kaynaklarını kullanıcılar arasında paylaşırma sorununu ortaya çıkarmıştır. Günümüzde internet trafiğinin büyük çoğunluğunu yüksek çözünürlüklü video, IPTV, çevrimiçi oyun, sosyal medya gibi uygulamalar oluşturmaktadır. Müşteriler artık sabit genişbant ağları kullanmayı azaltarak onun yerine mobil genişbant ağları kullanmaya yönelmektedir. Yakın gelecekte hayatımıza dahil olması beklenen beşinci nesil mobil haberleşme sistemleriyle birlikte nesnelerin interneti (Internet of Things - IoT) teknolojisi mobil şebekeden kaynak talebinde bulunacak mobil cihaz sayısını daha da arttıracaktır.

Kullanıcılara yüksek veri hızı sağlamanın yanı sıra, bu hızı adaletli bir şekilde sağlamak da bir o kadar önemlidir. Müşterilerden sadece küçük bir kesiminin yüksek veri hızlarına ulaşmaları sistem kaynaklarının verimli kullanılması açısından iyi olsa da, bu durum genel müşteri memnuniyeti açısından kabul edilebilir bir durum değildir. Bu noktada radyo kaynaklarının kullanıcılara en verimli şekilde paylaştırılmasının önemi ortaya çıkmaktadır.

Radyo kaynaklarının paylaştırılması için çeşitli zamanlama algoritmaları geliştirilmiştir. Ancak mobil cihaz sayısındaki artışın radyo kaynakları tarafındaki artış hızının çok üzerinde olması yeni algoritma ihtiyaçlarına sebep olmaktadır. Zamanlama algoritmalarının tasarımındaki en büyük zorluklardan biri olarak kullanıcılar arasındaki adalet ve sağlanan veri hızınının birlikte maksimize edilmesi gösterilebilir.

Bahsedilen bu gereksinimler doğrultusunda bu çalışmada, algoritmalar arasında en yüksek veri hızını sağlayan Best CQI algoritmasının adalet ölçütünün artırılması hedeflenmiştir. Bu amaca yönelik olarak; kaynak tahsis edilecek kullanıcının seçiminde, karar mekanizması geçmiş kaynak kullanımı bilgisinin de eklenmesiyle yeniden düzenlenmiştir. Elde edilen algoritma ile adalet ölçütünün önemli derecede artırılmasıyla beraber veri hızındaki üstünlük de korunmuştur.



DEVELOPING A RADIO RESOURCE SCHEDULER FOR MOBILE SYSTEMS

SUMMARY

The first generation of mobile communication systems was developed during the seventies and launched 1980s. They all have in common that the user traffic, which is voice is transmitted with analog Frequency Division Multiple Access (FDMA). The new thing with second-generation systems was that they supported both voice and data traffic with digital Time Division Multiple Access (TDMA). With the increase in demand for multimedia and broadband services, the next step has been the third generation communication systems. The video was also conveyed over the mobile network with voice and data transmission. The third generation system for Release 99 (3G - Third Generation), High Speed Downlink Packet Access (3.5 G), High Speed Uplink Packet Access (3.5 G), High Speed Packet Access (HSPA) various versions such as High Speed Packet Access + (3.9 G) have been developed. The Third Generation Partnership Project (3GPP) has standardized Long Term Evolution (LTE) to make a structure for 3G evolution towards 4G. LTE is an all-IP packet based system which is aims supporting high data rates, low latency, improved system capacity. In order to achieve these targets, it employs some technologies such as Orthogonal Frequency-Division Multiple Access (OFDMA), Single-Carrier Frequency Division Multiple Access (SC-FDMA), Multiple-Input And Multiple-Output (MIMO), and Hybrid Automatic Repeat Request (HARQ).

OFDMA is a multiple-access modulation scheme based on resources in the time and frequency domains. The smallest resource in the frequency domain is subcarriers and the smallest unit in the time domain is slot. For scheduling, the smallest unit is resource block (RB), which occupies 12 subcarriers in frequency domain, and 1ms in time domain.

The uplink transmission technique, SC-FDMA, is realized in a similar manner as for the downlink (OFDM) and is also called Discrete Fourier Transform Spread OFDM (DFTS-OFDM). The time domain structure is also similar in uplink and downlink. SC-FDMA has much lower Peak to Average Power Ratio (PAPR) than OFDM. This is one the reasons for the choice of SC-FDMA for the uplink since the power amplifier in the user equipment (UE) can be manufactured lower cost then.

MIMO refers to the use of multiple antennas for transmission and reception in a cell. Multiple antenna configurations are expressed in the form $m \times n$ MIMO, where m represents the number of transmit antennas and n represents the number of receive antennas. For example, downlink 2×2 MIMO means that the eNodeB uses two antennas for transmission and the UE uses two antennas for reception; downlink 4×4 MIMO means that the Evolved NodeB (eNodeB) uses four antennas for transmission and the UE uses four antennas for reception.

A Medium Access Control (MAC) HARQ layer with fast feedback provides a means for quickly correcting most errors from the radio channel. To achieve low delay and

efficient use of radio resources the HARQ operates with a native error rate which is sufficient only for services with moderate error rate requirements such as, for instance, VoIP. Lower error rates are achieved by letting an outer Automatic Repeat reQuest (ARQ) layer in the eNodeB handle the HARQ errors.

Schedulers are located at the Media Access Control (MAC) layer. The basic function of a scheduler is to allocate appropriate system resources to UEs in each subframe for uplink and downlink transmissions, without which the UEs would be unable to transmit and receive data.

In digital communications systems, modulation is the process of varying the amplitude, frequency, or phase of a carrier with a digital baseband signal to convey information using the carrier. A higher-order modulation scheme is one that modulates more bits of information into each modulation symbol, resulting in higher overall spectral efficiency of LTE networks. However, a higher modulation order also requires better channel quality for the receiver to be able to maintain a signal to interference plus noise ratio (SINR) that is high enough to allow for accurate demodulation of the signal. The UE measures its current channel situation to calculate Channel Quality Indicator (CQI) and then sends feedback to the eNodeB. Finally, the eNodeB relates this CQI index to prefer a specific level of MCS and designates RBs accordingly for this UE.

In the downlink, data is terminated in UEs instead of eNodeBs. Therefore, eNodeBs cannot measure the downlink SINR for evaluating downlink channel quality. UEs report channel quality indicators (CQIs) to eNodeBs to indicate the downlink channel quality of services from the eNodeBs. The eNodeBs then determine which modulation and coding scheme (MCS) to use based on these CQIs. CQI values include 0 to 15. The larger the CQI value, the better the channel quality.

Modulation and coding schemes (MCSs) are selected during scheduling. Each MCS represents a specific combination of a modulation scheme and a channel code rate. Scheduling is the process where the scheduler allocates RBs and selects MCSs for UEs.

Common modulation schemes include downlink and uplink quadrature phase shift keying (QPSK), downlink and uplink 16 quadrature amplitude modulation (16QAM), and downlink 64QAM. To meet the demand for the ever increasing data rates required for today's services, 3GPP has also introduced uplink 64QAM and downlink 256QAM. If channel quality is good enough, these modulation schemes help increase uplink and downlink transmission efficiency for UEs.

eNodeBs use different MCSs to ensure transmission efficiency and the quality of UE services. If the channel quality is good, an eNodeB selects an MCS with a high-order modulation scheme combined with a high code rate. If the channel quality is poor, the eNodeB selects one with a low-order modulation scheme and a low code rate (the code rate is higher if fewer redundant bits are inserted). A CQI table maps CQI indexes to modulation schemes.

The development of mobile communication systems has also triggered an increase in the number of users. With the high-speed connection, this rate of increase has risen. Decent use of resources is critical to achieving targeted data rates and improving service quality. The scheduling of resource allocation is a radio resource management problem. Various algorithms have been developed for scheduling of

resources. The basic scheduling algorithms in the literature are Round Robin (RR), Best CQI and Proportional Fair (PF).

In this thesis, it is aimed to develop a scheduling algorithm which may be an alternative to the existing scheduling algorithms in the literature. A new scheduling algorithm that balances the performance between fairness and throughput is proposed. By the proposed scheduling algorithm, it is aimed to increase the fairness index which can be considered the most negative aspect of Best CQI algorithm.

The number of resource blocks that mobile devices have reached in the past has been used in the decision mechanism. Performance metrics compared with Best CQI, PF, and RR.

The proposed algorithm is better than the Best CQI algorithm in terms of fairness. At the same time, it has been achieved to allocate resources to users who have never reached the resources. According to the results of the simulation, the criteria of throughput fairness increased together with the distribution fairness criteria.



1. GİRİŞ

Birinci nesil mobil haberleşme teknolojisi 1980'lerde geliştirilmiştir. Analog modülasyon tipini kullanan bu sistem sadece ses sinyalini FDMA (Frequency Division Multiple Access) erişim tekniği ile karşı tarafa iletme üzerine tasarlanmıştır. Bu analog sistem, bilgi güvenliği, sayısal veri iletilmemesi, uluslararası dolaşım (roaming) gibi meseleler için çözüm sağlayamamıştır.

İkinci nesil mobil haberleşme sistemleri ile veri trafiğinin de tıpkı ses sinyali gibi mobil şebeke üzerinden taşınmasına başlanmıştır. Ses ve veri trafiği devre anahtarlama ağı üzerinden taşınmıştır. Bu sistemde TDMA (Time Division Multiple Access) tekniği kullanılmıştır. Arama bekletme ve kısa mesaj servisinin kullanımı da ilk olarak hayatımıza ikinci nesil mobil haberleşme sistemleri ile girmiştir. Analog sistemlerden sayısal sistemlere geçilmesiyle birlikte kapasite ve bilgi güvenliği sorunlarında da gelişme sağlanmıştır.

Multimedya ve genişbant servislere olan talebin artışıyla beraber bir sonraki adım üçüncü nesil haberleşme sistemleri olmuştur. Ses ve veri iletimiyle birlikte video da mobil şebeke üzerinden taşınmaya başlanmıştır. Üçüncü nesil sistem için Release 99 (3G - Third Generation), High Speed Downlink Packet Access (3,5 G), High Speed Uplink Packet Access (3,5 G), HSPA High Speed Packet Access (3,75 G), HSPA High Speed Packet Access + (3,9 G) gibi çeşitli versiyonlar geliştirilmiştir.

Long Term Evolution (LTE) dördüncü nesil mobil haberleşme teknolojisidir. Üçüncü nesle kıyasla veri hızlarında artma, gecikme sürelerinde azalma, spektrum verimliliğinde artma, düşük maliyet ve operasyonel basitlik gibi avantajlar getirmiştir. Mobil haberleşme ağlarını en az kablolu genişbant ağlar kadar iyileştirmeyi hatta daha da öteye geçmeyi hedeflemektedir. Bu hedefleri elde etmek için, OFDMA (Orthogonal Frequency-Division Multiple Access) [1], SC-FDMA (Single-Carrier Frequency Division Multiple Access) [2] ve MIMO (Multiple-Input And Multiple-Output) [3] gibi çeşitli teknolojiler kullanılmaktadır.

OFDMA aşağı y6nl6 trafik iletiminde kullanılmaktadır. OFDMA teknolojisinde frekans bandı, birbirlerine vekt6rel olarak dik olan alt bantlara ayrılmıştır. Çoklu kullanıcı trafikleri altbantlara bindirilerek OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) ile taşınabilmektedir. SC-FDMA yukarı y6nl6 trafik iletiminde kullanılmaktadır. Yukarı y6nde farklı bir erişim y6nteminin kullanılmasındaki sebep mobil cihazdaki pil g6c6n6n sınırlı olmasıdır. SC-FDMA d6ř6k PAPR (Peak-to-Average Power Ratio - Tepe g6/Ortalama G6 Oranı) sağlaması nedeniyle kullanıcı ekipmanında kullanılmaktadır.

MIMO sistemleri, veri iletiminin sağamlığını arttırmak ve veri hızlarını arttırmak için kullanılır. Tipik olarak, bir $m \times n$ MIMO sistemi m iletim ve n alıcı anteninden oluşur.

Mobil teknolojilerdeki gelişim ile beraber g6n6m6zde mobil cihaz sayısı b6y6k bir hızla artmaktadır. 2018 yılı raporlarına g6re d6nya genelinde 7,9 milyar mobil cihaz kullanılmaktadır. Bu sayı her yıl y6zde iki oranında artış g6stermektedir. Bu cihazlardan 5,9 milyar adeti mobil geniş bant erişimine sahiptir. Mobil genişbant erişim oranı yıllık y6zde on beş artış trendine sahiptir. 2024 yılı beklentilerine g6re tekil mobil kullanıcı sayısı 6,2 milyara, mobil genişbanta erişen cihaz sayısı ise 8,4 milyara ulaşacaktır. Sadece 2018 son çeyrekte satılan 375 milyon yeni akıllı telefon ile akıllı telefon kullanım oranı y6zde 65 seviyesine ulaşmıştır [4]. 6n g6r6lere g6re bu oran 2025 yılında y6zde 86 seviyelerine ulaşarak global internet kullanımının d6rtte 66 mobil cihazlar 6zerinden sağlanacaktır.

Son bir yılda LTE abonelerinin sayısı ise 240 milyonluk bir artış ile 3,6 milyara ulaşmıştır. Buna karşılık 2G/EDGE (Enhanced Data rates for GSM Evolution) abone sayısı 170 milyon, 3G abone sayısı ise 45 milyon azalmıştır [5]. Gelecekte 5G ve IoT (Internet of Things) gibi teknolojiler hayatımıza girdikçe mobil cihaz sayısı ve trafik miktarları katlanarak artmaya devam edecektir. Sadece IoT bağlantı sayısı 2024 yılı için 4,1 milyar olarak tahmin edilmektedir [6].

Mobil cihaz sayısındaki artış radyo kaynaklarının y6netimi meselesinin 6nemini g6n geçtikçe daha da arttırmaktadır. Kaynakların doğru bir şekilde kullanılması, hedeflenen veri hızlarını yakalamak ve servis kalitesini y6kseltmek için kritik 6nem taşımaktadır.

Kaynak tahsisinin zamanlanması da bir radyo kaynak yönetimi sorunudur. Kaynakların zamanlanması için çeşitli algoritmalar geliştirilmiştir. Literatürdeki temel zamanlama algoritmaları RR, Best CQI ve PF algoritmalarıdır.

Zamanlayıcı algoritmalar hakkında yapılan çalışmalarda adalet ve throughput ölçütleri karşılaştırma yapılmak için kullanılmaktadır. Throughput bir haberleşme sisteminde vericiden alıcıya gönderilen başarılı bilgi miktarının saniye başına bit cinsinden oranıdır. Zamanlama algoritmalarında ele alınması gereken zorluklardan en önemlisi, tüm kullanıcılara adaletli bir şekilde yüksek throughput sağlayacak şekilde kaynakların kullanıcılar arasında paylaştırılmasıdır. Bu konuda yapılan çalışmalarda throughput ile adalet arasında bir takas ilişkisi olduğu gösterilmiştir. Her ikisini aynı anda maksimize etmek mümkün olamamaktadır.

LTE radyo kaynaklarının zamanlanması hakkında yapılan çalışmalarda PF ve Best CQI algoritmalarının pek çok varyasyonuna rastlanmaktadır. Hepsindeki ortak özellik, adalet ve throughput arasındaki takas ilişkisini kullanarak hem müşteri memnuniyetini sağlayacak hem de sistemlerin verimli kullanılmasını sağlayacak bir orta yol bulmaktır.

[7] nolu çalışmada, Best CQI algoritmasının throughput açısından başarılı sonuçlar verirken adalet açısından başarılı olmadığı gösterilmiştir. [8] nolu çalışmada önerilen algoritma, kaynak tahsisi için her TTI (Transmission Time Interval) [9] nolu çalışmada açıklanan Görevlendirme Modelini kullanılmıştır. Algoritma throughput ve adalet performansı açısından Round Robin ve Best CQI arasında yer almıştır. [10] nolu çalışmada Best CQI ve Round Robin algoritmaları aynı TTI içinde birlikte kullanılmıştır. Bu işlem sonucunda throughput ve adalet performansı olarak Round Robin ve Best CQI arasında konumlanan bir algoritma elde edilmiştir. [11] nolu çalışmada 1,4 MHz bantgenişliği ve 6 kaynak bloğu kullanılan testlerde, geçmişte en düşük throughput ortalamasına sahip üç kullanıcıya, kaynak blokları, sırasıyla 6:0:0, 4:1:1, 3:2:1, 2:2:2 oranında tahsis edilmiştir. Kullanıcılar iyi kanal koşullarına sahipken, önerilen algoritma Best CQI, PF, RR algoritmaları arasında en iyi adalet değerini vermiştir. [12] nolu çalışmada önerilen algoritmanın sıralama metriği hesaplanırken hem CQI bilgisi hem de geçmiş ortalama throughput bilgisi kullanılmaktadır. PF sıralama metriği, ortalama throughput hesaplama yöntemi değiştirilerek formüle dahil edilmiştir. Orjinal PF ve Best CQI algoritmalarına göre daha iyi bir throughput-adalet dengesi elde edilmiştir. [13] nolu çalışmada RR ve

Best CQI algoritmasının kombinasyonundan oluşan bir yapı önerilmiştir. Önerilen yapıda eğer kaynak bloğu (Resource Block – RB) sayısı kullanıcı cihazı (User Equipment – UE) sayısının tam katı ise tüm RB’ler UE’ler arasında eşit olarak RR paylaştırılmaktadır. Eğer RB sayısı UE sayısına tam olarak bölünemiyorsa bu sefer RB’ler Best CQI esasına göre dağıtılır. Önerilen yapı sistem throughput ve adalet arasında denge sağlamıştır. Sonuçlar RR algoritmasına göre daha iyi throughput, Best CQI’a göre daha adil bir sonuç sağlamıştır.

Bu tezde literatürdeki mevcut zamanlama algoritmalarına alternatif olabilecek bir zamanlama algoritması geliştirilmesi amaçlanmıştır. Adalet ve throughput arasındaki performansı dengeleyen yeni bir zamanlama algoritması önerilmiştir. Önerilen zamanlayıcı algoritması ile Best CQI algoritmasının en olumsuz yanı olarak kabul edilebilecek olan adalet ölçütünde artış sağlanması hedeflenmiştir. Kullanıcıların geçmişte ulaşmış olduğu kaynak bloğu sayısı, karar mekanizmasına entegre edilerek geliştirilen algoritmanın performans çıktıları Best CQI, PF ve RR referans alınarak tartışılmıştır. Yapılan değişiklik ile PF ve RR algoritmalarından daha iyi bir throughput performansı alınmaya devam edilmiştir. Adalet açısından kıyaslandığında Best CQI algoritmasından daha iyi bir sonuç elde edilmiştir. Aynı zamanda kaynağa hiç ulaşamayan kullanıcılara da kaynak tahsis etmek başarılmıştır. Simulasyon sonuçlarına göre throughput adaleti ölçütü ile dağıtım adaleti ölçütünün arttığı da gösterilmiştir.

2. RADYO KAYNAK YÖNETİMİ

LTE mimarisinden önce ikinci ve üçüncü nesil sistemlerde kullanılan RNC (Radio Resource Controller) , BSC (Base Station Controller) gibi çekirdek şebekede konumlanmış olan kontrol birimleri, LTE mimarisinde yer almamaktadır. Mobil şebeke mimarisinde kullanıcı ile çekirdek şebeke arasında konumlanan eNodeB (Evolved NodeB), tüm radyo kaynak yönetiminden (Radio Resource Management - RRM) sorumludur. Kaynakların kullanıcılara tahsisinin zamanlanması da, radyo kaynak yönetimi faaliyetlerinden biridir.

LTE’de radyo kaynak yönetimi, HARQ (Hybrid Automatic Repeat Request), CQI raporlama, AMC (Adaptive Modulation and Coding) ve RB tahsisinin zamanlanması gibi görevleri yürütür.

2.1 Hibrit Otomatik Tekrar Talebi

HARQ geri bildirimi, verilerin doğru şekilde iletilip iletilmediğini gösterir. Onaylama (ACK), negatif onay (NACK) ve süresiz aktarım (DTX) olmak üzere üç tür HARQ geri bildirimi vardır.

2.2 CQI Raporlama

Her TTI, eNodeB kullanıcı cihazından kanal kalite göstergesini (CQI) raporlamasını istemektedir. UE, CQI hesaplamasını eNodeB’den gelen referans sinyal ölçümü ile yapmaktadır. eNodeB’den kullanıcı cihazına doğru olan veri trafiği gönderimi Physical Downlink Shared Channel (PDSCH), sinyalleşme trafiği Physical Downlink Control Channel (PDCCH) üzerinden yapılır.

Kullanıcı cihazından eNodeB’ye doğru olan yukarı yönde sinyalleşme trafiği için Physical Uplink Control Channel (PUCCH), veri trafiği için Physical Uplink Shared Channel (PUSCH) kullanılmaktadır.

2.3 Adaptif Modülasyon ve Kodlama

Her CQI değerinin eşleştiği belirli bir SINR (Signal to Interference plus Noise Ratio) değeri vardır. SINR değerine bakılarak kanalda kullanılması gereken hem modülasyon ve kodlama şemasının seçimi (Modulation and Coding Scheme - MCS) hem de kanal kodlama oranının seçimi yapılmaktadır.

Her MCS, bir modülasyon şemasının ve bir kanal kod oranının spesifik bir kombinasyonunu temsil etmektedir. Modülasyon şemaları, QPSK (Quadrature Phase Shift Keying), 16QAM (Quadrature amplitude modulation) ve 64QAM' den oluşur. CQI – MCS eşleştirme tablosu Çizelge 2.1'de gösterilmektedir.

Çizelge 2.1 : CQI – MCS eşleştirme tablosu [14].

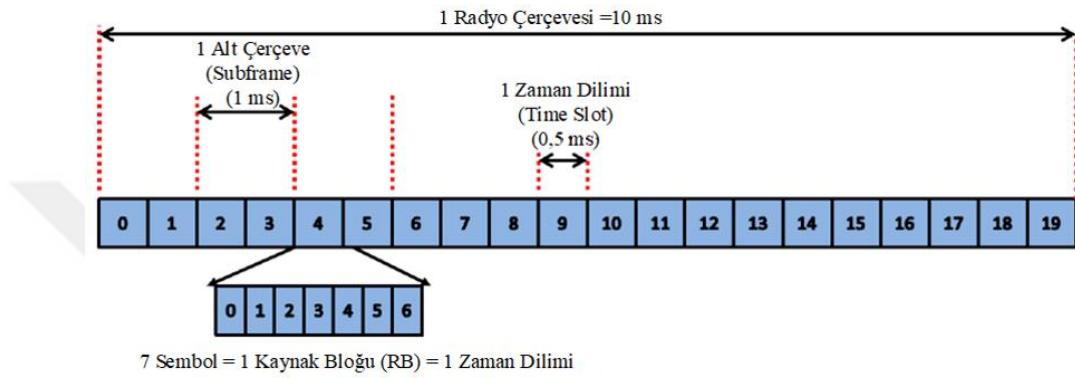
CQI Göstergesi	Modülasyon	Kodlama oranı x 1024	Verimlilik
0		Kapsama alanı dışı	
1	QPSK	78	0,1523
2	QPSK	120	0,2344
3	QPSK	193	0,3770
4	QPSK	308	0,6016
5	QPSK	449	0,8770
6	QPSK	602	1,1758
7	16-QAM	378	1,4766
8	16-QAM	490	1,9141
9	16-QAM	616	2,4063
10	64-QAM	466	2,7305
11	64-QAM	567	3,3223
12	64-QAM	666	3,9023
13	64-QAM	772	4,5234
14	64-QAM	873	5,1152
15	64-QAM	948	5,5547

2.4 Kaynak Bloğu

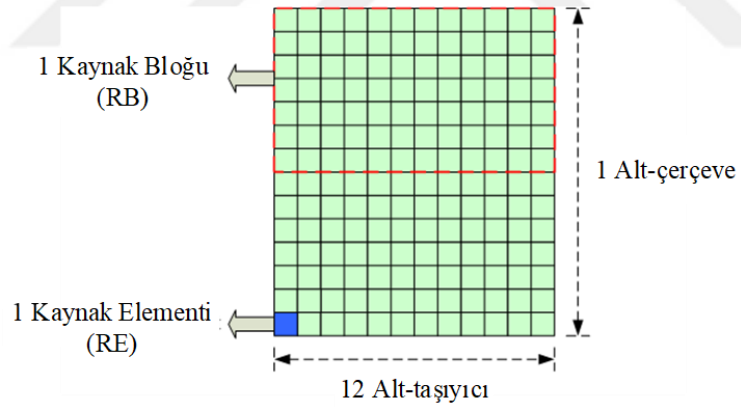
Kullanıcılar için tahsis edilen aşağı yönlü radyo kaynakları, zaman ve frekans ekseninde tanımlanan kaynak bloklarından (RB) oluşmaktadır. Frekans ekseninde darbantlı OFDMA alttaşıyıcıları bulunur. Zaman eksenini 10 ms'lik radyo çerçevelerine Şekil (2.1)'de gösterildiği gibi ayrılmıştır. Bir RB, zaman ekseninde 0,5 ms (slot), frekans ekseninde 12 tane 15 kHz alt-taşıyıcıdan oluşmaktadır [15]. Kaynak elemanları (Resource Element - RE), LTE sistemindeki en küçük zaman-

frekanslı kaynak birimleridir Şekil (2.2). Bir RE, frekans alanındaki bir alt taşıyıcıyı ve zaman alanındaki bir OFDM sembolünden oluşmaktadır. OFDM’de normal çevrimsel önek (cyclic prefix) kullanılıyorsa $12 \times 7 = 84$ RE, genişletilmiş çevrimsel önek kullanılıyorsa $12 \times 6 = 72$ RE bir RB meydana getirir.

eNodeB, kaynak bloklarını UE’ler arasında dinamik olarak paylaşmaktadır. Kaynakların paylaşılması 1 ms aralıklarla tekrar edilmektedir. Bu aralıklara TTI adı verilmektedir.



Şekil 2.1 : LTE Radyo çerçevesi.



Şekil 2.2 : Kaynak bloğu ve elementi.

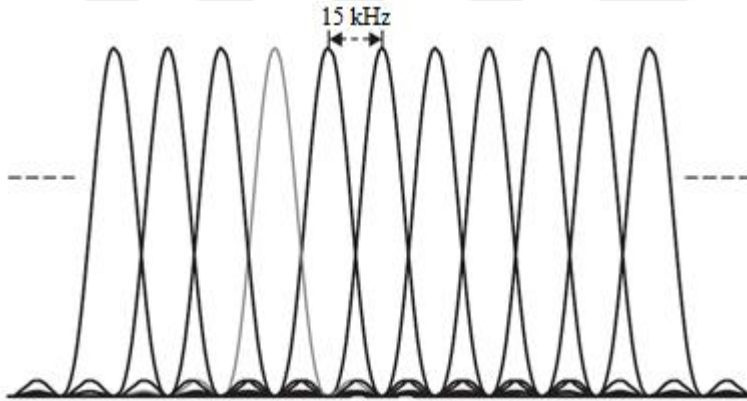
Bir TTI’da aynı UE’ye birden fazla RB tahsis edilebilir. RB sayısı kullanılan frekans spektrumuna göre değişkenlik göstermektedir. LTE teknolojisinde kullanılabilecek bant genişliğine ve karşı düşen RB sayısı Çizelge 2.2’ de gösterilmiştir.

Çizelge 2.2 : Bant genişliğine karşı düşen RB sayıları.

Frekans Bandı (MHz)	RB Sayısı
1,4	6
3	15
5	25
10	50
15	75
20	100

2.5 Kaynakların Zamanlanması

LTE, aşağı yönde OFDMA erişim yöntemini kullanmaktadır. OFDMA ile frekans bandı çok sayıda alt banda bölünerek çok sayıda taşıyıcı frekans elde edilmektedir Şekil (2.3). Bu sayede semboller arası girişim ve zayıflamalara karşı daha fazla direnç sağlanmaktadır.



Şekil 2.3 : OFDMA alttaşıyıcıları.

Zamanlayıcı, aşağı yönde sistem mesajlarının ve kullanıcı trafiğinin iletilmesi için PDSCH zaman ve frekans kaynaklarını tahsis eder. Zamanlama önceliği, modülasyon ve kodlama şeması (MCS), taşıyıcıların QoS (Quality of Service) gereksinimlerine ve UE kanal kalitesine göre belirlenir. UE kanalı kalite bilgisi, UE tarafından rapor edilen CQI'ler ile elde edilir. Zamanlama önceliklendirmesi ve MCS seçimi CQI bilgisine bağlıdır.

Zamanlayıcı sisteminin giriş parametreleri olarak fiziksel katman ölçümü ve raporlaması, MAC (Media Access Controller) Protokol Veri Birimi (Protocol Data Unit - PDU) gönderimi, üst katman konfigürasyonu ve UE'nin kapasitesi bilgileri kullanılır.

Fiziksel katman ölçümü ve raporlaması, kanal durumu bilgisi (Channel State Indicator - CSI) ve hibrit otomatik tekrar talebi (HARQ) geri bildirimini içerir. CSI temel olarak CQI ve ön kodlama matrisi göstergesini (Precoding Matrix Indicator - PMI) içerir. CQI, aşağı yönde kanal kalitesini gösterir. PMI, bir ön kodlama matrisi önermek için kapalı döngü uzaysal çoğullama iletim modunda UE tarafından rapor edilir.

HARQ geri bildirimi, verilerin doğru şekilde iletilip iletilmediğini gösterir. Üç tür HARQ geri bildirimi vardır; onaylama (ACK), negatif onay (NACK) ve süreksiz aktarım (DTX).

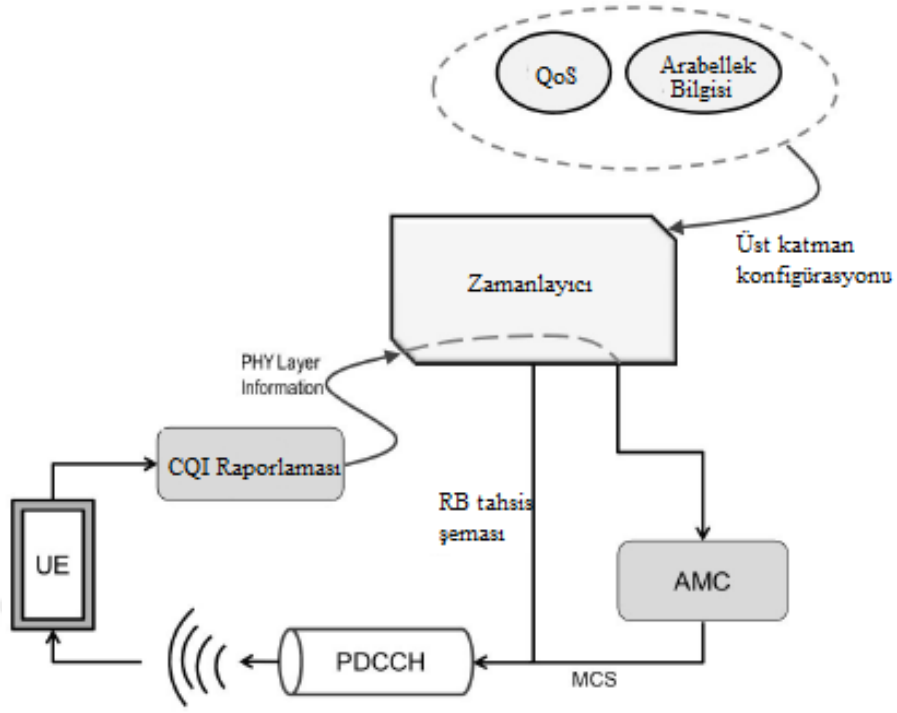
MAC Protokol Veri Birimi (PDU) gönderiminde bir kullanıcıya kaynak atanıp verileri ilettikten sonra, zamanlayıcı, UE'nin bir sonraki TTI'daki önceliğini hesaplamak için UE veri hızını ve gecikme istatistiklerini hesaplayıp günceller. Bunu bir sonraki TTI için geribesleme olarak kullanır.

Üst katman konfigürasyonu ve UE'nin kapasitesi bilgisi ile zamanlayıcı, UE'nin her bir TTI'da iletebileceği maksimum bit hızını dikkate alır. Üst katman konfigürasyonu temel olarak UE'nin QoS gereksinimlerini ifade eder.

QoS bilgileri, QoS sınıfı tanımlayıcısı (QoS Class Identifier - QCI), GBR (Guaranteed Bit Rate) servislerinin garanti edilen bit hızı, GBR servislerinin maksimum bit hızı (Maximum Bit Rate - MBR), GBR dışı servislerin toplam maksimum bit hızı (Aggregate Maximum Bit Rate - AMBR) bilgilerini içerir [16].

Zamanlama işlemine ait blok diyagram Şekil (2.4)'de verilmiştir.

Zamanlayıcı, gerekli giriş parametrelerini elde ettikten sonra zamanlama önceliklerini belirlemeye başlamaktadır. Arabellekteki veriyi kontrol ederek UE'ler için gönderilecek veri miktarları belirlenir. Veri miktarı belirlendikten sonra tahsis edilecek RB sayısı belirlenir. Ardından çeşitli faktörlere göre kaynak tahsisini gerçekleştirir. Zamanlayıcı raporlanan CQI bildirimine uygun modülasyon ve kodlama tipini seçmektedir.



Şekil 2.4 : Zamanlayıcı blok diyagramı.

3. BAŞLICA ZAMANLAMA ALGORİTMALARI

Bu bölümde literatürdeki temel zamanlama algoritmaları hakkında bilgi verilecektir.

3.1 Best CQI

Best CQI (Channel Quality Indicator) algoritması kaynakları tahsis ederken sadece o andaki kanal kalitesini dikkate almaktadır. Kullanıcı cihazlarından gelen CQI geribeslemeleri ile elde edilen kanal bilgisine göre, ataması yapılacak kaynak bloğunu en iyi kanal kalitesine sahip kullanıcı cihazlarından birini seçip kaynağı tahsis etmektedir.

Bu algoritma, kaynakları en iyi şekilde kullanabilecek olan UE'lere vererek throughput ölçütünü maksimize etmektedir. Ancak hücre içerisinde bulunan UE'lerin hepsi aynı kanal kalitesine sahip olamayacağı için UE'ler arasında adalet sağlanamamaktadır. Eğer bir UE sürekli kötü radyo kanalına sahipse hiç bir zaman kaynağa ulaşamayacaktır. Bu nedenle, Best CQI algoritması kaynakların verimli kullanımı açısından iyi performans gösterirken, UE'ler arasındaki adaleti sağlama açısından kötü performans göstermektedir. Algoritmanın zamanlama metriği denklem (3.1)'de gösterilmiştir.

$$M_{k,n} = \operatorname{argmax}_k(CQI_{k,n}) \quad (3.1)$$

$M_{k,n}$ k kullanıcısının n. RB için gönderdiği CQI ölçütünü ifade eder. $CQI_{k,n}$ k kullanıcısının n. RB için CQI değeridir.

3.2 Round Robin

Round Robin algoritması, UE'lerin kaynaklara sırayla ulaşmasını sağlar. Bu sayede kaynağa ulaşamayan bir kullanıcı bırakmaz. En kötü kanal kalitesine sahip bir UE, kaynağı kullanamayacak bile olsa kaynağa ulaşmış olur. Best CQI algoritmasına göre daha yüksek adalet sağlar. Ancak adalet artışı, sistem veriminin azalmasına mal olur. Algoritmanın zamanlama metriği denklem (3.2)'de gösterilmiştir.

$$M_{k,n} = \tau - \Delta_k \quad (3.2)$$

Denklemden τ anlık zamanı, Δ_k k kullanıcısına kaynak verilen en son zamanı ifade eder.

3.3 Proportional Fair

Proportional fair algoritması, adalet ile throughput arasında bir takas gerçekleştirir. UE'ler arasında adalet sağlarken sistem verimini maksimize etmeye çalışır. Zamanlama metriğini oluştururken adalet, kanal kalitesi ve geçmişteki ortalama bit hızını hesaba katmaktadır. Sıralama metriği k^* denklem (3.3) kullanılarak hesaplanır [17].

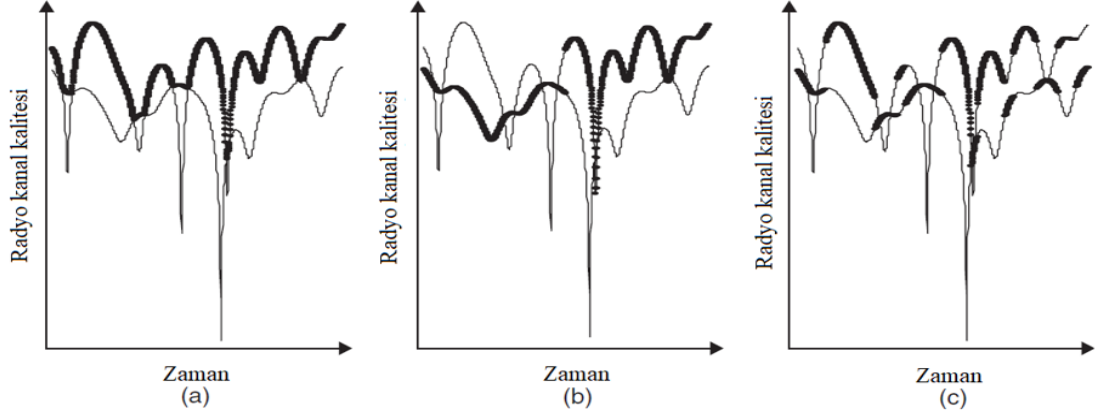
$$k^* = \operatorname{argmax}_{k=1,2,\dots,K} \frac{R_{k,n} t^\alpha}{T_{k,n} t^\beta} \quad (3.3a)$$

Denklemden $\alpha=1, \beta=1$ durumu PF algoritmasını, $\alpha=1, \beta=0$ durumu Best CQI, $\alpha=0, \beta=1$ durumunda ise RR algoritmasını temsil etmektedir.

$$T_{k,n} t + 1 = \begin{cases} 1 - \frac{1}{t_c} T_{k,n} t + \frac{1}{t_c} R_{k,n} t & , k^* = k \\ 1 - \frac{1}{t_c} T_{k,n} t & , k^* \neq k \end{cases} \quad (3.3b)$$

Denklemden $R_{k,n}$ k kullanıcısının n. RB'daki anlık hızını, $T_{k,n}$ geçmiş ortalama hızını, t_c ortalama penceresinin boyutunu, $k^* = k$ k kullanıcısının önceki TTI'da kaynağa ulaştığının ifade etmektedir.

Farklı kanal koşullarına sahip iki kullanıcı için sırasıyla Best CQI, RR ve PF algoritmalarının UE seçimi Şekil (3.1)'de gösterilmiştir. Kaynak tahsis edilen kullanıcı kalın çizgi ile gösterilmiştir.



Şekil 3.1 : Zamanlama algoritmaları [18].

3.4 Zamanlayıcılarda Performans Parametreleri

3.4.1 Adalet

Zamanlayıcılar arasındaki performans metriklerinden biri UE'ler arasındaki adalettir. Adalet olgusu Throughput Adaleti ve Kaynak dağıtım adaleti olarak iki farklı açıdan tanımlanabilir.

Throughput Adaleti kullanıcıların ulaştığı throughput açısından adaleti ölçer. Eğer tüm kullanıcılar aynı throughput değerine sahipse bu durumda adalet tam olarak sağlanmış demektir. Literatürdeki çalışmalarda zamanlayıcıların throughput adaleti ölçütü olarak Jain Fairness Index kullanılmıştır. Jain Fairness ölçütü denklem (3.4) ile tanımlanır [19].

$$Jain\ Fairness\ Index = \frac{\sum_{n=1}^N x_n^2}{N \sum_{n=1}^N x_n^2} \quad (3.4)$$

Denklemde x_n , n kullanıcısına ait throughput değerini, N ise toplam kullanıcı sayısını ifade eder. Tüm kullanıcılar için throughput aynı değerde ise indeks 1'e eşit olacaktır. Tersine, 0'a olan yakınlık ise adaletsizliğin artışı anlamına gelecektir.

Kaynak dağıtım adaleti her bir kullanıcıya tahsis edilen kaynak miktarı açısından adaleti ifade eder. Kaynakların adil bir şekilde dağıtılması kullanıcıların aynı throughput değerlerine ulaşmalarını sağlamaz, çünkü kanal koşulları kullanıcılar arasında değişkenlik göstermektedir. Kaynak dağıtım adaleti denklem (3.5) ile ölçülmektedir.

$$Dağıtım\ Adaleti = \frac{\sum_{n=1}^N y_n^2}{N \sum_{n=1}^N y_n^2} \quad (3.5)$$

Denklemden y_n , n kullanıcısına tahsis edilen RB sayısını, N ise toplam kullanıcı sayısını ifade eder. Tüm kullanıcılara eşit sayıda RB tahsis edildiği takdirde eşitlik 1'e eşit olacaktır. Tersine, 0'a olan yakınlık ise adaletsizliğin artışı anlamına gelecektir.

3.4.2 Througput

Througput, bir haberleşme sisteminde iletişim kanalı üzerinden ortalama başarılı mesaj iletim oranıdır. Saniye başına bit cinsinden ölçülmektedir. Anlık throughput, anlık olarak kanaldaki mesaj iletim oranıdır. Ortalama throughput (average throughput), uzun süreli bir aralıktaki mesaj iletim oranıdır. Sistem throughput ise bir ağdaki tüm terminallere saniyede iletilen verinin toplamıdır.

3.5 Literatürdeki Çalışmalar

LTE radyo kaynaklarının zamanlanması hakkında yapılan çalışmalarda Proportional Fair ve Best CQI algoritmalarının pekçok varyasyonuna rastlanmaktadır. Hepsindeki ortak özellik, fairness ve throughput arasındaki takas ilişkisini kullanarak hem müşteri memnuniyetini sağlayacak hem de sistemlerin verimli kullanılmasını sağlayacak bir orta yol bulmaktır.

[7] nolu çalışmada literatürdeki birçok zamanlayıcı algoritma hedefleri doğrultusunda gruplandırılıp incelenmiştir. Best CQI algoritmasının throughput açısından başarılı sonuçlar verirken adalet açısından başarılı olmadığı görülmüştür. Simülasyonlar Vienna LTE System Level Simulator programı ile yapılmıştır.

[8] nolu çalışmada yeni bir algoritma önerilmiştir. Önerilen algoritma, kaynak tahsisi için her TTI [9] nolu çalışmada açıklanan Görevlendirme Modelini kullanılmıştır. Önerilen algoritmada, kullanıcılara ait radyo kanalı bilgisi CQI-Feedback Matrisi olarak elde edilmiştir. Bir önceki TTI'da kaynağa ulaşamamış olan kullanıcılar seçilerek Görevlendirme Modeli uygulanmıştır. Bu sayede CQI-Feedback Matrix'i maksimize edilmiştir. Simülasyonlar Vienna LTE System Level Simulator programı ile yapılmıştır. Sonuçlar throughput, adalet ve BLER performansı açısından incelenmiştir. Algoritma throughput ve adalet performansı açısından Round Robin ve

Best CQI arasında yer almıştır. Çalışmada, RB tahsisinin açıklanan Görevlendirme Modeli problemine nasıl uyarlandığı net olarak açıklanmamıştır.

[10] nolu çalışmada Best CQI ve Round Robin algoritmaları birlikte kullanılarak her ikisinin de iyi taraflarından faydalanılmak istenmiştir. Bunu gerçekleyebilmek için, her iki algoritma tek bir TTI'da birleştirilmiştir. TTI içerisindeki birinci zaman diliminde (time slot) Round Robin, ikinci zaman diliminde Best CQI kullanılmıştır. Bu işlem sonucunda throughput ve adalet performansı olarak Round Robin ve Best CQI arasında konumlanan bir algoritma elde edilmiştir.

[11] nolu çalışmada tüm kullanıcıların eşit throughput değerine ulaşmasını hedefleyen Blind Equal Throughput (BET) algoritmasında değişiklikler yapılarak çeşitli testler yapılmıştır. Simülasyon parametreleri olarak 1,4 MHz bantgenişliği ve 6 kaynak bloğu kullanılan testlerde, geçmişte en düşük throughput ortalamasına sahip üç kullanıcıya, kaynak blokları, sırasıyla 6:0:0, 4:1:1, 3:2:1, 2:2:2 oranında tahsis edilmiştir. İyi ve kötü kanal koşulları için ayrı ayrı iki deney yapılmıştır. Kullanıcılar iyi kanal koşullarına sahipken, önerilen algoritma Best CQI, Proportioanal Fair, Round Robin algoritmaları arasında en iyi adalet değerini vermiştir. Kötü kanal koşullarında ise BET algoritmasından daha iyi sonuç vermektedir. Ancak test sonuçları throughput açısından analiz edilmemiştir.

[12] nolu çalışmada önerilen algoritmanın sıralama metriği hesaplanırken hem CQI bilgisi hem de geçmiş ortalama throughput bilgisi kullanılmaktadır. Proportional Fair sıralama metriği, ortalama throughput hesaplama yöntemi değiştirilerek formüle dahil edilmiştir. Simülasyonlar Vienna LTE System Level Simulator programı ile yapılmıştır. Sonuç olarak orjinal Proportioanal Fair ve Best CQI algoritmalarına göre daha iyi bir throughput-fairness dengesi elde edilmiştir.

[13] nolu çalışmada RR ve Best CQI algoritmasının kombinasyonundan oluşan bir yapı önerilmiştir. Önerilen yapıda eğer RB sayısı UE sayısının tam katı ise tüm RB'ler UE'ler arasında eşit olarak RR paylaştırılmaktadır. Eğer RB sayısı UE sayısına tam olarak bölünemiyorsa bu sefer RB'ler Best CQI esasına göre dağıtılır. Simülasyonlar Vienna LTE System Level Simulator programı ile yapılmıştır. Önerilen yapı sistem throughput ve adalet arasında denge sağlamıştır. Sonuçlar RR

algortimasına göre daha iyi throughput, Best CQI'a göre daha adil bir sonuç sağlamıştır.



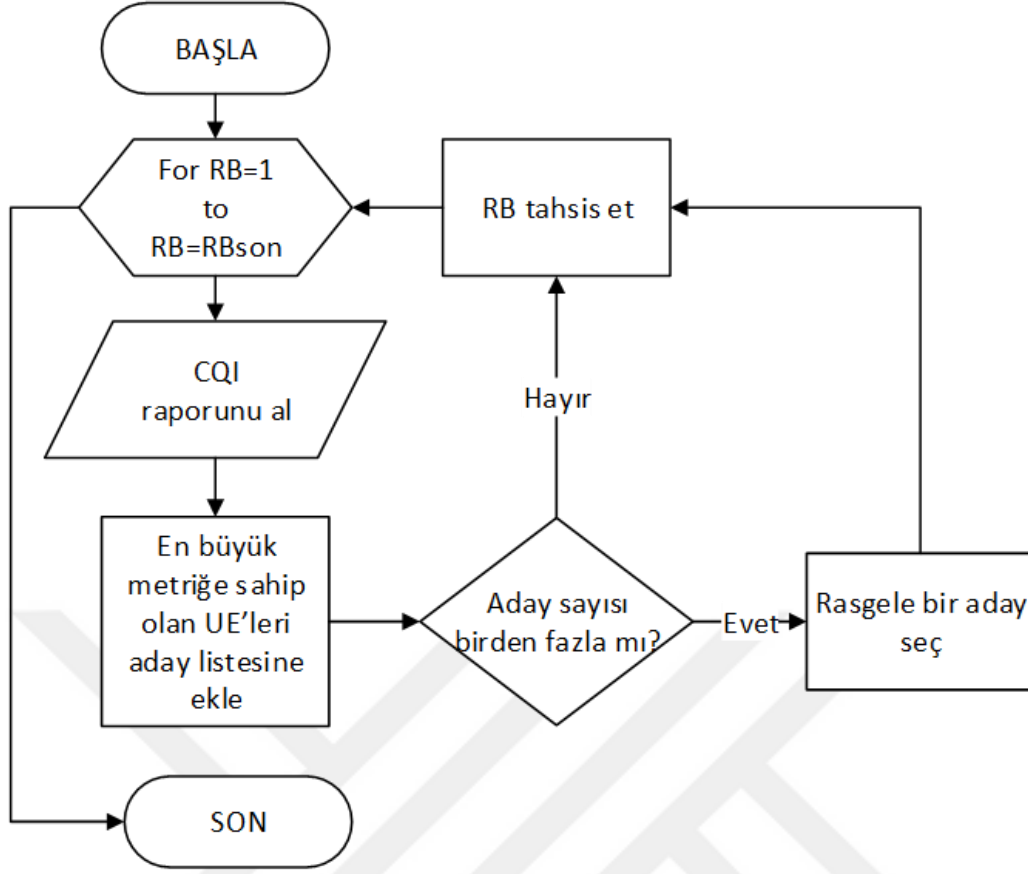
4. ÖNERİLEN ALGORİTMA

LTE’de kaynak zamanlayıcı algoritmalarında throughput ile adalet arasında takas ilişkisi olduğu bilinen bir olgudur. Throughput ölçütü maksimize edildiğinde adalet, adalet ölçütü maksimize edildiğinde ise throughput kaybı yaşanmaktadır [7][10]. Sistem kaynaklarını en etkili şekilde kullanmak mobil operatörlerin istediği bir durumdur. Best CQI algoritması throughput ölçütünü maksimize ettiği için sistem kaynaklarının verimliliğini arttırmaktadır. Ancak bunun bedeli kullanıcılar arasındaki adaletsizliğin artışı olmaktadır. Hatta bazı kullanıcılar sürekli kötü kanal kalitesine sahip bir konumda bulunuyorlarsa hiçbir zaman kaynağa ulaşamayacaklardır. Bu adaletsizlik ise müşteri memnuniyetine zarar verecektir. Yüksek müşteri memnuniyeti sağlamak için adalet ölçütü arttırılmalıdır.

Bu tezde önerilen algoritma ile Best CQI algoritmasının avantajlarını kullanmaya devam ederken aynı zamanda adalet artışı ve bazı kullanıcıların hiçbir zaman kaynaklara ulaşamaması riskinin ortadan kaldırılması hedeflenmiştir.

4.1 Önerilen Algoritmanın Açıklaması

Best CQI’da kaynakların tahsis edileceği kullanıcı belirlenirken ataması yapılacak olan RB için en yüksek metriğe sahip mobil cihazlar, aday kullanıcı kümesine dahil edilmektedir. Eğer birden fazla aday kullanıcı varsa rasgele bir tanesi seçilerek kaynak bloğunun kullandırılacağı kullanıcı cihazı seçilmektedir. Her TTI tekrarlanan bu prosedüre ait akış diyagramı Şekil (4.1)’de verilmiştir.



Şekil 4.1 : Best CQI algoritması blok diyagramı.

Bu tezin hazırlanması sırasında Best CQI algoritmasının yüksek throughput avantajını kullanmaya devam ederken adalet ve en düşük kullanıcı throughput değerini yükseltmek için çeşitli modeller test edilmiştir.

Test edilen ilk modelde, adalet artışı sağlamak için Best CQI algortimasının belirlediği adaylardan toplamda en az RB kullanmış olan kullanıcıya kaynak atanmıştır. Bu değişiklik sonucunda adalet ölçütünde artış yaşanarak yeni bir adalet-throughput dengesi elde edilmiştir. Ortalama kullanıcı throughput aynı kalmış, en yüksek kullanıcı throughput değeri azalmıştır. Ancak uygulanan bu model, en düşük kullanıcı throughput değeri üzerinde herhangi bir geliştirme sağlayamamıştır.

Test edilen ikinci modelde, kullanıcıların kanal kalitelerinde iki TTI arasında yani 1ms’de kayda değer bir değişim olamayacağı düşünülerek Best CQI algortimasının belirlediği adaylardan, bir önceki TTI’da daha az RB kullanan aday tercih edilmiştir. Bu model ile adalet ile birlikte, en yüksek kullanıcı throughput değerinde de artış yaşanmıştır. Bu açıdan bakıldığında bu model ile daha yüksek throughput sağlayan

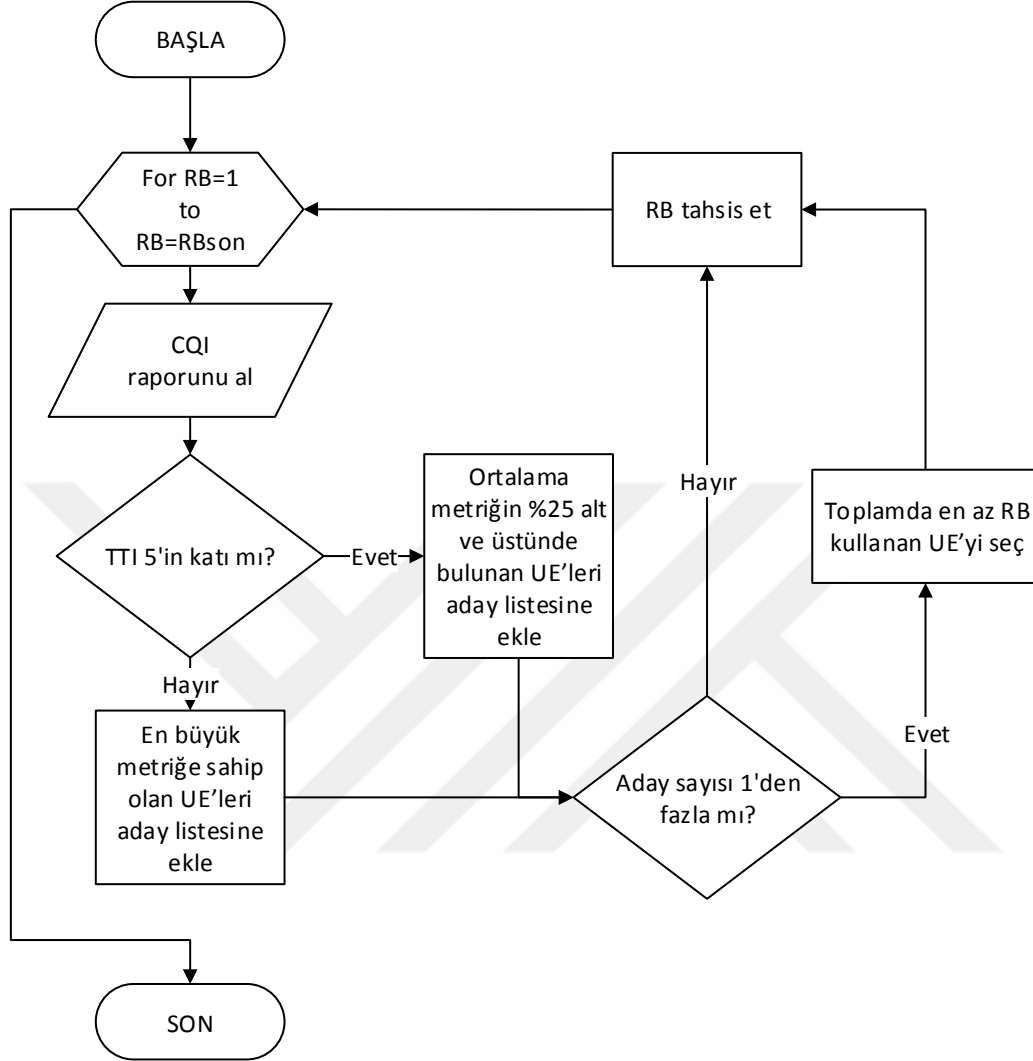
bir Best CQI algoritması elde edilmiştir. Ancak en düşük kullanıcı throughput değeri üzerinde herhangi bir geliştirme sağlanamamıştır.

Test edilen üçüncü modelde, birinci modelde olduğu gibi Best CQI algortimasının belirlediği adaylardan toplamda en az RB kullanmış olan kullanıcıya kaynak atanmıştır. Ancak en düşük kullanıcı throughput değerinde bir gelişme sağlayabilmek için her 5 TTI'da bir, tüm kullanıcılar aday listesine eklenmiştir. Bu ekleme sonucunda en düşük kullanıcı throughput değeri üzerinde hedeflenen geliştirme sağlanmıştır. Bunun bedeli ise en yüksek, ortalama, en düşük ve hücre throughput değerlerinde azalma olmuştur. Ancak PF ve RR algoritmalarına göre sistem kaynakları daha verimli kullanılmış, en kötü koşuldaki kullanıcıların bile kaynağa ulaşması sağlanmıştır.

Bu tezde önerilen algoritmada ise Best CQI'daki kaynak bloğuna atanacak aday kullanıcıların seçimine ve adaylar arasındaki nihai seçime müdahale edilmektedir. Adaylar arasındaki seçim sırasında kullanıcılara geçmişte kullandırılmış olan toplam kaynak bloğu sayısı yeni bir kıstas olarak karar mekanizmasına eklenmiştir. Buna göre birden fazla aday söz konusu olduğunda seçim tercihi, o ana kadar toplamda en az kaynak bloğu kullanmış olan kullanıcıya yönelik olacaktır. Best CQI'da ise bu seçim rasgele yapılmaktadır. Bu değişiklik ile throughput kaybı yaşanmaksızın adaylar arasında adaletin artması hedeflenmektedir.

Yapılan bir diğer müdahale ise aday seçiminde yapılmıştır. Normal akış içerisinde kaynağa ulaşamayacak olan ortalama seviye kanal kalitesine sahip kullanıcılara fırsat verilmiştir. Her beş TTI'da bir kez, en iyi metriğe sahip kullanıcıları aday göstermek yerine, ortalamanın yüzde 25 alt ve üst aralığındaki metriğe sahip olan ortalama kanal kalitesine sahip olan kullanıcı cihazları aday gösterilmiştir. Ardından bu adaylar arasında toplamsal kaynak bloğu kullanımı en düşük olan kullanıcıya, kaynak bloğu tahsis edilmiştir. Bu değişiklik sonucunda normal şartlarda kaynağa ulaşamayacak olan ortalama kanal koşullarına sahip kullanıcılar, her LTE çerçevesinde iki kez kaynağa ulaşma fırsatı yakalamıştır. Bu sayede kaynakların sürekli en iyi kanal koşullarına sahip kullanıcıya verilmesi engellenmiştir. Test edilen üçüncü modelden farklı olarak, tüm kullanıcılar yerine ortalama seviyedeki kullanıcıların aday gösterilmesi ile sistem kaynaklarının verimli kullanımından çok

fazla ödün verilmemek istenmiştir. Önerilen algoritmaya ait blok diyagram şekil (4.2)'de verilmiştir.



Şekil 4.2 : Önerilen algoritmaya ait blok diyagramı.

5. SİMÜLASYON SONUÇLARI

Literatür taramasında da sıkça rastlanan MATLAB tabanlı Vienna LTE System Level Simulator programının v2.0_Q3_2018 sürümü simülasyon için kullanılmıştır [1][20][21][22]. Programın açık kaynak kodlu oluşu, temel zamanlama algoritmalarını içerisinde barındırması, algoritmalar üzerinde değişiklik yapılmasına izin vermesi tercih sebepleri arasındadır.

Halihazırda program içerisinde bulunan orjinal Best CQI, PF ve RR algoritmaları aynı giriş parametreleri ile çalıştırılmıştır. Sonuçların karşılaştırılabilmesi için kullanıcıların hareketleri, hızları gibi rasgele üretilen tüm değişkenler sabitlenmiştir. Böylece test her tekrarlandığında zamanlayıcı algoritma dışındaki diğer tüm parametrelerin aynı kalması sağlanmıştır. Daha sonra önerilen algoritma aynı test koşulları altında çalıştırılarak elde edilen sonuçlar diğer algoritmalar ile karşılaştırılmıştır. Simülasyon parametreleri Çizelge (5.1)'de verilmiştir.

Çizelge 5.1 : Simülasyon parametreleri.

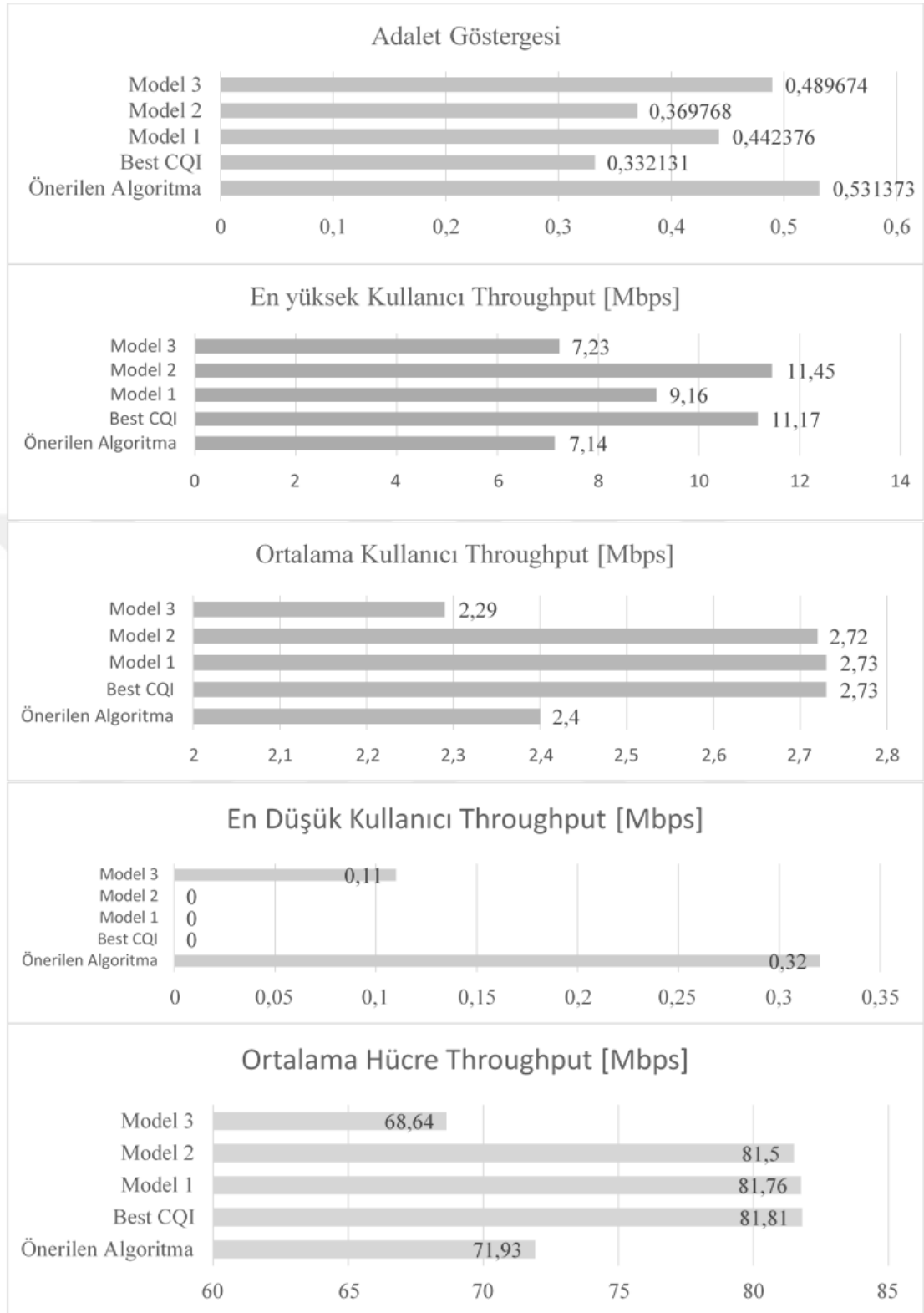
Parametre	Değer
Frekans Bandı	2.14 GHz
Bant Genişliği	20 MHz
Alıcı anten sayısı	1
Verici anten sayısı	1
İletim Tipi	FDD
Çevrimsel ön ek	Normal
RB	180 kHz
Her bir RB için alt taşıyıcı	12
Simülasyon süresi	50 TTI (50 ms)
Kullanıcı sayısı	30,90,600
eNodeB sayısı	1
Sektör sayısı	3

Çizelge 5.1 (devam) : Simülasyon parametreleri.

Parametre	Değer
Simülasyon ortamı	Şehir
Kanal modeli	TU
Kullanıcı hızı	5 km/saat
eNodeB anten kazancı	15 dBi
eNodeB anten kazanç modeli	Berger
Baz istasyonu gücü	40 W
Trafik modeli	Full buffer
Baz istasyonu yüksekliği	32 m
Kullanıcı yüksekliği	1.5 m
Anten tipi	Kathrein 742212
Zamanlama algoritmaları	Best CQI, PF, RR, Önerilen algoritma

Önerilen algoritma öncesinde tartışılan üç modele ait karşılaştırmalı grafik Şekil (5.1)'de verilmiştir. Grafik incelendiğinde en düşük kullanıcı throughput açısından en iyi performansı, önerilen algoritma sağlamıştır.

30, 90 ve 600 kullanıcı simülasyonlara ait adalet, en yüksek kullanıcı throughput, ortalama kullanıcı throughput en düşük kullanıcı throughput ve ortalama hücre throughput sonuçları Çizelge (5.2)'de tablo halinde, Şekil (5.2)'de grafiksel olarak verilmiştir. Sonuçların Best CQI algoritmasına göre olan yüzdesel olarak farklılıkları Çizelge (5.3)'te tablo olarak verilmiştir.



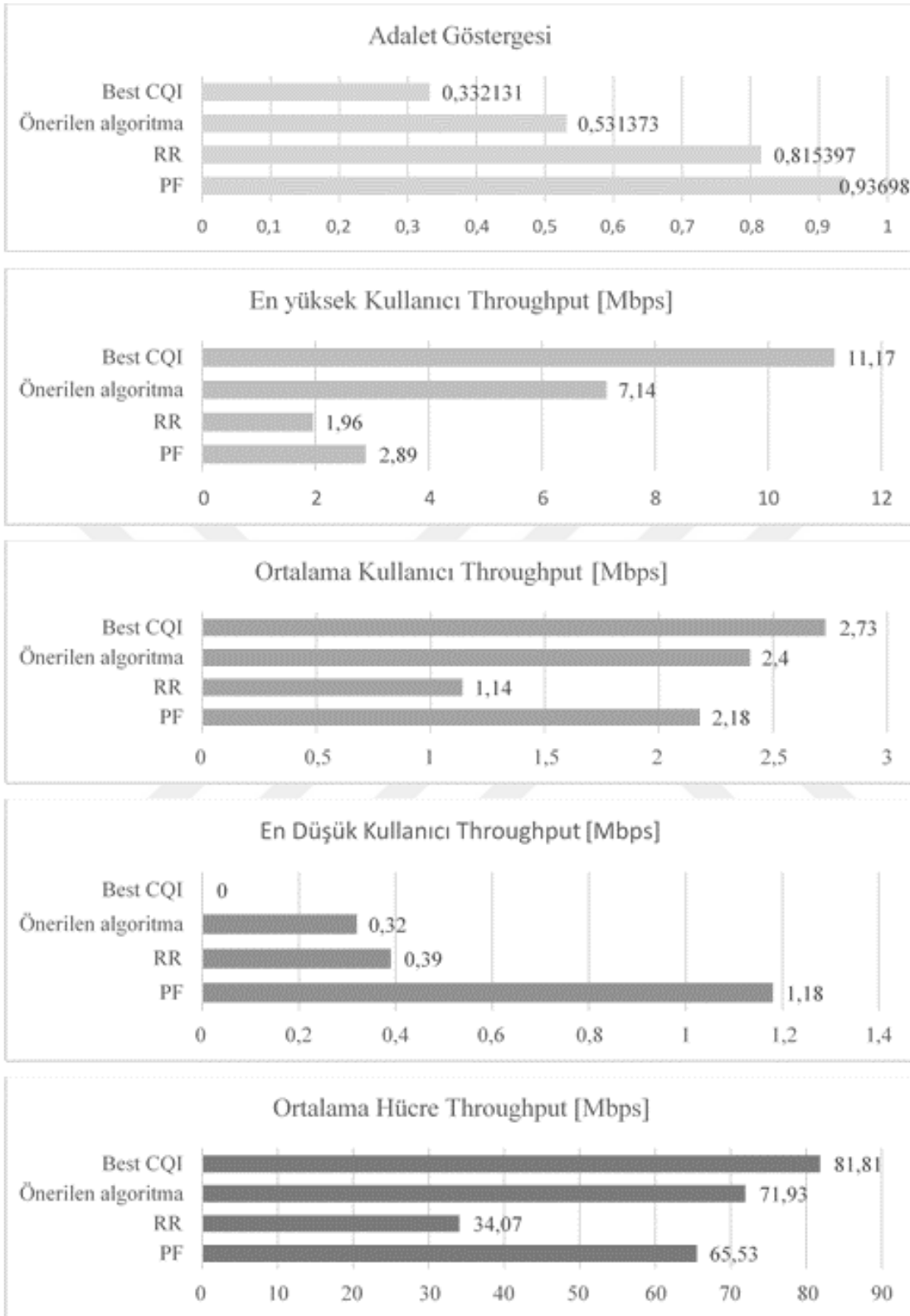
Şekil 5.1 :Önerilen algoritmanın diğer modellere karşılaştırma grafiği.

Çizelge 5.2 : Simülasyon sonuçları.

Kullanıcı Sayısı	Zamanlayıcı Algoritma	Jain Fairness Index	En yüksek Kullanıcı Throughput [Mb/s]	Ortalama Kullanıcı Throughput [Mb/s]	En Düşük Kullanıcı Throughput [Mb/s]	Ortalama Hücre Throughput [Mb/s]
30	Önerilen algortima	0,62364	15,36	6,58	0,39	65,83
	Proportional Fair	0,917738	7,92	6,04	2,57	60,35
	Best CQI	0,468648	21,47	7,28	0	72,87
	Round Robin	0,819763	5,89	3,49	0,74	34,94
90	Önerilen algortima	0,531373	7,14	2,4	0,32	71,93
	Proportional Fair	0,93698	2,89	2,18	1,18	65,53
	Best CQI	0,332131	11,17	2,73	0	81,81
	Round Robin	0,815397	1,96	1,14	0,39	34,07
600	Önerilen algortima	0,747826	0,65	0,38	0,07	75,04
	Proportional Fair	0,967157	0,43	0,36	0,23	72,09
	Best CQI	0,326155	1,66	0,43	0	85,45
	Round Robin	0,776842	0,36	0,19	0,03	37,28

Çizelge 5.3 : Best CQI algoritmasına göre yüzdesel fark sonuçları.

Kullanıcı Sayısı	Zamanlayıcı Algoritma	Jain Fairness Index Değişimi [%]	En yüksek Kullanıcı Throughput Değişimi [%]	Ortalama Kullanıcı Throughput Değişimi [%]	Ortalama Hücre Throughput Değişimi [%]	En Düşük Kullanıcı Throughput [Mb/s]
30	<i>Önerilen algortima</i>	47	-55	-26	-9	0,39
	Proportional Fair	135	-121	-45	-15	2,57
	Best CQI	0	0	0	0	0
	Round Robin	106	-139	-139	-46	0,74
90	<i>Önerilen algortima</i>	60	-36	-12	-12	0,32
	Proportional Fair	182	-74	-20	-20	1,18
	Best CQI	0	0	0	0	0
	Round Robin	146	-82	-58	-58	0,39
600	<i>Önerilen algortima</i>	129	-61	-12	-12	0,07
	Proportional Fair	197	-74	-16	-16	0,23
	Best CQI	0	0	0	0	0
	Round Robin	138	-78	-56	-56	0,03



Şekil 5.2 : Simülasyon sonuçları grafik gösterimi.

Önerilen algoritmanın Adalet, En yüksek Kullanıcı Throughput, Ortalama Kullanıcı Throughput, Ortalama Hücre Throughput, En Düşük Kullanıcı Throughput Değişimleri Best CQI referans alınarak yüzdesel olarak verilmiştir.

Önerilen algoritma, testlerin tamamında adalet açısından PF ile RR arasına yerleşmiştir. 90 kullanıcı testte, önerilen algoritma Best CQI algoritmasından %60 daha fazla adalet sağlarken, PF ve RR algoritmaları için sırasıyla %182 ve %146 sonuçları alınmıştır.

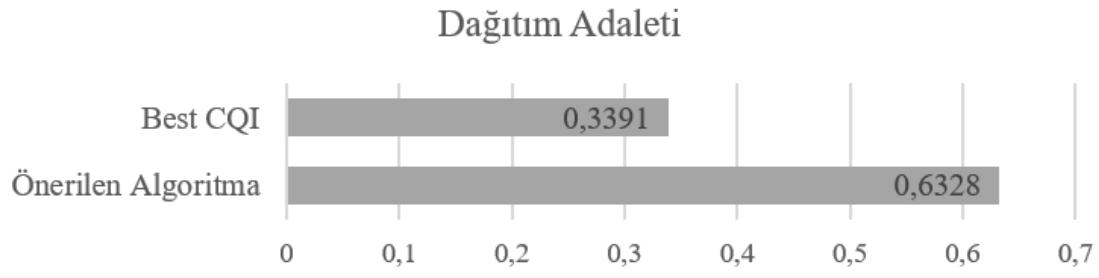
En yüksek Kullanıcı Throughput değeri açısından tüm testlerde PF ve RR algoritmalarından daha iyi sonuç vermiştir. 90 kullanıcı testte önerilen algoritma, Best CQI algoritmasından %36 daha düşükken, PF ve RR algoritmaları için sırasıyla %74 ve %82 sonuçları alınmıştır.

Ortalama Kullanıcı Throughput değeri açısından tüm testlerde PF ve RR algoritmalarından daha iyi sonuç vermiştir. 90 kullanıcı testte önerilen algoritma, Best CQI algoritmasından %12 daha düşükken, PF ve RR algoritmaları için sırasıyla %20 ve %58 sonuçları alınmıştır.

Ortalama Hücre Throughput değeri açısından tüm testlerde PF ve RR algoritmalarından daha iyi sonuç vermiştir. 90 kullanıcı testte önerilen algoritma, Best CQI algoritmasından %12 daha düşükken, PF ve RR algoritmaları için sırasıyla %20 ve %58 sonuçları alınmıştır.

Sonuçlar incelendiğine en çarpıcı gelişmenin hücre kenarındaki kullanıcıların throughput değerlerinde olduğu farkedilecektir. Best CQI algoritmasında bu kullanıcılar kaynağa hiç ulaşamıyorken, önerilen algoritma PF ve RR algoritmaları arasına yerleşmiştir. Kullanıcı sayısı arttıkça önerilen algoritmanın RR algoritmasından daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. 600 kullanıcı testte RR için bu değer 0,07 Mbps iken, önerilen algortmada 0,07 Mbps olarak ölçülmüştür.

Karşılaştırma için incelenen bir diğer sonuç ise Kaynak Dağıtım adaleti hakkındadır. 90 kullanıcı testte ölçülen dağıtım adaleti, Best CQI algoritmasına göre %86 artış gösterdiği görülmüştür Şekil (5.3).



Şekil 5.3 : Dağıtım adaleti karşılaştırması.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tezde Best CQI algoritmasının daha adil bir şekilde çalışmasını sağlayacak bir algoritma önerilmiştir. Elde edilen algoritma throughput ve adalet arasında bir ödünleşim sağlarken yine de PF ve RR algoritmalarından daha yüksek throughput vermeye devam etmiştir. Adalet ölçütündeki artışın throughput ölçütündeki azalmadan daha baskın olduğu görülebilmektedir. Algoritmanın sürekli kötü kanal koşullarına sahip kullanıcılara da kaynak verebilmesi en büyük avantajı olmuştur. Bu sonuçlar ışığında önerilen algoritma, daha adil bir Best CQI olarak nitelendirilebilir.

Çalışmalar sırasında elde edilen bir diğer kazanım da, Model 2 olarak sonuçları paylaşılmış olan algoritmadır. Best CQI algoritması ile seçilen adaylar arasından bir önceki TTI'da daha az RB kullanmış olan adaya kaynak tahsis edilmesi ile en yüksek kullanıcı throughput değerinin arttırılabileceği gösterilmiştir.

Önerilen algoritmadaki adalet artışı Jain Fairness Index olarak bilinen throughput adaleti ölçütü ve kaynak dağıtım adaleti ölçütü cinsinden ayrı ayrı incelenmiştir. Her iki ölçüt cinsinden de adalet artışı sağlandığı gösterilmiştir.

Önerilen algoritmanın operatörlerin kullanımı açısından donanımsal veya yazılımsal herhangi bir ek maliyeti bulunmamaktadır.



KAYNAKLAR

- [1] Van Nee, R., Prasad, R. (2000). *OFDM for wireless multimedia communications*, Artech House Publications
- [2] Holma, H., Toskala, A., (2009). *LTE for UMTS–OFDMA and SC-FDMA based radio access*, John Wiley & Sons Ltd.
- [3] Stuber, G. L., Barry, J. R., McLaughlin, S.W., Li, Y., Ingram, M.A., Pratt, T.G. (2004), Broadband MIMO-OFDM wireless Communications, *Proceedings of IEEE* Vol. 92 No. 2 271-294.
- [4] Ericsson mobility report <<https://www.ericsson.com/assets/local/mobility-report/documents/2019/emr-q4-update-2018.pdf>>, erişim tarihi 14.04.2019.
- [5] GSM (Groupe Spéciale Mobile) Association - Global Mobile Trends <<https://www.gsmaintelligence.com/research/?file=8535289e1005eb248a54069d82ceb824&download>>, erişim tarihi 14.04.2019.
- [6] Ericsson mobility report November 2018 <<https://www.ericsson.com/assets/local/mobility-report/documents/2018/ericsson-mobility-report-november-2018.pdf>>, erişim tarihi 14.04.2019.
- [7] Capozzi, F., Piro, G., Grieco, L.A., Boggia, G. & Camarda, P (2013). Downlink Packet Scheduling in LTE Cellular Networks: Key Design Issues and a Survey. *Communications Surveys & Tutorials, IEEE*, vol.15, no.2, pp.678-700.
- [8] S. M. Chadchan & C. B. Akki (2013). A Fair Downlink Scheduling Algorithm for 3GPP LTE Networks. *IJCNIS*, vol.5, no.6, pp.34-41.
- [9] Hillier F.S, Lieberman G. J. (2000). *Introduction To Operations Research*, McGraw-Hill.
- [10] Asvial M., Dewandaru G. & Rachman A. N. (2015). Modification of round robin and best CQI scheduling method for 3GPP LTE downlink. *Int. J. Technol.*, 6, (2), pp. 130–138.
- [11] Sudheep S. & Rebekka B. (2014). Proportional equal throughput scheduler — A very fair scheduling approach in LTE downlink. *ICICES2014*, pp. 1–6.
- [12] Ibraheem M. ElShennawy N., Sarhan A.M., (2018). A Proposed Modified Proportional Fairness Scheduling (MPF-BCQI) Algorithm with Best CQI Consideration for LTE-A Networks. *13th International Conference on Computer Engineering and Systems (ICCES)*, Cairo, Egypt, 2018, pp. 360-368.
- [13] S. A. Alqahtani & M. Alhassany, (2013). Performance Modeling and Evaluation of Novel Scheduling Algorithm for LTE Networks. *2013 IEEE 12th International Symposium on Network Computing and Applications*, Cambridge, MA, pp. 101-105.

- [14] **3rd Generation Partnership Project.** (2018). *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA): Physical Layer Procedures (Release 8)*, TS 36.213 V8.2.0.
- [15] **Zyren, J.,** (2007). Overview of 3GPP Long Term Evolution Physical Layer, *Freescale Semiconductor*.
- [16] **3GPP Policy and Charging Control Architecture.** (2017). 3GPP TS 23.203 V14.4.0.
- [17] **Barayan Y., Kostanic I.,** (2013). Performance Evaluation of Proportional Fairness Scheduling in LTE. *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2013, San Francisco, USA. (2):* 23-25
- [18] **Dahlman, E., Parkvall, S., Skold J. & Beming P.** (2014). *3G Evolution: HSPA and LTE for Mobile Broadband*. Academic Press, pp. 105-124.
- [19] **Jain, R., Chiu, D., Hawe, W.** (1984). A Quantitative Measure of Fairness and Discrimination for Resource Allocation in Shared Computer Systems, *Tech. Rep. TR-30*.
- [20] **Mehlführer, C.,** (2011). The Vienna LTE Simulators – Enabling Reproducibility in Wireless Communications Research, *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, vol. 2011, pp. 1-13
- [21] **Chiumento, A., Pollin, S., Dessert, C., Van der Perre, L., & Lauwereins., R.** (2012) Analysis of power efficiency of schedulers in LTE, *19th IEEE Symposium on Communications and Vehicular Technology in the Benelux (SCVT)*, Eindhoven, pp. 1-4.
- [22] **Sağlam, M.İ.** (2017). *Gezgin haberleşme sistemleri için yalın zamanlama algoritması.* (Doktora tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Bilişim Enstitüsü, İstanbul.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Fatih Burak Koyun
Doğum Tarihi ve Yeri : 07/10/1991 İstanbul
E-posta : fabuko@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2013, İstanbul Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM:

- 2016-2018 yılları arasında Türk Telekom'da çalıştı.
- 2018 yılından beri Huawei'de çalışmaktadır.