

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ BİLİŞİM ENSTİTÜSÜ

**GEZGİN HABERLEŞME SİSTEMLERİ İÇİN YALIN ZAMANLAMA
ALGORİTMASI**

DOKTORA TEZİ

Mehmet İzzet SAĞLAM

İletişim Sistemleri Anabilim Dalı

Uydu Haberleşmesi ve Uzaktan Algılama Programı

ARALIK 2017

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ BİLİŞİM ENSTİTÜSÜ

**GEZGİN HABERLEŞME SİSTEMLERİ İÇİN YALIN ZAMANLAMA
ALGORİTMASI**

DOKTORA TEZİ

**Mehmet İzzet SAĞLAM
(705032003)**

İletişim Sistemleri Anabilim Dalı

Uydu Haberleşmesi ve Uzaktan Algılama Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mesut KARTAL

ARALIK 2017

İTÜ, Bilişim Enstitüsü'nün 705032003 numaralı Doktora Öğrencisi Mehmet İzzet SAĞLAM, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “GEZGİN HABERLEŞME SİSTEMLERİ İÇİN YALIN ZAMANLAYICI” 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

Prof. Dr. Selçuk PAKER
İstanbul Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Aktül KAVAS
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Hamid TORPİ
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 15 Kasım 2017
Savunma Tarihi : 27 Aralık 2017

Eşime ve çocuklarıma,

ÖNSÖZ

Tez çalışmam ve SanTez (Sanayi Tezleri Programı) projesi sırasında kıymetli bilgi, birikim ve tecrübeleri ile bana yol gösterici ve destek olan değerli danışman hocam Prof. Dr. Mesut Kartal'a sonsuz teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Yrd. Doç. Dr. Aktül Kavas Hocama SanTez projesi ve tez konusunda yol gösterici önerilere ve katkılarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Prof. Dr. Selçuk Paker Hocama tezimin hazırlanması sırasındaki desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Tezimi SanTez kapsamında destekleyen Türkiye Cumhuriyeti Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığına ve Ericsson Araştırma Geliştirme ve Bilişim Hizmetleri A.Ş. teşekkür ederim.

Çalışmalarım boyunca maddi manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan aileme de sonsuz teşekkür ederim.

Kasım 2017

Mehmet İzzet Sağlam

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xv
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xvii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xix
ÖZET	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	4
1.2 Hipotez	6
2. GEZGİN HABERLEŞME SİSTEMLERİNDE ZAMANLAMA.....	7
2.1 Gezgin Haberleşme Sistemleri	7
2.2 Zamanlama	8
2.2.1 Aşağı yönde zamanlama	11
2.2.2 Yukarı yönde zamanlama.....	13
2.3 Mevcut Çalışmalar	15
2.3.1 Mevcut algoritmaları karşılaştıran çalışmalar	15
2.3.2 Mevcut algoritmaları yenilik getiren çalışmalar	16
2.3.3 Yeni bir algoritma öneren çalışmalar	20
3. YALIN ZAMANLAYICI	25
3.1 Yalın Metodolojisi.....	28
3.2 Yalın Zamanlayıcı	29
3.3 Gecikmeye Duyarlı Yalın Zamanlayıcı.....	34
4. BENZETİM SONUÇLARI	41
4.1 MIMMI Simülasyon Programı	41
4.2 NS-3 (Network Simulator-3) Simülasyon Programı	42
4.3 Vienna LTE Simülasyon Programı	42
4.4 Yalın Zamanlayıcı Benzetim Sonuçları	45
4.5 Gecikmeye Duyarlı Yalın Zamanlayıcı Benzetim Sonuçları	47
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	51
5.1 SanTez ve Çalışmanın Uygulama Alanı	52
5.2 Patent Başvuruları	52
KAYNAKLAR	53
ÖZGEÇMİŞ.....	57

KISALTMALAR

3GPP	: 3rd Generation Partnership Project
4G	: Fourth Generation
4N	: Dördüncü Nesil
AMPS	: Advanced Mobile Phone Service
ARIB	: Association of Radio Industries and Businesses
ATIS	: Alliance for Telecommunications Industry Solutions
BET	: Blind Equal Throughput
BSR	: Buffer Status Report
CCSA	: China Communications Standards Association
CDMA	: Code Division Multiple Access
CQI	: Channel Quality Indicator
CS	: Circuit Switched
CSI	: Channel State Information
D-AMPS	: Dual mode AMPS
DFT	: Discrete Fourier Transform
DFTS-OFDM	: Discrete Fourier Transform Spread – OFDM
DL	: Downlink
DRA	: Dynamic Resource Allocation
DRX	: Discontinuous Reception
E-UTRAN	: Evolved UTRAN
EDGE	: Enhanced Data rates for GSM
ETSI	: European Telecommunications Standards Institute
EUL	: Enhanced UpLink
EXP	: Exponential
EXP-PF	: Exponential Proportional Fair
EXP-Rule	: Exponential Rule
FD	: Frequency Domain
FDD	: Frequency Division Duplex
FDMA	: Frequency Division Multiple Access
FDPS	: Frequency Domain Packet Scheduling
FDS	: Frequency Diversity Scheduling
FDSS	: Frequency Diversity and Selectivity Scheduling
FIFO	: First In First Out
FSS	: Frequency Selective Scheduling
FTP	: File Transfer Protocol
GA	: Genetic Algorithm
GBF	: Generalized Proportional Fair
GPRS	: General Packet Radio Service
GSM	: Global System for Mobile communications
GSMA	: The Global Mobile Suppliers Association
HD-FDD	: Half Duplex-FDD
HSDPA	: High Speed Downlink Packet Access
HSUPA	: High Speed Uplink Packet Access
HSPA	: High Speed Packet Access

IM	: Instant Messaging
ISI	: Inter Symbol Interference
ITU	: International Telecommunication Union
LA	: Link Adaptation
LTE	: Long Term Evolution – Evolved Packet System RAN
LTE-A	: Long Term Evolution Advanced
M-LWDF	: Maximum-Largest Weighted Delay First
Mbp/s	: Megabits per second
MCS	: Modulation and Coding Scheme
MIMO	: Multiple Input Multiple Output
MOS	: Mean Opinion Score
MS	: My SCH
MTE	: Mouth-to-Ear
NIP	: Non-linear Integer Programming
NMT	: Nordic Mobile Telephony
NS-3	: Network Simulator-3
OFDM	: Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	: Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access
PAPR	: Peak to Average Power Ratio
PDC	: Personal Digital Communications
PDCCH	: Physical Downlink Control Channel
PDSCH	: Physical Downlink Shared Channel
PF	: Proportional Fair
PHR	: Power Headroom Report
PRB	: Physical Resource Block
PS	: Packet Switched
PUCCH	: Physical Uplink Control Channel
PUSCH	: Physical Uplink Shared Channel
QBC	: QoS Aware Best-CQI
QoS	: Quality of Service
QRR	: QoS aware Round Robin
RACH	: Random Access Channel
RB	: Resource Block
RF	: Resource Fair
RR	: Round Robin
RS	: Reference Signal
RT	: Real Time
SA	: Simulated Annealing
SB	: Scheduling Block
SC-FDMA	: Single Carrier Frequency Domain Multiple Access
SG	: Simply Greedy
SRS	: Sounding Reference Signal
SS	: Sequential Suboptimal
TACS	: Total Access Communication System
TD	: Time Domain
TD-CDMA	: Time Division – Code Division Multiple Access
TDD	: Time Division Duplex
TDMA	: Time Division Multiple Access
TPS	: Toyota Production System
TSDSI	: Telecommunications Standards Development Society

TTA	: Telecommunications Technology Association
TTA	: Throughput to Average
TTC	: Telecommunication Technology Committee
TTI	: Transmission Time Interval
UE	: User Equipment
UL	: Uplink
UMTS	: Universal Mobile Telecommunication System
UTRAN	: UMTS Terrestrial Radio Access Network
VoIP	: Voice over Internet Protocol
VoLTE	: Voice over LTE
WARC	: World Administrative Radio Conference
WCDMA	: Wideband Code Division Multiple Access

SEMBOLLER

M_k	: Sınırlı sayıl metrik
$CQI_k(t)$	: k'ncı kullanıcının anlık CQI değeri
CQI_{max}	: kullanıcının alabileceği en yüksek CQI değeri
$D_k(t)$	: k'ncı kullanıcının verisinin bekleme süresi
D_{max}	: kullanıcının verisinin bekleyebileceği en yüksek süre
$R_k(t)$	: k'ncı kullanıcının anlık throughput değeri
S_{Lean}	: Operatör tarafından belirlenen ödünleşim değişkeni
t	: Zaman
$T_k(t)$	: k'ncı kullanıcının hareketli ortalama throughput değeri
α_D	: Gecikme ağırlık çarpanı
α_F	: Hakkaniyet ağırlık çarpanı
α_{RRE}	: Kaynak verimlilik ağırlık çarpanı

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 : Göz önüne alınan parametreler.....	26
Çizelge 4.1 : Yalın Zamanlayıcı için kullanılan benzetim parametreleri.	43
Çizelge 4.2 : Gecikmeye Duyarlı Yalın Zamanlayıcı için kullanılan benzetim parametreleri.	44
Çizelge 4.3 : Yalın Zamanlayıcının benzetim sonuçları.....	46
Çizelge 4.4 : Benzetim sırasında kaynak atanmayan kullanıcı sayısı.	47
Çizelge 4.5 : Gecikmeye Duyarlı Yalın Zamanlayıcının benzetim sonuçları.	49

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Gezgin haberleşme sistemi LTE’de RB ve SB yapısı.	9
Şekil 2.2 : Aşağı yönde zamanlayıcının temel çalışma aşamaları.	12
Şekil 2.3 : Yukarı yönde zamanlayıcının temel çalışma aşamaları.	14
Şekil 3.1 : Giriş&Çıkış parametrelerin birbirleri arasındaki ilişkileri.	27
Şekil 3.2 : Yalın verimlilik matrisi.	28
Şekil 3.3 : Özet Yalın Zamanlayıcı algoritma gösterimi.	32
Şekil 3.4 : Farklı tip kullanıcılar için zaman cinsinden gecikme ağırlık fonksiyonu.	36

GEZGİN HABERLEŞME SİSTEMLERİ İÇİN YALIN ZAMANLAMA ALGORİTMASI

ÖZET

Günümüzde gezgin iletişim sistemlerini kullanan kullanıcı sayısı öngörülenin çok ötesinde artmıştır. Üçüncü nesil iletişim sistemlerinin desteklediği yüksek hızlı veri iletimi sayesinde aboneler kablolu sistemler yerine artık gezgin iletişim sistemlerini tercih etmeye başlamışlardır. Kullanıcı sayısındaki yükseliş yanında kullanıcıların tüketmeye başladığı aylık ortalama veri miktarı yüzlerce Mbyte veya GigaByte seviyelerine yükselmiştir. Günümüzde operatörler yüksek veri trafiğini ve hızını karşılamak için 3GPP (3rd Generation Partnership Project) tarafından geliştirilmiş bir standartlar ailesi olan Dördüncü Nesil (4N) gezgin iletişim sistemlerini tercih etmektedirler. 3GPP, bünyesinde ARIB (Association of Radio Industries and Businesses), ATIS (Alliance for Telecommunications Industry Solutions), CCSA (China Communications Standards Association), ETSI (European Telecommunications Standards Institute), TSDSI (Telecommunications Standards Development Society), TTA (Telecommunications Technology Association) ve TTC (Telecommunication Technology Committee) olarak toplam yedi telekom standart geliştirme organizasyonunu birleştiren bir ortaklıktır. İlk ticari 4N sistemi TelliaSoneria tarafından 2009 yılında İsveç'te açılmıştır. GSMA (Global System for Mobile communications Association) birliğinin 2017 yılı istatistiklerine göre gezgin haberleşme şebekelerini kullanan kullanıcı sayısı beş milyarı geçmiştir [1].

Kullanıcı sayısındaki kontrolsüz artış, kullanıcılar arasında etkin bir sistem kaynak paylaşımını daha da önemli kılmaktadır. Yeni nesil akıllı telefonlar ve tablet tipi cihazların yaygınlaşmasıyla kullanıcıların kullanım profili değişmiştir. Kullanıcı profili daha önce uzun süreli az sayıda şebekeye bağlanma ihtiyacı şeklindeyken şimdi az miktardaki veri iletim için daha sık şebekeye bağlanma şekline dönüşmüştür. Kullanıcı profili ve sayındaki bu değişimler halen kullanılmakta olan ve kullanıcıların servis alma paylaşımını düzenleyen zamanlama algoritmalarını verimsiz hale getirmiştir.

Yukarda sözü edilen nedenlerle günümüzde üçüncü ve dördüncü nesil gezgin veri iletim sistemlerinde kaynakların paylaşılmasına yönelik yeni bir zamanlama algoritmasının tasarımına şiddetle ihtiyaç duyulmaktadır. Bu ihtiyaç doğrultusunda bu tezde, sistem kaynaklarının kullanıcılara etkin paylaşımına olanak sağlayacak yeni bir zamanlama algoritmasının geliştirilmesi ve ürün haline getirilmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla tezde kullanılacak sistem parametreleri gerçek ve gerçek zamanlı olmayan hizmet alan kullanıcıların ihtiyaçlarına göre belirlenmiş ve kullanıcılara en hızlı/kesintisiz/kaliteli hizmet verebilen dinamik bir zamanlama algoritması geliştirilmiştir.

LEAN SCHEDULING ALGORITHM FOR WIRELESS COMMUNICATION

SUMMARY

The number of mobile communication system users have increased far beyond the prescribed at the present days. Subscribers start to prefer mobile communication systems rather than data transmission cable system as a result of high speed data transmission with third-generation mobile system. Besides the increase in the number of subscribers, the average amount of consumed subscriber's data has increased to the level of hundreds of Megabytes or Gigabytes. At the present day, operators prefer the family of standard, Fourth Generation (4G) mobile communication systems which developed by 3GPP (3rd Generation Partnership Project) to support the high data rate traffic and its speed. 3GPP is a partnership that combines seven on-site telecom standards development organizations which are ARIB (Association of Radio Industries and Businesses), ATIS (Alliance for Telecommunications Industry Solutions), CCSA (China Communications Standards Association), ETSI (European Telecommunications Standards Institute), TSDSI (Telecommunications Standards Development Society), TTA (Telecommunications Technology Association) and TTC (Telecommunication Technology Committee). The first commercial 4G system in Sweden was activated in 2009 by TelliaSoneria. According to the statistics of Global System for Mobile communications Association (GSMA), the number of unique subscribers using mobile networks exceeds 5 billion in 2017 [1].

Uncontrolled increase in the number of subscribers makes the effective system resource sharing among users even more important. Subscribers usage profile has changed with the widespread use of the new generation of smart phones and tablet type. These changes in the subscriber profile and number have made the scheduling algorithms which are still being used and regulating the service of subscribers inefficient.

For the reasons mentioned above, a new scheduling algorithm in the third and fourth generation mobile data transmission system for the allocation of resources is sorely needed at the moment. In line with the requirements of this thesis, a new scheduling algorithm and its product development are aimed for the effective sharing of system resources. For this purpose, this thesis proposes a new design of the 3GPP LTE (Long Term Evolution) downlink scheduler. Scheduling is one of the essential functions in LTE networks. It interacts intimately and exchanges information with other functionalities such as Link Adaptation and Power Control to use the system resources effectively. In this thesis, a new throughput and CQI (Channel Quality Indicator) aware scheduling algorithm is proposed by integrating Best CQI and PF (Proportional Fair) scheduling algorithms. The integration approach inspired by Lean production method is used for these two scheduling algorithms. The proposed algorithm is called as Lean Scheduler. There is no prior art known to us which applies Lean production concept to LTE downlink scheduling algorithms. Simulation results prove that the proposed new Lean Scheduling algorithm exceeds the fairness performance of Best CQI and the

throughput performance of PF algorithms. In addition, the proposed algorithm delivers a sufficient performance to run a communication application at cell edge.

Scheduler allows sharing of radio and base station resources between different radio bearers. It provides a trade-off between user fairness and system performance. Considering this expectation, a new delay based Long Term Evolution (LTE) scheduler is also proposed for VoLTE (Voice over LTE) in this thesis. This second proposed algorithm is based on the scheduler having knowledge of the age of Real Time (RT) applications packets. By considering the age of the packet with Lean production concept, the scheduler can determine different type RT applications packets must be scheduled within their packet delay budget. The proposed algorithm is called as Delay Based Lean Scheduler. Simulation results shows that the proposed Delay Based Lean Scheduling algorithm provides a superior throughput and delay performance than M-LWDF (Maximum-Largest Weighted Delay First) algorithm independent from the number of user. M-LWDF is the most common used delay based algorithm in literature.

The term ‘lean’ is popularized in Europe, which clearly explains the significant performance gap between Toyota Production System (TPS) and western automotive production systems. It defines the key elements accounting for this superior performance as lean production. The core idea of lean aims maximizing customer value while minimizing waste. Lean means creating more value for customers with fewer resources.

Idea of lean can be applied to any industry or sector even though lean is generated for the automotive manufacturing environment. Lean efficiency matrix is the key factor to understand the Lean philosophy. Our Lean scheduler proposal to LTE resource allocation problem builds on resource and flow efficiencies in Lean matrix. Radio resource usage efficiency and fairness in LTE are mapped to resource and flow efficiencies in Lean matrix respectively. Our Lean scheduler strategy obtains a balance between flow efficiency and resource efficiency effectively.

The downlink scheduling in LTE allocates UEs to Resource Blocks (RBs) using the input parameters such as highest signal to noise ratio, order of the modulation, coding and spatial multiplexing. LTE scheduler is responsible for the distribution of control and user data on the physical resource blocks in time and frequency domains across the radio interface. It multiplexes and schedules the subscribers simultaneously for efficient use of radio resources. A scheduler is able to give a sufficient performance to run a communication application at an acceptable level of quality.

A bounded scalar metric which is generated for k th user in response to a real-time measurement for CQI, instantaneous and average throughputs is defined. This metric is used as ranking operation in the proposed scheduler. It is then optimized to guarantee a sufficient performance to run a communication application at an acceptable cell edge quality. After obtaining metric value for all users, the proposed scheduler starts allocating radio resources in a rank order methodology during the total simulation time in Transmission Time Intervals (TTIs).

The second proposed algorithm for RT traffic determines that the real time conversational and media consumption packets must be prioritized over non-real time user while non-real time users have minimum acceptable throughput. Non-real time users are social and sharing application ones. The proposed scheduler results in an efficient scheduling of users. Setting a high value for packet delay budget may result in a reduction of the real time conversational application quality experienced by the

end users. On the other hand, setting a small value for packet delay budget may result in a reduced average uplink and downlink throughput for non-real time users.

The priority queue weights define the prioritization of the users according to age of data, packet delay, quality and throughputs. There are three priority queue weights for proposed delay based scheduling. Delay based weight is calculated according to the age of the data and the packet delay budget. The older data gets higher weight. Channel quality weight is calculated based on the UE reported channel quality. Higher channel quality gives higher weight. The last weight is calculated from the instantaneous and average throughput values. The corresponding priority queue weights shall be calculated according to the requirements set in the proposed scheduling algorithm. The weight of RT and non-RT type applications changes differently. The delay based scheduled users will not have priority over non-real time users until it is necessary. After obtaining metric value for all RT and non-RT users, the proposed scheduler starts allocating radio resources in a rank order methodology.

1. GİRİŞ

İlk nesil gezgin iletişim teknolojisi NMT (Nordic Mobile Telephony), AMPS (Advanced Mobile Phone Service) ve TACS (Total Access Communication System) sistemlerini içermektedir. Bu sistemlerin ortak özelliği ses kullanıcı trafiğini analog FDMA (Frequency Division Multiple Access) radyo iletişim tekniğini kullanarak iletilmesiydi. NMT 1975’li yıllarda geliştirilmiş ve 1980’li yıllarda kullanılmaya başlanmıştır.

İkinci nesil gezgin iletişim teknolojisi GSM (Global System for Mobile communications), D-AMPS (Dual-mode AMPS), PDC (Personal Digital Communications) ve IS-95 gibi sistemleri içermektedir. İkinci nesil gezgin iletişim sistemlerinde yeni olan özellik ses ve veri trafiğini desteklemesiydi. Ses ve veri trafiğini TDMA (Time Division Multiple Access) veya CDMA (Code Division Multiple Access) devre anahtarlama (circuit switched) radyo teknikleriyle sağlamaktaydı. GSM standartlaşması 1982 yılında başlamış ve kullanıma 1991 yılında başlamıştır.

GPRS (General Packet Radio Service) özelliğinin ikinci nesil gezgin iletişim teknolojisine eklenmesiyle 2.5 Nesil olarak adlandırılmıştır. Daha sonra gelen iyileştirilmiş veri iletim özelliği EDGE (Enhanced Data rates for GSM) ve TDMA-Evolution ile birlikte 2.75 Nesil olarak tanımlanmıştır.

ITU (International Telecommunication Union) birliği üçüncü nesil gezgin haberleşme sistem standardının klavuzu olan IMT-2000 standardına 1986 yılında çalışmaya başlamıştır. 1992 yılında yapılan WARC (World Administrative Radio Conference) isimli konferansta 1885-2025 ve 2110-2200 MHz bandları tüm dünyada kullanılması planlanan üçüncü nesil gezgin haberleşme frekansı olarak seçilmiştir.

ETSI (European Telecommunications Standards Institute) enstitüsü FDD (Frequency Division Duplex) ve TDD (Time Division Duplex) tip UMTS (Universal Mobile Telecommunication System) sistemleri için çoklu erişim yöntemi olarak WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access) ve TD-CDMA (Time Division – Code

Division Multiple Access) yöntemlerini Ocak 1998 tarihinde oy birliğiyle seçti. UMTS avrupa kıtasında üçüncü nesil iletişim sistemleri için kullanılan terimdir. Üçüncü nesil iletişim sistemleri 2001 yılında Japonya’da ve 2003 yılında avrupa kıtasında ticari olarak kullanılmaya başlanmıştır.

3GPP (3rd Generation Partnership Project) 1998 yılının Aralık ayında kurulan işbirliği anlaşmasıdır. Bu iş birliği anlaşması ARIB, CCSA, ETSI, TTA ve TTC gibi telekom standartizasyon kuruluşlarını bir araya getirmiştir.

3GPP işbirliği projesinin ana kapsamı FDD ve TDD tip radyo erişim ve GSM çekirdek şebekesi üzerine kurulacak üçüncü nesil iletişim sistemleri için tüm dünyada uygulanabilir teknik şartname ve raporların hazırlanmasıdır. Daha sonra 3GPP kapsamı bir önceki gezgin iletişim sistemi olan GSM ve onun veri iletişim sistemleri için kullanılan GPRS ve EDGE teknolojilerinin sürdürülebilirliği ve geliştirilmesi içerecek şekilde genişletilmiştir.

Üçüncü nesil iletişim sistemleri için kullanılan ilk 3GPP şartnamesi 1999 yılında hazırlanmış ve Sürüm 99 olarak isimlendirilmiştir. Sürüm 99 2 Mbps teorik hızı destekleyecek şekilde CS (Circuit Switched) ve PS (Packet Switched) trafiğini desteklemekteydi.

Üçüncü nesil iletişim sistemlerinin gelişimi sonraki sürümlerde devam etmiştir. Yüksek hızlı baz istasyonundan telefona doğru, DL yönünde yüksek hızlı veri transfer erişim özelliği HSDPA (High Speed Downlink Packet Access) 2002 yılında sürüm 5 ile gelmiştir. Bir sonraki sürüm olan sürüm 6’da ise telefonda baz istasyonuna doğru yüksek hızlı veri transfer özelliği HSUPA (High Speed Uplink Packet Access) 2004 yılında duyurulmuştur. HSDPA ve HSUPA özellikleriyle üçüncü nesil gezgin haberleşme sistemlerinde DL ve UL yönünde sırasıyla 14 Mbps ve 5.76 Mbps hızlarına ulaşılmıştır. HSDPA ve HSUPA özelliklerinin her ikisine birden HSPA (High Speed Packet Access) olarakta isimlendirilmektedir. HSUPA diğer bir ismi ise EUL (Enhanced Uplink)’tir.

Üçüncü nesil gezgin iletişim sistemleri için bir sonraki basamak HSPA+ olarak tanımlanan sürüm 6 ve 7’dir. Teorik ulaşılabilir DL hızı 42 Mbps’e çıkmıştır. Yüksek hıza MIMO (Multiple Input Multiple Output) anten teknolojisi ve yeni modülasyon tiplerinin kullanılmasıyla ulaşılmıştır.

3GPP işbirliği projesi 2007 yılının Kasım ayında E-UTRAN (Evolved UTRAN) isimli yeni kavram ile genişletilmiştir. İlk çalışmalar resmi olarak 2006 yazında başlamış ve LTE (Long Term Evolution – Evolved Packet System RAN) isimli çalışma kalemi oluşturulmuştur. Tüm dünyada geçerli olması istenen dördüncü nesil radyo erişim ve iyileştirilmiş çekirdek şebekelerinin standartizasyonu için elliden fazla şirket ve enstitü bu girişime destek vermiştir. 3GPP’deki bu yeni standart oluşturma girişimi iki iş kalemine ayrılmıştır. Birincisi olan LTE (Long Term Evolution) iş kaleminin amacı radyo şebekesinin, ikincisi olan SAE (System Architecture Evolution) ise çekirdek şebekenin geliştirilmesini amaçlamıştır. Her iki iş kaleminde de sadece PS (Packet Switched) alanı adreslenmiştir. Bu iki iş kaleminin sonucunda E-UTRAN ve EPC (Evolved Packet Core) teknolojileri standartlaştırılmıştır. E-UTRAN ve EPC’nin her ikisi birden EPS (Evolved Packet System) olarak isimlendirilmektedir. LTE ve SAE 3GPP sürüm 8 ile gelmiştir.

3GPP’de iş kalemi ismi olan E-UTRAN ve EPC ise daha sonra sırasıyla radyo erişim ve çekirdek şebekelerinin isimleri olmuştur.

3GPP’ye paralel olarak ikinci bir işbirliği projesi olan 3GPP2 nin amacı IMT-2000 (International Mobile Telecommunications) temelli şebekelerin standartizasyonu için oluşturulmuştur. 3GPP2 işbirliği projesi cdmaOne, cdma2000 ve EV-DO (HRPD) teknolojilerinin geliştirmesine ağırlık vermiştir.

E-UTRAN teknolojisinin standartlaşması DL için OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) ve OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) temellidir. UL yönü içinse SC-FDMA (Single Carrier Frequency Domain Multiple Access) seçilmiştir. Bu seçimler sonucunda 1.4 MHz band genişliğinden 20 MHz band genişliğine kadar farklı spektrum seçenekleri mevcuttur. FDD tip LTE’de UL ve DL spektrum farklı frekanslarda, TDD içinse aynı frekansta ve farklı zamanlarda kullanılmaktadır.

LTE teknolojisi dördüncü nesil yerine 3.9 nesil olarak adlandırılmaktadır. Dördüncü nesil olarak adlandırılmamasının sebebi teorik olarak 1 Gbps hızı desteklemesi gerekmektedir. 1 Gbps teorik hıza LTE-A (LTE Advanced) teknolojisiyle ulaşılması planlanmıştır. LTE-A sürüm 10 olarak standartlaştırılacaktır.

LTE teknolojisi sadece PS desteklediği için normal ses çağrıları gibi CS servisleri PS paket taşıyıcılarıyla (bearer) taşınmaktadır. Bu şekilde sesin iletilmesine VoLTE (Voice Over LTE) olarak isimlendirilmektedir.

1.1 Tezin Amacı

2021 yılında gezgin haberleşme sistemlerinde üretilen trafiğin yaklaşık %90 akıllı telefonlardan kaynaklanması beklenmektedir [2]. Ayrıca 2021 yılının sonunda Gezgin haberleşme sistemleri abone sayısı 9 milyara ve aylık trafik miktarının 50 ExaByte'a yükselmesi tahmin edilmektedir. Bu trafik ve kullanıcı artışının yanında akıllı telefonların gündelik hayatımıza girmesiyle kullanıcıların davranışları da değişmiştir. Modern uygulamaların yüklenmiş olduğu akıllı telefonlar sms veya ses çağrısı gibi geleneksel servislerin kullanımı etkilemiş ve bazı servislerin yerine akıllı telefon uygulamalarının geçmesini sağlamıştır. Sosyal medya, VoIP (Voice Over Internet Protocol) ve IM (Instant Messaging) gibi haberleşme uygulamalar için harcanan süre toplam akıllı telefon için harcanan sürenin yaklaşık %30'unu oluşturmaktadır [3]. Bu tür uygulamalar gezgin haberleşme şebekelerine erişim sırasında FTP (File Transfer Protocol) uygulamalarına göre daha az veri transferi ihtiyacı duyarken daha sık bağlantı sayısına ihtiyaç duymaktadırlar. Gezgin haberleşme şebekelerinde kullanıcı davranışlarını inceleyen çalışmalar karşılaştırma için throughput, hakkaniyet ve kanal kalitesi gibi temel kavramları kullanmışlardır. Throughput baz istasyonu ile kullanıcı arasında olan hattın saniyede taşıdığı bilgi (bit) miktarıdır. Hakkaniyet kullanıcıların baz istasyonunda radyo veya sistem kaynaklarına ne ölçüde ulaştıklarının göstergesidir. Kanal kalitesi ise referans kanal sinyalinin alıcıda ölçülerek ne kadar kirliliğe ve zayıflamaya maruz kaldığının göstergesidir. Şehirlerdeki uygulama kapsamı raporunda [4], haberleşme uygulamaları için kabul edilebilir kalite seviyesi ve DL throughput oranları 17 şehir için paylaşılmıştır. Veri ölçümleri şehir bazında karşılaştırmak için speedtest.net ölçümlerinden faydalanılmıştır. Verisi toplanan şehirler arasında sadece Kopenhag ve Oslo şehirleri %90 olasılıkla 1 Mbps DL throughput üstünde servis verebilmektedir. Bu raporda şehir seviyesinde son kullanıcıları tatmin edecek seviye ve kalitede servis vermenin kolay olmadığı ortaya çıkmıştır. Kullanıcılar haberleşme uygulamalarını kabul edilebilir bir kalitede çalıştırmaları için gerekli olan 1 Mbps throughput değerini 17 şehrin sadece ikisinde alabilmektedirler. 1 Mbps değeri bu tez kapsamında geliştirilmiş olan Yalın

Zamanlayıcı için eşik değeri olarak kullanılacaktır. Kullanıcı sayısında ve trafik değerlerindeki artış yanında kullanıcı davranışlarındaki değişimler gezgin haberleşme sistem kaynaklarının son kullanıcılar arasında paylaşımını daha da önemli hale getirmektedir. Gezgin haberleşme sistem kaynaklarının son kullanıcılar arasında paylaşımı için kullanılan algoritmalar WCDMA ve LTE için aynıdır. Sadece kaynak tiplerine ve VoIP trafiğine göre ufak güncellemeler içermektedir. WCDMA ve LTE şebekelerde ticari olarak kullanılan en yaygın zamanlama algoritması PF (Proportional Fair) algoritmasıdır ve 2001 yılında Holtzman [5] tarafından bulunmuştur. Onaltı yıl içinde kullanıcı sayısı, davranışı ve trafiğindeki değişimler son kullanıcılar arasında hakkaniyet ve throughput performanslarının dengelenmesini daha da zorlaştırmıştır. Gezgin haberleşme şebekelerinde PF algoritması dışında zamanlayıcı olarak kullanılan RR (Round Robin), Best CQI (Best Channel Quality Indicator) algoritmaları güncel son kullanıcı ihtiyaçlarına karşılık verememektedir. Sonuç olarak gezgin haberleşme sistemlerinde kaynakların güncel son kullanıcı davranış ve etkilerini dikkate alarak kaynakların etkili bir biçimde paylaştırılabilmesi için yeni bir zamanlama algoritmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Tez çalışmasının birinci hedefi güncel şartları dikkate alarak yeni bir zamanlama algoritması geliştirmektir. İlk olarak Yalın Zamanlayıcı (Lean Scheduler) isimli algoritma throughput ve CQI parametrelerini dikkate alacak şekilde geliştirilmiştir. Throughput ve CQI parametreleri otomotiv sanayiindeki yalın üretim tekniği dikkate alınarak LTE zamanlama algoritması için kullanılmıştır. Yalın üretim tekniğiyle ilgili gezgin haberleşme sistemlerinde bilinen daha önce yapılan bir çalışma yoktur. Yapılan simülasyon sonuçlarına göre Yalın Zamanlayıcının RR, PF ve Best-CQI gibi diğer zamanlayıcı algoritmalara göre daha iyi throughput ve hakkaniyet sağladığı gösterilmiştir.

İkinci olarak Yalın Zamanlayıcı algoritması gerçek zamanlı kullanıcılarının gecikmesini dikkate alacak şekilde güncellenmiş ve Gecikmeye Duyarlı Yalın Zamanlayıcı (Delay Based Lean Scheduler) geliştirilmiştir. Yapılan simülasyon sonuçlarına göre yeni geliştirilen Gecikmeye Duyarlı Yalın Zamanlayıcısı literatürde en yaygın kullanılan M-LWDF (Maximum-Largest Weighted Delay First) algoritmasına göre daha iyi throughput ve gecikme performansı göstermiştir. Gecikmeye Duyarlı Yalın Zamanlayıcısı hücredeki VoLTE kullanıcı sayısının düşük

veya yüksek olmasından bağımsız olarak M-LWDF algoritmasına göre daha iyi performans göstermiştir.

Tezin ikincil amacı olarak, yeni geliştirilen Yalın ve Gecikmeye Duyarlı Yalın Zamanlayıcılarının throughput, hakkaniyet ve gecikme parametrelerine göre daha iyi performans sağlamanın yanında, hücrelerin enerji tüketiminde iyileştirme amaçlanmıştır. Bu amaçla taşınan bit başına tüketilen enerji miktarında iyileşme sağlanmıştır.

1.2 Hipotez

Bu tezde gezgin haberleşme sistemleri için Yalın Zamanlayıcı isimli yeni bir zamanlama algoritması önerilmiştir. Önerilen yeni algoritma gezgin haberleşme sistemlerinde radyo kaynakları verimli kullanırken enerji tüketimini artırmamayı amaçlamaktadır. Böylece kullanıcılar arasında kaynaklar verimli şekilde paylaştırılırken bit başına tüketilen enerjinin azaltılması başarılmıştır. Yalın Zamanlayıcı, yüksek akış verimliliğini (flow efficiency) kaynak verimliliğine göre önceliklendirerek sistem kaynaklarını en yüksek verimde kullanırken gecikme değerlerini dikkate alarak yeterli hakkaniyet sağlamayı amaçlamaktadır. Bu dinamik yöntem otomotiv sektöründeki yalın üretim tekniğinden ilham alınarak geliştirilmiştir.

Tezin ikinci kısmında gezgin haberleşme sistemleri ve mevcut zamanlama yöntemleri anlatılmaktadır. Bir sonraki bölümde yalın metodolojisine giriş yapıp önerilen Yalın Zamanlayıcı ve Gecikmeye Duyarlı Yalın Zamanlayıcı algoritmaları tartışılmıştır. Dördüncü bölümde simülasyon programının özellikleri incelenmiş ve simülasyon sonuçları paylaşılmıştır. Son kısımda ise sonuç ve öneriler tartışılmaktadır.

2. GEZGİN HABERLEŞME SİSTEMLERİNDE ZAMANLAMA

2.1 Gezgin Haberleşme Sistemleri

LTE üçüncü nesil gezgin haberleşme sistemi olan WCDMA'den sonra gelen haberleşme sistemidir. Üçüncü nesil iletişim sistemlerinden daha geniş bant aralığı ve spektral verimliliği artırarak throughput değerlerinde belirgin iyileştirmeler sağlamıştır. LTE throughput iyileşmesinin yanında yüksek verimli optimize edilmiş radyo erişim teknolojisi sayesinde düşük gecikme değerlerine ulaşabilmektedir. Hem throughput hem de gecikmede iyileşme esnek spektrum seçenekleriyle sağlanabilmektedir [24].

LTE radyo arayüzü aşağı yönde OFDMA çoklu erişim yöntemini kullanırken yukarı yönde SC-FDMA kullanmaktadır. Yukarı yönde OFDMA yerine SC-FDMA seçilmesinin nedeni SC-FDMA erişim yönteminin telefon için daha düşük PAPR (Peak to Average Power Ratio) değerlere sağlayabilmesinden kaynaklanmaktadır. Bu sayede telefon üzerinde çalışan güç yükselteci daha basit ve düşük maliyetli şekilde üretilebilmektedir. Yukarı yönde zaman erişim yöntemi ayrıca DFTS-OFDM (Discrete Fourier Transform Spread – OFDM) olarakta isimlendirilmektedir.

OFDM bir çok gecikmenin olduğu ve çoklu (multipath) yansımaların olduğu ortamda meydana gelen yüksek zaman dağılmasına karşı çok iyi bir performans gösterebilmektir. Bunun sebebi taşınan veri bir çok alt taşıyıcıya dağıtılmıştır. Bu sayede her kullanıcı düşük simge (symbol) oranı ve buna karşılık olarak uzun simge zamanına sahiptir. Bu sayede ISI (Inter Symbol Interference) kirlilik miktarı azaltılabilmektedir.

Dördüncü nesil gezgin haberleşme sistemlerinin hem FDD hem TDD tip radyo erişimini sağlaması, eşli veya eşli olmayan frekans çiftlerinde kullanılabilmesini mümkün kılmaktadır. FDD kullanıldığı zaman hem UL hem DL için farklı frekans bantları kullanılmaktadır. TDD tip radyo erişim kullanıldığında aşağı ve yukarı yönde iletim aynı frekansta farklı zamanlarda yapılmaktadır. Dolayısıyla TDD tip radyo iletişimde FDD'ye göre daha fazla gecikme ve trafik verisi olmayan bilginin

(overhead) taşınması durumları görülebilmektedir. TDD frekans bant genişliği kısıtlı olan operatörler tarafından tercih edilmektedir.

Nesnelerin interneti kapsamında sensörlerin kullanılması için ayrıca HD-FDD (Half Duplex-FDD) tip radyo iletişim tanımlanmıştır. Bu şekilde telefon yada sensörlerin maliyetleri düşürülmek istenmektedir.

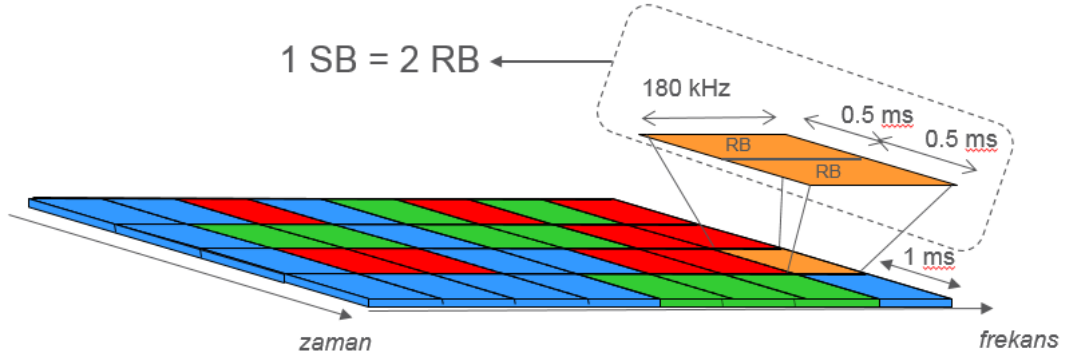
Radyo kaynakları zaman ve frekans uzayında parçalara ayrılmıştır ve bu parçalar RB (Resource Block) olarak adlandırılmaktadır. Zamanlama algoritmaları bu zaman ve frekans kaynaklarını farklı kullanıcılara her iletim aralığında (TTI) atamak için kullanmaktadır. LTE gezgin haberleşme sistemleri çok kısa iletim aralığı olan 1 ms üzerine geliştirilmiştir. 1 ms TTI değeri sayesinde tüm zamanlama gibi fonksiyonların operasyonunun kısa sürede gerçekleşmesini sağlamaktadır. Bundan dolayı LTE gezgin haberleşme sistemlerinde radyo gecikme değerleri ikinci ve üçüncü nesil haberleşme sistemlerine göre daha düşük değerlere sahiptir.

Üçüncü nesil haberleşme sistemlerinin tersine yukarı yönde SC-FDMA çoklu erişim yöntemi kullanıldığı için hücre içi diklik (orthogonality) daha iyi sağlanabilmektedir. Bu yüzden LTE gezgin haberleşme sistemlerinde WCDMA için kullandığımız detaylı güç kontrolüne ihtiyaç duyulmamaktadır.

2.2 Zamanlama

Bu bölümde radyo kaynak yönetimi için kullanılan zamanlamanın detaylarını paylaşılacaktır. Zamanlama hem aşağı hem yukarı yönde yapılmaktadır. Her iki yönde de gerçekleştirilen zamanlamanın kontrolü baz istasyonunda yapılmaktadır. Zamanlayıcı baz istasyonu üzerinde olup yukarı yönde telefonların kullanacağı RB setini belirlemektedir. Aşağı yönde ise ara bellek baz istasyonu üzerinde olduğu için her telefona kullanacağı RB seti bilgisiyle birlikte radyo kanal atamaları da yapılabilmektedir. Yukarı yönde ara bellek telefon üzerinde olduğu için RB setlerini radyo kanalları arasındaki dağılımı telefonun inisiyatifindedir.

Zamanlayıcının kullanıcılara atadığı en küçük birim frekans uzayında 12 alt taşıyıcı yani 180 kHz ve zaman uzayında ise bir alt çerçeve (frame) 1 ms'ye eşittir. Bu her biri 180 kHz ve 0.5 ms olan ardışık iki RB'ye denk gelmektedir ve bir SB (Scheduling Block) olarak isimlendirilmektedir (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 : Gezgin haberleşme sistemi LTE’de RB ve SB yapısı.

Gezgin haberleşme sistemi LTE hızlı zamanlamayı destekleyerek etkili kaynak kullanımını sağlamaktadır. Hızlı zamanlama sırasında aşağı ve yukarı yönde ortak trafik kanalları olan PDSCH (Physical Downlink Shared Channel) ve PUSCH (Physical Uplink Shared Channel) kullanıcılar arasında taksim edilmektedir. Aşağı yönde kaynak ataması her kullanıcının sahip olduğu radyo taşıyıcıları seviyesine çıkmaktadır. Bu kaynak taksimi her 1 ms’de gerçekleşmekte ve kullanıcıların anlık trafik isteği, QoS değeri ve kanal kalitesine göre yapılmaktadır. Yine yukarı yönde kaynak ataması yapılırken RB setleri frekans uzayında ardışık olarak atanarak SC-FDMA yapısı bozulmamaktadır. Atanan RB sayısı DFT’ye (Discrete Fourier Transform) göre atandığı için belirli sayıda olabilmektedir. Bu yüzden yukarı yönde telefona atanan RB setleri kısıtlı sayıdadır.

Zamanlayıcı etkili kaynak tüketimini sağlarken aynı zamanda kullanıcılara atanan radyo kanallarının QoS kısıtlamalarını dikkate almaktadır. Bu kısıtlamalardan biri VoLTE kullanıcılarının ses paketlerini 100 ms içerisinde iletmeleri gerektiğidir [25]. Eğer tüm kullanıcılar için yeterli kaynak yoksa zamanlayıcı kullanıcılar ve kullanıcılara ait radyo kanalları arasında önceliklendirme yapmaktadır.

Aşağı yönde her hücre için zamanlayıcının kontrol ettiği kaynaklar,

- RB
- Kontrol kanal kaynakları, PDCCH (Physical Downlink Control Channel)
- Güç
- Farklı anten konfigürasyonları kullanıldığında iletim önceliği

- Baz istasyonunun işlemci gücü

Yukarı yönde her hücre için zamanlayıcının kontrol ettiği kaynaklar ise,

- RB
- Baz istasyonunun işlemci gücü
- Kontrol kanal kaynakları, PDCCH

şeklinde. Hem aşağı yönde hem yukarı yönde ortak kullanılan kaynak ise baz istasyonunu işlemci gücüdür.

Zamanlayıcı kullanıcıların kontrol ve kullanıcı verisi için radyo arayüzündeki RB'ların atamasını kontrol etmektedir. Çoklu kullanıcıya aynı anda RB ataması yaparak spektral ve donanımsal kaynakları en iyi throughput ve hücre kapasitesi elde edilecek şekilde paylaşır. Her 1 ms için zamanlayıcı kaynaklara ulaşacak kullanıcıları belirler. Radyo kanal kısıtlamaları ve QoS değerlerini dikkate alarak her radyo taşıyıcısına (bearer) bir öncelik tanımlar. Yüksek öncelik o kullanıcının kaynaklara ulaşma olasılığını artırır.

Zamanlama DRA (Dynamic Resource Allocation) olarak ta adlandırılmaktadır ve fonksiyon olarak baz istasyonunda RRM (Radio Resource Management) biriminin altındadır. RRM fonksiyonu baz istasyonunda güç kontrol, LA (Link Adaptation) ve hücreler arası kirlilik kontrol birimleriyle yakın ilişki içindedir. LA iletim tipinin (transport format) seçimine karar verirken zamanlayıcıya bilgilendirme yaparak kaynak ataması iletim tipini dikkate almaktadır. İletim tipinin seçiminden kasıt uygun MCS (Modulation and Coding Scheme) tipinin seçimidir. LA doğru MCS seçimiyle hücre sınırındaki kullanıcıya da servis verilebilmesini sağlamaktadır. Baz istasyonunda kullanılan anten tipine göre LA çoklu anten iletim tipinin seçiminden de sorumludur.

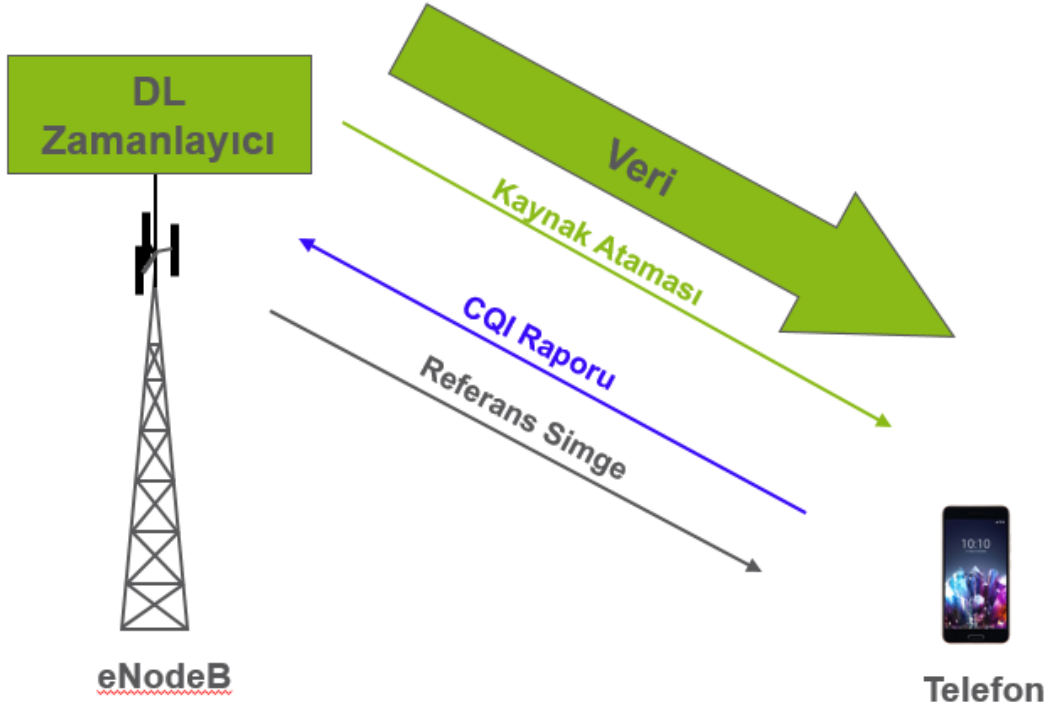
Her TTI başında zamanlayıcı hücrede kullanılabilir RB'lerin listesine, güç bilgisine, PDCCH kontrol kanal kapasitesine ve kullanıcı verisi için OFDM simge sayısına ulaşır. Eğer yeterli kaynak varsa zamanlayıcı baz istasyonu işlemci gücünü kontrol eder. Ayrıca yukarı yönde zamanlama için telefonda ara bellek durumunu içeren BSR (Buffer Status Report) mesajını da dikkate alır. Daha sonra zamanlayıcı LA ve güç kontrol özellikleriyle birlikte uygun miktarda kaynağı telefona tahsis eder. Kaynak

tahsisi yapmadan önce telefonun ulaşılabilir ve veri alımı için senkronize olduğundan emin olur.

2.2.1 Aşağı yönde zamanlama

Baz istasyonu radyo kanal koşullarına göre zaman ve frekans uzayında zamanlama yapmak ve hızlı kanal bağımlı LA için telefondan CQI raporlaması yapmasını ister. Telefon CQI değerini baz istasyonunun gönderdiği aşağı yöndeki RS (Reference Signal) ölçümleriyle hesaplamaktadır. TDD tip radyo erişimde aşağı ve yukarı yönde iletim için aynı frekans kullanılsa bile farklı radyo kirlilik değerlerine sahiptir. Bu yüzden TDD tip radyo erişiminde aynı kanal kalite bilgisi kullanmak yanıltıcı olabilmektedir. FDD tip radyo erişimde aşağı ve yukarı yönde farklı frekanslar kullanıldığı için farklı yol kaybı değerlerine sahiptirler.

Zamanlayıcı, RB gibi telefonun kullanacağı frekans ve zaman uzayındaki kaynakları telefona aşağı yönde veri iletimi için atamasını yapar. Kaynak ataması telefonun raporladığı CQI bilgisi ve kullanıcının sahip olduğu radyo kanal tiplerinin QoS ihtiyaçlarına göre zamanlayıcı tarafından karar verilir. Hangi kaynakları atadığı bilgisi telefona PDCCH kontrol kanalıyla iletilir. Telefon PDCCH kontrol kanalını düzenli olarak gözlemleyerek PDSCH trafik kanalı üzerinde zamanlayıcının kendisi için gönderdiği veriden haberdar olur. Aşağı yönde zamanlayıcının temel çalışma aşamaları Şekil 2.2’de verilmiştir.



Şekil 2.2 : Aşağı yönde zamanlayıcının temel çalışma aşamaları.

Zamanlayıcı aşağı yönde, frekans uzayında her bir TTI için, kullanıcılara RB atamasından sorumludur. Aşağı yönde gerçekleştirilen zamanlama için ilk olarak düşük frekanslarda başlayarak RB'ları atamaya başlar. Radyo kanal kalitesi için kullanılan CQI bilgisi aşağı yönde zamanlayıcıya PUCCH (Physical Uplink Control Channel) veya PUSCH kanallarıyla iletilir. Telefon baz istasyonuna CQI bilgisini eğer PUSCH trafik kanalı iletimi planlanmamışsa PUSCH üzerinden değilse PUCCH kontrol kanalı üzerinden iletir. Telefon iletim için yukarı yönde SC-FDMA tekniğini kullandığı için aynı anda iki radyo kanalının iletimi mümkün değildir. PUCCH kontrol kanalının kapasitesi çok sınırlı olup sadece on bittten oluşmaktadır. PUSCH trafik kanalı CQI için daha fazla bit ayırabilmekte ve daha detaylı CQI bilgisi taşıyabilmektedir. Telefon CQI bilgisini baz istasyonunu isteği doğrultusunda periyodik yada periyodik olmayacak şekilde raporlayabilir.

CQI ölçümleri telefon tarafından yapılmakta olup ölçümün nasıl yapılacağı tamamen telefonun kontrolündedir. Telefon çevresindeki kirlilik ölçümleri RE (Resource Element) veya RS'e (Reference Symbol) göre yapabilmektedir. Eğer RS'e göre yapılırsa RS sürekli baz istasyonu tarafından yayınlandığı için telefon olduğundan daha düşük CQI değeri raporlayabilir. Referans olarak RE kullanıldığında ise CQI değeri hücre üzerinde bulunan trafik miktarına göre anlık değişim gösterecektir.

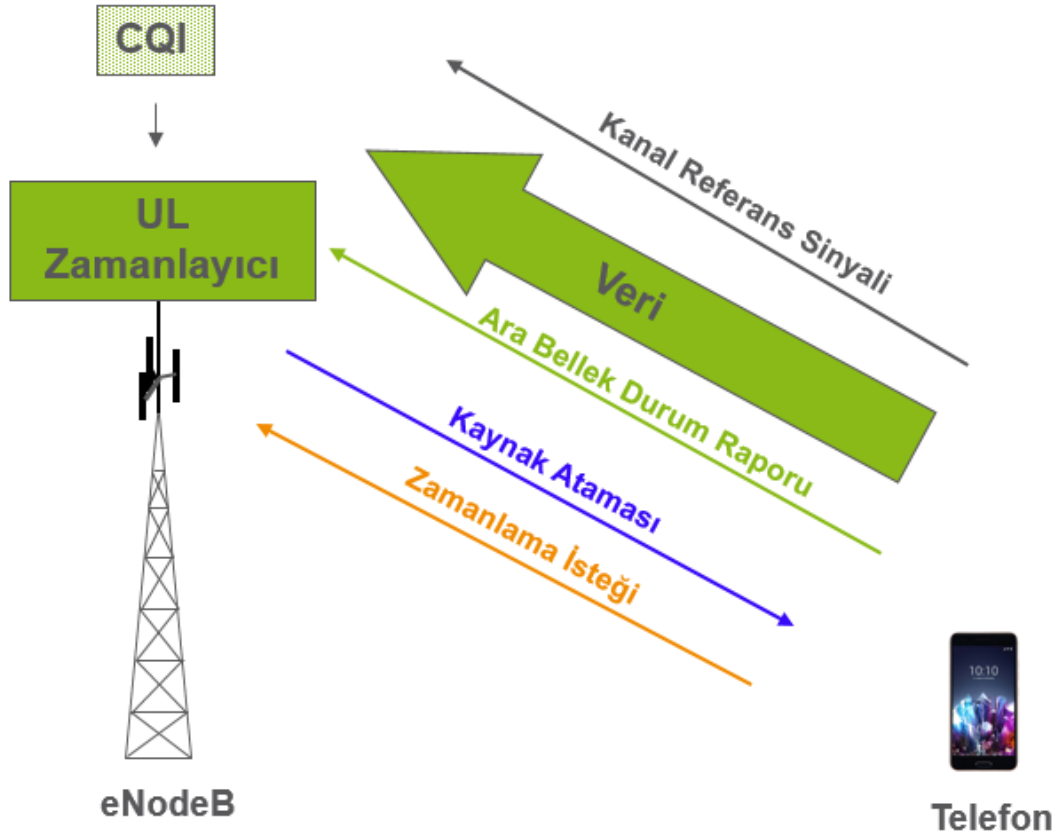
2.2.2 Yukarı yönde zamanlama

Yukarı yönde zamanlama yine aşağı yönde zamanlama gibi baz istasyonu üzerinde gerçekleşmektedir. Eğer bir telefon birden daha fazla taşıyıcıya sahipse, bu taşıyıcılar arasında önceliklendirme yapar. Telefonun sahip olduğu taşıyıcılar arasında öncelik yapması UE (User Equipment) sınıf kontrolü olarak adlandırılmaktadır. Telefon, baz istasyonu üzerinde bulunan zamanlayıcıyı ara belleğine zamanlama isteğiyle birlikte gelen veri için bilgilendirir. Daha sonra zamanlayıcı telefonun kullanabileceği zaman ve frekans kaynaklarını seçer. LA fonksiyonunun yardımıyla iletim blok biçimine, modülasyona, kodlama ve anten iletim tipine karar verilir.

Seçilen iletim blok biçimi baz istasyonu tarafından telefona bildirilir. Bunun manası telefonun baz istasyonu ile iletişim için belli bir iletim biçimini kullanmak zorunda olduğu ve baz istasyonunun bunun farkında olduğudur. Bu sayede WCDMA’de kullanmak zorunda olduğumuz yukarı yönde kontrol kanallarına LTE’de ihtiyaç duyulmamaktadır. Yukarı yönde bilgilendirme kontrol kanalının olmaması LTE’de kapsama açısından WCDMA göre üstünlük sağlamaktadır.

Yukarı yönde zamanlama isteği baz istasyonuna her 10 ms’de bir iletilir. Bu değer o hücredeki tüm telefonlar için aynıdır. Eğer PUCCH kontrol kanalı üzerinde bir zamanlama isteği için uygun kaynak yoksa telefon zamanlama isteğini ilk erişim methodu olan RACH (Random Access CHannel) ile gerçekleştirir.

Yukarı yönde zamanlayıcının telefona atadığı kaynak ve iletim parametreleri PDCCCH kontrol kanalıyla telefona iletilir. Ara bellek raporu ve PHR (Power Headroom Report) gibi ek zamanlama bilgileride trafik verisiyle birlikte baz istasyonuna iletilebilir. Baz istasyonu yukarı yöndeki veri veya kontrol kanallarından yukarı yöndeki kanal kalitesini ölçebilir. Ayrıca telefondan göndermesini istediği geniş bant kanal referans sinyali olan SRS (Sounding Reference Signal) ile yukarı yöndeki kanal kalitesini hesaplar. Yukarı yönde zamanlayıcının temel çalışma aşamaları Şekil 2.3’de verilmiştir.



Şekil 2.3 : Yukarı yönde zamanlayıcının temel çalışma aşamaları.

Aşağı ve yukarı yöndeki zamanlayıcıların her ikisinde baz istasyonu üzerinde olmakla birlikte yukarı yöndeki zamanlayıcı aşağı yöndeki zamanlayıcıya göre daha karmaşıktır. Karmaşık olmasının sebebi baz istasyonunun telefonların ne kadar kaynak istediğini ve hangi tip radyo taşıyıcısı içerdiklerini, ara bellek telefonun üzerinde olduğu için, otomatik olarak bilememesidir. Aşağı yönde ara bellek baz istasyonun üzerinde olduğu için tüm bu bilgilere otomatik olarak ulaşabilmektedir. Baz istasyonu telefonun kendisine gönderdiği bilgilere göre kaynak rezervasyonu yapabilmektedir. Telefonun gönderdiği ilk zamanlama isteği (Scheduling Request) çok kısıtlı olduğu için baz istasyonu telefona en temel kaynak atamasını yapar. Daha sonra telefon yukarı yönde iletilen trafik verisiyle birlikte detaylı ara bellek bilgisini baz istasyonu ile paylaşır. Baz istasyonu LA ve güç kontrol fonksiyonlarıyla birlikte telefonun sahip olduğu kanal kalitesini dikkate alarak telefonun ara bellekteki verisine göre RB'ların telefona atamasını gerçekleştirir.

2.3 Mevcut Çalışmalar

Literatür araştırmasında teze katkı sağlayacağı belirlenen çalışmaların kısa değerlendirilmeleri aşağıda paylaşılmıştır. Değerlendirmeler sırasında çalışmalar üç ayrı grup altında incelenmiştir:

1. Mevcut algoritmaları karşılaştıran çalışmalar
2. Mevcut algoritmaya yenilik getiren çalışmalar
3. Yeni bir algoritma öneren çalışmalar

2.3.1 Mevcut algoritmaları karşılaştıran çalışmalar

[6] nolu çalışmada gerçek zamanlı olan ve olmayan trafik türlerinde PF, EXP-PF (Exponential Proportional Fair), M-LWDF zamanlama algoritmalarının performansları, kullanıcı deneyimi göz önüne alınarak incelenmiştir. Kriter olarak MOS (Mean Opinion Score) denilen son kullanıcının memnuniyetini ölçmeye yönelik bir parametre kullanılmıştır. MOS skoru objektif ve subjektif olarak iki türdedir. Subjektif MOS skoru gerçek kullanıcılara anket yapılarak ses kalitesinin ölçülmesidir. Objektif MOS ise kullanıcıların verdikleri cevaplara göre bir matematiksel ifade çıkarılarak simülasyonlarda kalite testinde bu ifadenin kullanılmasıdır. Bu çalışmada önerilen bir algoritma yoktur. Çalışma, daha çok performans değerlendirmesi için kullanılan MOS skoru metodunun bir incelemesidir. Ayrıca simülasyon ortamının oluşturulması için kullanılan simülatör belirtilmemiştir. MOS skoruna bakıldığında bu üç algortmadan en iyisi M-LWDF algoritması çıkmıştır. Diğerlerine göre artan kullanıcı sayısına rağmen MOS skoru yüksek kalmıştır. [6] nolu çalışmada en iyi performansı gösteren M-LWDF algoritması Gecikmeye Duyarlı Yalın Zamanlayıcı algoritmasının performansının karşılaştırılması amacıyla tezde kullanılmıştır.

Altı farklı zamanlama algoritması (RR, PF, Best-CQI, Max-Min, Resource Fair, Iterative Hungarian), tam yükte (full load) çalıştığı varsayılan çoklu kullanıcı (multi-user) ve çoklu hücreli (multi-cell) bir DL LTE ağında System Level Simulator yazılımı ile [7] nolu çalışmada simüle edilmiştir. Algoritmalar throughput, hakkaniyet, enerji tüketimi ve güç tüketimi açısından karşılaştırılmıştır. Bildiride esnek bir güç modeli ile baz istasyonunun analog RF, soğutma ve anakart gibi ana bileşenlerinin ayrı ayrı tükettikleri güçler toplanarak tüketilen toplam güç elde edilmektedir. Vienna System Level Simulator yazılımı kullanılmıştır ama çalışmada yeni bir algoritma

önerilmemiştir. Elde edilen sonuçlara göre throughput açısından en iyi sonucu Best CQI verirken, fairness açısından da en kötü sonucu bu algoritmanın verdiği anlaşılmaktadır. Sonuçlar literatürde bilinen algoritmalarının performanslarının sağlaması olmuştur. Enerji tüketimi bu tez çalışmasında performans kistası olarak kullanılmıştır.

[8] nolu çalışma literatürde iyi bilinen algoritmaları giriş parametrelerine, hedeflediği hizmet tipine ve amaçlarına göre gruplandırarak incelemiş ve karşılaştırmıştır. İncelemeler bu tez çalışmasında kullanılan Vienna System-Level Simulator yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Göz önüne alınan zamanlama algoritmaları şunlardır: FIFO (First in First Out), RR, BET (Blind Equal Throughput), Weighted Fair Quening, MT (Maximum Throughput), PF, GBF (Generalized Proportional Fair), TTA (Throughput to Average). İncelenen bazı algoritmalar kendi aralarında karşılaştırılmıştır. Maximum throughput algoritması ortalama kullanıcı ve hücre thruouhput değerleri açısından Proportional Fair ve Throughput to Average algoritmalarına kıyasla en iyi sonucu verirken fairness açısından en kötü sonucu vermiştir. Yeni bir algoritma önerilmemiş olup bu tez çalışmasında karşılaştırılacak algoritmaların seçimi için referans olarak kullanılmıştır.

2.3.2 Mevcut algoritmaları yenilik getiren çalışmalar

[9] nolu çalışmada yeni nesil LTE şebekelerinde veri hızı ihtiyacını karşılayacak bir algoritma geliştirilmek istenmiştir. Bunun için Max-CQI algoritmasında değişiklikler yapılmış ve değişik trafik türlerine uyum sağlaması sağlanmıştır. Bilindiği üzere Max-CQI, TCP türünde trafiklerde iyi sonuç verse de gerçek zamanlı trafiklerde gecikmeye sebep olmaktadır. Bunun önüne geçmek için trafik türüne göre kendini ayarlayan iki adet Max-CQI algoritması geliştirilmiş ve performansı gerçek zamanlı ve gerçek zamanlı olmayan trafik senaryosunda test edilmiştir. Algoritma 1, UDP (gerçek zamanlı trafik) ve TCP (gerçek zamanlı olmayan trafik) kullanıcılarını CQI'larına göre kendi aralarında sıralayarak, UDP kullanıcılarını listenin başına, TCP kullanıcılarını ise listenin sonuna alarak kaynak dağılımı yapmaktadır. Algoritma 2, listenin başına yine UDP kullanıcılarını alırken ortalara iki trafik türünden de kullanıcı atar. Sonlarda ise çok düşük CQI'a sahip UDP kullanıcıları vardır. Simülasyonlar için LTE System Level Simulator kullanılmıştır. Uçtan uca gecikme grafiğinde algoritma 1 diğerlerine göre daha iyi sonuç vermiştir. UDP trafiğindeki veri hacmi açısından da algoritma 1

daha iyidir ancak TCP trafiğindeki veri hacminde belli sayıda kullanıcıdan sonra UDP kullanıcılar ağı baskın geldiğinden algoritmanın veri hacmi değerleri sıfır çıkarak sistem kaynaklarını verimsiz kullanmaktadır. Ayrıca sadece trafik tipine bakarak atama yapması ve kullanıcı radyo koşullarını dikkate almaması yüzünden önerilen her iki algoritma da sistem kaynaklarını verimsiz kullanmaktadır.

[10] çalışmasında LTE’de kullanılan RR ve Best-CQI algoritmaları için gerçek zamanlı trafikte servis kalitesinin artırılmasına yönelik bazı iyileştirmeler yapılmıştır. Bu iyileştirmeler sayesinde algoritmalar tıkanıklık durumunda gerçek zamanlı trafik isteği olan kullanıcılara daha çok kaynak sağlayacak ve bağlantılarında gecikme olmasını engelleyecektir. Ayrıca algoritmalara bir ağırlık katsayısı eklenecektir. Bu şekilde gerçek zamanlı ve gerçek zamanlı olmayan trafik arasındaki ilişki düzenlenecek ve gerçek zamanlı trafik veri hacmi, ortalama sistem veri hacmi ve ortalama sistem hakkaniyeti arasındaki denge sağlanacaktır. QRR (QoS aware Round Robin) algoritması, kanal durumuyla ilgili herhangi bir bilgiye bakmadan, gerçek zamanlı trafiğe sahip kullanıcılara öncelik vermek için tasarlanmıştır. Round Robin’den farklı olarak bir ağırlık katsayısı eklenmiştir. Bu katsayı sayesinde gerçek zamanlı trafik isteği olan kullanıcılara daha fazla kaynak atanabilmektedir. QBC (QoS Aware Best-CQI), kanal durumuna bakılarak, gerçek zamanlı trafik ihtiyacı duyan kullanıcılara öncelik vermek amacıyla tasarlanmıştır. Gerçek zamanlı trafik ihtiyacı olan kullanıcıya öncelik verilmesi için bir katsayı algoritmaya eklenmiştir. Bu katsayı hangi oranda gerçek zamanlı trafik isteği olan kullanıcının öncelik listesine girebileceğini düzenler. Sistem modellemesi ve simülasyonlar System Level Simulator’da yapılmıştır. Performans değerlendirmesi için yeni tasarlanan algoritmalar dışında RR ve Best-CQI algoritmaları kullanılmıştır. Jain’s Fairness index ve ortalama throughput değerleri karşılaştırma kriterleri olarak alınmıştır. İki algoritmadan da yeterli verim alınamamıştır. QRR’da adillikte ciddi sıkıntı yaşanmıştır. QBC’de ise adillikte artış varken veri hacminde düşüş olmuştur. Önerilen iki algoritmanın da bu tez çalışmasında kıyaslama amaçlı kullanılmasının uygun olmadığı görülmüştür.

[11] nolu makalede YouTube gibi HTTP video yayını yapan sitelerden video izleyen kullanıcıların deneyimlerinin kalitesini iyileştirmek adına yeni bir zamanlama algoritması öne sürülmüştür. Bu yeni algoritma önceliklendirme kriteri olarak kullanıcının video ana belleğinde (buffer) kalan veri miktarını kullanacaktır. Bu

şekilde ara bellekteki veri tükenmesi sonucu oluşan rahatsız edici duraksamalar olmayacak ve kullanıcının deneyimi iyileştirilecektir. Çalışmada önerilen algoritma, PF algoritmasına yeni bir öncelik katsayısı eklenerek modifiye edilmesi ile elde edilmiştir. Önerilen algoritma kullanıcıdaki ara bellek miktarı çok olduğunda önceliği az, az olduğunda ise önceliği çok olacaktır. Bu öncelik fonksiyonunun davranışı ise verilen denklemde görüldüğü gibi eksponansiyeldir. Sistem modellemesi ve performans analizi için LTE Network Simulator kullanılmıştır. Yapılan simülasyonlar sonucunda algoritma, düşük yükte duraksamaları tamamen engellerken, yüksek yükte büyük ölçüde azaltmıştır. Ara bellekte bulunan veri miktarına bakıldığında yine iyi performans göstermiştir. PF algoritması güncellenerek hakkaniyet iyileştirilmiş fakat sistem kaynaklarının ne kadar verimli kullanıldığı tam açıklanmamıştır.

[12] nolu makalede farklı karakterlere sahip kullanıcıların bulunduğu bir LTE DL şebeke tanımlanmıştır. Farklı tip kullanıcılar için yeni bir zamanlama algoritması geliştirilmiştir. Algoritma iki aşamalı olarak çalışmaktadır. İlk aşamada kullanıcıların CQI varyansı göz önüne alınarak yüksek ve düşük hareketli olarak sınıflandırılmışlardır. Sonraki aşamada ise geliştirilen algoritma (improved FDSS - Frequency Diversity and Selectivity Scheduling) ile kaynak tahsisi yapılmıştır. İlgili olduğu zamanlama algoritması FDSS'tir. IFDSS, FSS ve FDS üzerinde önemli ölçüde kazanç sağlamıştır. Bu çalışmada göz önüne alınan kullanıcının hareketli olması ya da CQI değişimi bu tezde kullanıcıların anlık CQI bilgisinden hesaplanmıştır.

[13] nolu makalede çoklu kullanıcılı proportional fair algoritması önerilmektedir. İlgili olduğu zamanlama algoritmaları PF ve Max-Rate algoritmalarıdır. Çoklu kullanıcılı SS (Sequential Suboptimal) zamanlama yöntemi ve joint optimizasyon yöntemleri PF algoritması ile kullanıldıklarında PF (seq.) ve PF (joint), Max-Rate ile kullanıldıklarında ise Max-Rate (Seq.) ve Max-Rate (Joint) olarak ifade edilmiştir. Çoklu kullanıcılı SS zamanlayıcısı iki aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada, t anında i kullanıcısı için maximum hız indeksleri belirlenir. Sonra öncelik etiket değerlerine göre kullanıcılar sıralanırlar. Çalışmada problem bir birleşik optimizasyon problemi olarak tanımlanmış ve Branch-and-Bound optimizasyon yöntemi ile çözülmeye çalışılmıştır. İki PF algoritmasının (Joint ve Sequential) fairness açısından Max-Rate algoritmasından daha iyi olduğu görülmüştür. Tez çalışmasında yine bir önceki makalede olduğu gibi kullanıcı hareketliliği ayrı bir etiket yerine CQI bilgisiyle takip edilmiştir.

[14] nolu bildiride LTE sistemde altı adet zamanlama algoritmasının performanslarını hakkaniyet ve throughput açısından değerlendirmektedir. Ayrıca RR ve Best-CQI algoritmalarının basit bir kombinasyonunu kullanarak oluşturdukları yeni yöntemi de RR ve Best-CQI algoritmaları ile karşılaştırmaktadır. Vienna LTE Link Level Simulator yazılımı kullanılmıştır. Önerilen algoritma beklendiği gibi RR ile karşılaştırıldığında sistem performansını iyileştirmektedir. Hakkaniyet açısından ise Best CQI'a üstünlük sağlamaktadır.

[15] nolu makalede ise FDPS (Frequency Domain Packet Scheduling) zamanlama algoritması önerilmiştir. Önerilen algoritma normal FDPS'in uyarlamasıdır. Uyarlanan algoritma aşağı yönde çok düşük miktarlarda trafik durumunda daha yüksek throughput ve kullanıcılar arasında daha hakkaniyetli sistem kaynaklarına erişim sağlamaktadır. Düşük trafik durumu baz istasyonundaki veya telefondaki verinin kanal oranı (channel rate)'dan bile daha az olduğu durumdur. Önerilen değişim (swap) algoritması sadece düşük trafik durumu için uyarlanmıştır. Diğer durumlarda normal PF gibi çalışmaktadır. Önerilen algoritma kullanıcılar arasında PRB'u (Physical Resource Block) düşük trafik durumunda, normal PF'ten farklı olarak, daha fazla verisi olan kullanıcıya atamaktadır. Önerilen algoritma klasik PF'den farklı olarak, PRB (Physical Resource Block) atama durumu, sırada bekleyen kullanıcı sayısı, sistem throughput değişkenlerini de kontrol edebilmektedir. Önerilen algoritma düşük trafik durumunda daha iyi bir performans göstermiştir. Düşük trafik durumu ile en yoğun zamanın %30'da, bir günün ise sadece %5'inde karşılaşılmaktadır. Sonuçta sistem throughput değeri %30 iyileşmiştir (Bir günün sadece %5'inde). Kısa dönem hakkaniyet değeri de ayrıca iyileştirilmiştir. Bu tez çalışmasında önerilen Yalın Zamanlayıcı algoritması ise düşük trafik durumda sistem kaynaklarının en etkili kullanımı için CQI yüksek olan kullanıcılara mümkün olduğunca en yüksek kapasiteyi atamaya çalışmaktadır.

[16] nolu makalede ise kanal durum bilgisi - CSI (Channel State Information) belli olmayan yüksek hızlı kullanıcılar için frekans çeşitliliği FDS (Frequency Diversity Scheduling) zamanlama algoritmasıyla sağlanmaktadır. Bazı frekanslarda öngörülemeyen 'Deep-Fading' etkisi kullanıcıya atanan alt-taşıyıcıların tüm frekans bandında düzgün şekilde atanmasıyla giderilmeye çalışılır. FSS (Frequency Selective Scheduling) zamanlama algoritmasını CSI bilgisi düzgün şekilde elde edilebilen yavaş kullanıcılar kullanmaktadır. FSS algoritması her kullanıcıyı en iyi frekans deneyimine

sahip olduğu alt taşıyıcıya atayarak çoklu kullanıcı çeşitliliği (multiuser diversity) oluşturur. Önerilen yeni algoritma FDSS (Frequency Diversity and Selectivity Scheduling), önce kullanıcıları yüksek ve düşük hızlı olarak ikiye ayırır. Daha sonra kullanıcı hızına göre düşük hızlı olanlara çoklu kullanıcı çeşitliliği kullandırılırken, CSI bilgisi tam olmayan yüksek hızlı olan kullanıcılar ise frekans çeşitliliğinden faydalandırılır. Yüksek hızlı kullanıcılardan toplam hücre veri hızını iyileştirebilecek olanlar seçilerek zamanlama yapılmaktadır. Bu şekilde %6 ile %23 arasında hücre veri iletim hızında FSS ve FDS'ye göre iyileştirmeye sağlanmıştır. FDSS algoritması yüksek hızlı kullanıcılardan sadece şebekeye hücresel veri hızına katkıda olacak kullanıcıları seçmektedir. FSS algoritmasının FDSS'ye göre daha adil çıkması beklenmelidir. Çalışmada tüm kullanıcıların hareketli olduğu düşünölmüştür. Sabit kullanıcılar ve bina içi kullanıcılar dikkate alınmamıştır. Ayrıca kullanıcıların hakkaniyet değeri paylaşılmamıştır.

[17] nolu bildiride Jain hakkaniyet ölçüsü eşik değeri tanımlanarak zamanlama algoritmasına giriş olarak kullanılmıştır. Sadece kısa vadeli Jain hakkaniyet ölçüsü kullanılarak hakkaniyet sağlanırken throughput değeri de iyileştirilmeye çalışılmıştır. Test senaryoları hakkında detaylı bilgi verilmemiş, tek bir baz istasyonu durumu gözetilerek simölasyonlar gerçekleştirilmiştir. Zamanlama algoritması NIP (Non-linear Integer Programming) olarak tanımlamıştır. Problemin ayrıca nedensel olmadığı belirtilmiştir. Uzun vadeli Jain hakkaniyet ölçüsü çıkartılarak problem basitleştirilmiştir. Önerilen yöntem ile iyi bir optimum throughput değerine ulaşmayı amaçlamıştır. Yalın Zamanlayıcı hakkaniyeti ve sistem kaynaklarının etkili kullanılmasına ayrı bir bakış açısı getirdiği için sadece hakkaniyete göre kullanıcılar arasında kaynak bölüşümü yapmamaktadır. Bu tez çalışmasında Jain hakkaniyet ölçüsü Yalın Zamanlayıcının ve diğeri algoritmaların performanslarının karşılaştırılması amacıyla kullanılmaktadır.

2.3.3 Yeni bir algoritma öneren çalışmalar

[18] nolu çalışmada yeni nesil LTE şebekelerde DL yönünde kullanılmak üzere yeni bir zamanlama algoritması önerilmiştir. Önerilen algoritma throughput ile fairness arasındaki dengeye dayanmaktadır. Algoritma, Assignment Model kullanarak her TTI (Transmission Time Interval)'da seçilmiş kullanıcılara kaynak atar. Yeni zamanlama algoritması, her TTI'da kullanıcıların CQI bilgisini alır. Servis verilecek kullanıcıları

(önceki TTI'da servis alamayan veya az alan kullanıcılara öncelik vererek) belirler. Assignment model kullanılarak kaynak bloklarına kullanıcıları optimum şekilde dağıtır. Bir sonraki TTI'da bu işlem tekrarlanır. Önerilen algoritmayı karşılaştırmak amacıyla Round Robin, Best CQI ve MS (My SCH) algoritması kullanılmıştır. Simülasyonlar MATLAB tabanlı LTE System Level Simulator'da gerçekleştirilmiştir ve performans değerlendirmesi bu program ile yapılmıştır. Performans değerlendirmesi sonucunda önerilen algoritmanın throughput açısından Best CQI'a yakın, fairness açısından ise ortalama bir performans gösterdiği görülmüştür. Simülasyonlarda çok kullanıcı test yapılmaması (maksimum 25 kullanıcı) algoritmanın güvenilirliği açısından eksiklik olarak görülmüştür.

[19] nolu bildiride LTE şebekelerinin DL yönünde dört temel paket zamanlama algoritmasının (Maximum C/I, PF, TTA, BET kombinasyonları ile TD (Time Domain) ve FD (Frequency Domain) olmak üzere) zaman ve frekans uzayında ayrı ayrı işlem gören iki aşamalı dinamik bir paket zamanlama algoritması önerilmektedir. Simülasyonda, dört farklı 3GPP makro durumunda merkez frekansı (center frequency), taraflar arası mesafe (inter-site distance), band genişliği, yol kaybı (pathloss) ve kullanıcı hızı (velocity) parametreleri değiştirilerek oluşturulan farklı senaryolar hakkaniyet ve spektral verimlilik açısından karşılaştırmıştır. Zamanlama algoritmasını zaman ve frekans alanlarına bölüp iş yükünün farklı alanlara aktarılması durumunda, kullanıcılar arasında throughput ve hakkaniyet dengesinin daha verimli bir şekilde kontrol edilebildiği görülmektedir. Zamanlama algoritmasının kullanıcılar arasında kaynakları paylaşma kararını iki aşamalı yapması işlem yükünü azaltmaktadır ama sistem kaynaklarının verimliliğine olumsuz etkilemektedir.

[20] nolu makalede LTE şebekelerinin DL yönünde gecikmeye duyarlı hizmetler için, DRX (Discontinuous Reception) bilgisini dikkate alan gerçek zamanlı DRX zamanlama algoritması önerilmiştir. Referans algoritma olarak PF, M-LWDF, FIFO (First in First Out) ve MCI (Maximum Carrier Interference Ratio) algoritmaları kullanılmıştır. Önerilen algoritmanın güç tüketimini, PF ve M-LWDF algoritmalarına göre %20.84 ve %9.73 oranında düşürebildiği gösterilmiştir. Önerilen yöntem geleneksel yöntemlere göre paket kayıp oranı (Packet loss rate - PLR) ve güç tüketimi açısından büyük ölçüde performans kazancı sağlanmıştır. Tez aşamasında kullandığımız simülasyon olarak tüm algoritmaların DRX desteklediği varsayılmıştır.

Canlı şebeke baz istasyonlarında kullanılan tüm algoritmalar, PF Best-CQI ve RR gibi DRX'i dikkate almaktadır.

[21] nolu makalede LTE hücresel haberleşme sistemlerinde çoklu kullanıcı radyo zamanlama problemini adreslenmektedir. SG (Simply Greedy) yaklaşımından çok daha iyi sonuçların Optimal çözümle elde edilebileceği fakat böyle bir Optimal çözümün karmaşıklığının çok yüksek olacağı vurgulanmıştır. Bu çalışmada GA (Genetic Algorithm) ve SA (Simulated Annealing) gibi meta-heuristic yöntemlerle karmaşıklık önemli ölçüde azaltılırken optimale yakın (near-optimal) bir çözüm elde edilebilmiştir. Literatürde GA ve SA yöntemleri çok iyi bilinen sırasıyla populasyon ve bireysel çözüm tabanlı yaklaşımlardır. Makalede yeni bir yöntem bulmak yerine GA ve SA yöntemleri zamanlama problemi için uyarlanmıştır. Önerilen algoritmalar en fazla 8 kullanıcı için denenmiştir. Çalışmaya göre 8 kullanıcıdan daha fazla olan kullanıcılar durumunda her hangi bir iyileşme gözlemlenememiştir. Bu makalede önerilen algoritmanın canlı şebekelerde kullanılma ihtimali yoktur.

[22] nolu bildiride QoS (Quality of Service) ve DRX durumunu dikkate alan bir zamanlama algoritması önerilmiştir. Algoritma ile DRX özelliği açık iken QoS parametreleri dikkate alan hakkaniyetli bir kaynak ataması önerilerek paket gecikmeleri ve kayıpların en aza indirilmesine çalışılmıştır. Senaryolar tek bir baz istasyonunun tek bir hücresinde denenmiştir. Önerilen algoritma, Best CQI, Proportional Fair ve Round Robin algoritmaları ile karşılaştırılmıştır. Algoritmada DRX bilgisi, gecikme, minimum throughput, ara bellek durumu, ortalama throughput ve kanal koşulu olarak altı giriş değeri tüm kullanıcılar için birleştirilerek öncelik matrisi oluşturulmuştur. Öncelik matrisinde en yüksek değeri alan kullanıcıya kaynak ataması yapılmaktadır. Fakat matrisin oluşturulmasında bu altı farklı değer nasıl ağırlıklandırıldığı veya önceliklendirildiği bilgisi verilmemiştir.

[23] nolu çalışmada önce problem zaman ve frekans uzayında ikiye bölünmüştür. Daha sonra çalışmada belirtilen kıstaslar bir formülle ifade edilip her kullanıcı ve PRB için sonuçlar hesaplamıştır. Oluşan matrise göre hangi kullanıcı iyiye ona kaynak kullandırılmıştır. Çalışmada, Twitter, Facebook ve Youtube için paket ulaşım karakteristiği çıkarılmış ancak aynı anda uygulamalar açık olduğunda telefonun hangi karakteristiğe göre davranacağı yada APN oluşturduğundan bahsedilmemiştir. Örneğin bir kullanıcı hem youtube izlerken aynı anda VoIP görüşmesi yapabilir. Bu

kullanıcının önceliğinin youtube trafiğine göre mi yoksa VoIP trafik tipine göre mi yapılması gerektiğine yönelik bir çözüm önerilmemiştir.

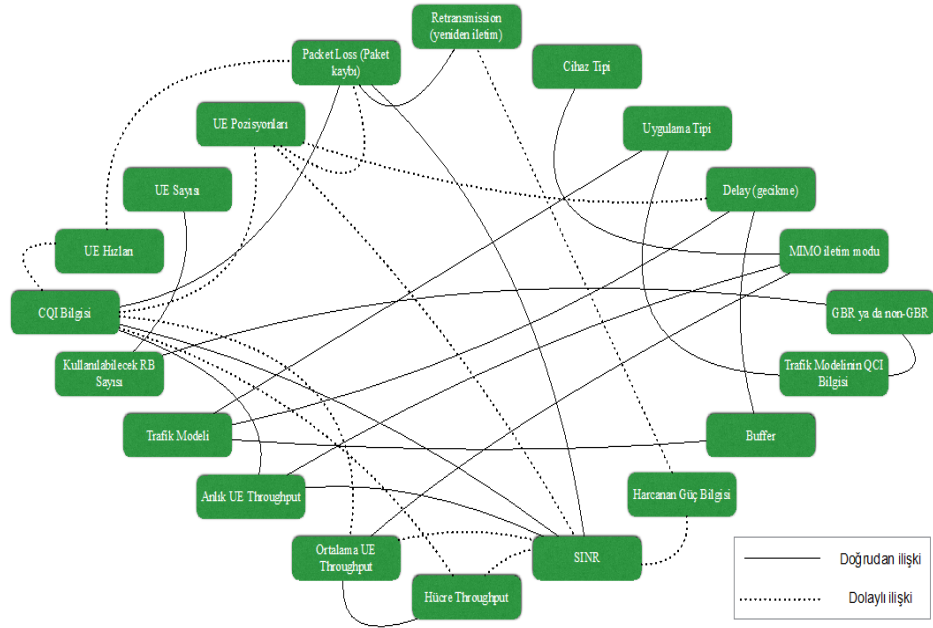
3. YALIN ZAMANLAYICI

Gezgin haberleşme sistemlerinde son kullanıcının şebeke performansı ve baz istasyonunun kapasitesi arasında denge sağlamak karmaşık bir optimizasyon problemidir. Bu problemin çözümüne yönelik geliştirilmek istenen yeni zamanlayıcı kapsamında ilk olarak, tez gereksinimlerini karşılayacak yöntem, teknoloji ve araçların tespiti için 1.1 nolu bölümde verilen detaylı literatür araştırması yapılmıştır. İkinci adımda zamanlama algoritmalarının performans testlerinde kullanılmak üzere mevcut benzetim programlarından en çok kullanılan üç benzetim programı test edilmiştir. Test edilen simülasyon programlarının detaylı incelemesi 4.1, 4.2 ve 4.3 nolu bölümlerde verilmiştir.

Literatür incelemesi sırasında algoritmaların dikkate aldığı giriş çıkış büyüklüklerinden bu tez çalışmasında önerilen algorithmada dikkate alınması gerekenler belirlenmiş ve tasarım aşamalarında amaca uygun güncellemeler yapılmıştır. Bu giriş çıkış büyüklükleri belirlenirken bu parametrelerin birbirlerini etkileyip etkilemediği göz önüne alınmış, ilişkili olan parametreler ve bağımsız olarak seçilmesi gerekenler büyüklükler ortaya konmuştur. Birbiriyle doğrudan ilişkili iki parametrenin karar aşamasında kullanılması algoritmanın karmaşıklığını arttırarak optimizasyon problemini çözümsüzlüğe götürebilmektedir. Bu nedenle algorithmada göz önüne alınacak olan parametrelerin kendi aralarındaki etkileşimleri de incelenmiş ve karar kurallarının belirlenmesi ve optimize edilecek parametrelerin belirlenmesinde karmaşıklığa sebep olabilecek böylesi ilişkiler ortaya konmuştur. Çizelge 3.1 de sistemde göz önüne alınan parametreler listelenmiş ve devamında bu parametrelerin açıklamalarına yer verilmiştir. Bu parametreler arasındaki doğrudan ve dolaylı ilişkileri ifade eden bir gösterim Şekil 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1 : Göz önüne alınan parametreler.

Parametre	Açıklaması
Cihaz tipi	Cihazın 3GPP standartlarına göre tipini belirtmektedir.
Uygulama tipi	Kullanıcıların kullandıkları uygulama tipi. Gerçek zamanlı ses uygulamaları veya sosyal medya uygulamaları gibi
Delay (Gecikme)	UE ile çekirdek şebeke arasında veri paketinin iletimi için geçen süre
MIMO iletim modu	Kullanılan MIMO tipi
GBR yada non-GBR Trafik	Trafik tipinin GBR (Guaranteed Bit Rate) veya non-GBR
modelinin QCI bilgisi	Trafik modelinin QCI (Quality of Service Class Indicator) bilgisi
Buffer (Ara bellek)	Baz istasyonun ara bellek durumu
Harcanan güç bilgisi	Baz istasyonunun harcadığı güç
SINR	Signal to Interference and Noise Ratio
Hücre throughput	Hücresinin ortalama throughput değeri
Ortalama UE throughput	UE'nin ortalama throughput değeri
Anlık UE throughput	UE anlık throughput değeri
Trafik modeli	Trafik modeli. Gerçek zamanlı ve gerçek zamanlı olmayan trafik gibi
Kullanılan RB sayısı	Bir ms için kullanılan RB sayısı
CQI bilgisi	CQI (Channel Quality Indicator)
UE hızları	Hücrede bulunan UE'lerin hızları
UE sayısı	Hücrede bulunan toplam UE sayısı
UE pozisyonları	Hücrede bulunan UE'lerin yer bilgisi
Paket loss (Paket kaybı)	Paket kaybı
Retransmission (Yeniden iletim)	Veri paketinin ilk iletim veya kayıp nedeniyle tekrar iletim olduğu bilgisi



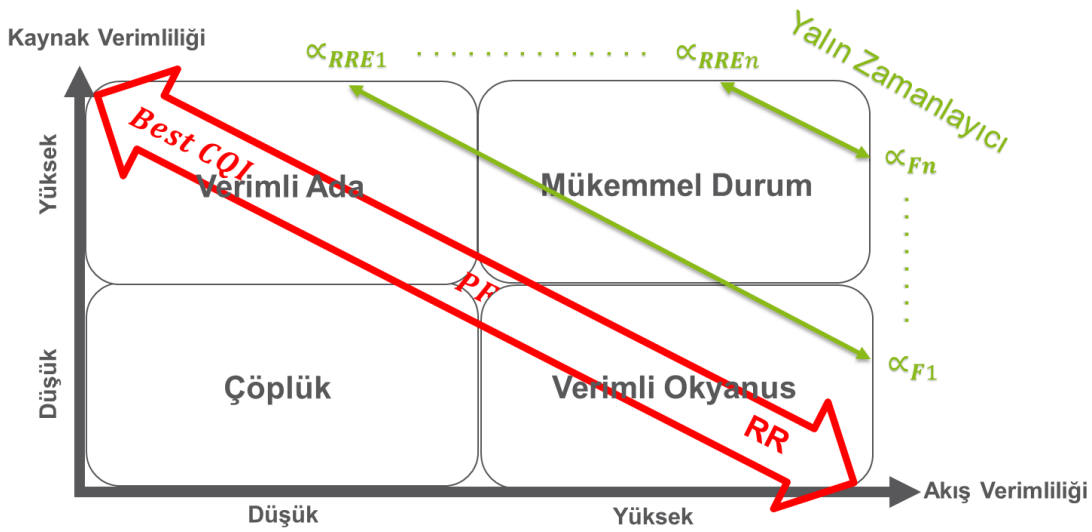
Şekil 3.1 : Giriş&Çıkış parametrelerin birbirleri arasındaki ilişkileri.

Şekil 3.1’de belirtilen etkileşim modelleri dikkate alınarak önerilen algoritmada hangi parametrelerin beklenen performans açısından optimize edilmesi gerektiği belirlenmiş ve benzetim ortamında performans incelemesi yapılmıştır. Yukarıda ilişkileri gösterilen parametreler dikkate alınarak zamanlama algoritması performansının her bir parametre için net olarak ortaya çıkarılması amacıyla farklı denemeler yapılmıştır. Yapılan ilk denemelerde paket kaybı için BLER (BLoCK Error Rate) büyüklüğü kullanılmıştır. Ancak kullanıcıların paket kayıplarındaki anlık değişimlerin bulundukları radyo kanal koşullarını doğru olarak modelleyemedikleri gözlemlenmiştir. Tez kapsamında geliştirilen algoritma için performans etkileşimine yönelik ikinci incelemede kullanıcı hızlarını dikkate alınmıştır. Ancak kullanıcı hızlarının algoritmaya katkısının CQI bilgisinin kullanımı ile zaten görülebildiği anlaşılmıştır. Kullanıcı hızlarının dikkate alınmasının karar mekanizmasını karmaşıktırmaktan başka bir faydası olmamıştır. Bu şekilde her bir incelenen parametrenin son kullanıcının şebeke davranışını en iyi şekilde modellemesi gereği üzerinde çalışılmış ve ayrıca zamanlayıcının karmaşıklığının artırılmaması önceliklendirilmiştir. Daha sonraki incelemelerimizdeki başarılı sonuçlarla ilgili detaylı bilgiler 3.2 ve 3.3 nolu kısımlarda verilmiştir.

3.1 Yalın Metodolojisi

Yalın terimi [26] nolu kaynakla birlikte popülerlik kazanmıştır. [26] nolu çalışma avrupa otomotiv üreticileriyle Toyota üretim sistemi arasındaki büyük farkın sebebini net bir şekilde açıklamaktadır. Japonya’da geliştirilen bu üstün performanslı üretim sistemi anahtar bileşenlerini yalın üretim olarak tanımlamaktadır. Yalın methodolojinin ana amacı müşteri değerini en yükseğe taşıırken her türlü atığı ve hatayı sıfırlamaya çalışmaktır. Yalın’ın manası müşteriye daha az kaynakla daha fazla değer üretmektir.

Yalın methodolojisi her ne kadar otomotiv üretim sektörü için geliştirilmiş olsa da her hangi bir sanayi veya sektöre uygulanabilmektedir. Şekil 3.2’de verilen yalın verimlilik matrisi yalın methodolojisini anlamak için anahtar faktördür [27]. Bu tezde önerilen Yalın Zamanlayıcı Şekil 3.2’de gösterilen yalın verimlilik matrisinin kaynak ve akış verimlilikleri üzerine kurularak LTE kaynak paylaşım problemi için önerilmiştir. LTE radyo kaynak kullanım verimliliği ve hakkaniyeti yalın matrisinde verilen kaynak ve akış verimliliğiyle eşleştirilmiştir.



Şekil 3.2 : Yalın verimlilik matrisi.

Önerilen Yalın Zamanlayıcı kaynak ve akış verimlilikleri arasında **dinamik olarak** bir denge nokta bulmaya çalışır. Bu denge noktasını Şekil 3.2’de gösterildiği gibi α_{RRE} (Radio Resource Efficiency) ve α_F (Fairness, Flow Efficiency) ağırlık çarpanlarını kullanarak yapar. Yalın Zamanlayıcının amacı kullanıcı isteklerini ve kaynakları dikkate alarak yalın matriste bulunan mükemmel duruma ulaşmaya çalışır. Yalın matrisi kaynak ve akış verimliliklerinin sınırlarını belirler.

Bölüm 3.3'te klasik yalın zamanlayıcı algoritmasının geliştirilmesi ile önerilen yeni Gecikmeye Duyarlı Yalın Zamanlayıcı ise gerçek zamanlı olan ve olmayan trafiğe sahip kullanıcılar için geliştirilmiştir. Gecikmeye Duyarlı Yalın Zamanlayıcı kaynakları kullanıcılar arasında gecikme kistasına göre bölüştürebilmektedir. Kaynakları yalın matrisindeki alanlara göre bölüştürürken, gezgin cihaz üzerinde çalışan haberleşme uygulamasını yeterli kaynaklara ulaştırarak istenilen performansı sağladığından emin olur.

3.2 Yalın Zamanlayıcı

Akıllı telefonların günlük hayatımıza girmesiyle gezgin haberleşme sistemlerini kullanan kullanıcıların davranışları değişmeye başlamıştır. Yeni nesil X ve Y kuşakları her türlü veriye her an ulaşmak istemektedir. Bu istek bir sosyal medya paylaşımı olacağı gibi popüler bir şarkıcının en son çıkan videosu olabilmektedir. Kullanıcı ve trafik değerlerindeki artış ve ayrıca kullanıcı davranışlarındaki böylesi değişimler gezgin haberleşme sistem kaynaklarının son kullanıcılar arasında paylaşımını daha da önemli hale getirmektedir.

Gezgin haberleşme sistemlerinde kullanılan zamanlayıcı algoritmalarından ilki olan RR (Round Robin) veya diğer adıyla RF (Resource Fair) kanal kalitesini dikkate almayan tek algoritmadır. RR radyo kaynaklarını kullanıcılara kanal kalitesini dikkate almadan sırayla atamasını yapar [28]. RR zamanlayıcısı hakkaniyet olarak kullanıcıların radyo kaynaklarına aynı zaman süresi için ulaşmasını dikkate alır. Kullanıcıların bulunduğu radyo koşullarını dikkate almadığı için baz istasyonunun kaynaklarını verimsiz kullanmaktadır.

CQI telefonda baz istasyonuna doğru uygun olan veri iletim modülasyonu ve kodlama bilgisini ileten bir sistem parametresidir. Hangi kalitede hangi modülasyon ve kodun kullanılacağı [29] standardında belirtilmiştir. Bu parametreyi dikkate alan Best CQI zamanlayıcısı telefon tarafından raporlanan CQI bilgisine göre kullanıcılara radyo kaynaklarını atamasını yapan bir diğer zamanlayıcı algoritmasıdır [30]. PF (Proportional Fair) algoritması ise kullanıcıların anlık ve ortalama aldığı throughput değerlerinin oranını bir metrik olarak kullanarak kullanıcılara radyo kaynaklarına atamaktadır [5]. Best CQI zamanlayıcısı radyo kaynaklarını her zaman yüksek CQI değerlerine sahip kullanıcılara atadığı için sistem kaynaklarını verimli kullanırken kullanıcılar arasında hakkaniyeti gözardı etmektedir. PF zamanlayıcısı ise

kullanıcıların arasında hakkaniyeti sağlayabilmek için sistem kaynaklarını Best CQI zamanlayıcısına göre daha verimsiz kullanmaktadır.

Literatür araştırmasında da gösterildiği gibi, gezgin haberleşme sistemlerinde CQI bilgisinin kullanılan zamanlayıcılara etkisini araştıran birçok çalışma vardır. [31] ve [31] nolu çalışmalar CQI raporlama ve raporlamanın getirdiği sinyalleşme yüküyle ilgilidir. [31] ve [32] nolu çalışmalarda CQI ile ilgili iyileştirmeler hakkaniyet ve sistem verimliliği performanslarını iyileştirilmesi için yapılmamıştır. LTE gezgin haberleşme sistemlerinde farklı hızda hareket eden kullanıcılar için frekans ve çoklu kullanıcı çeşitliliği [33] nolu çalışmada incelenmiştir. Bu çalışmada önerilen zamanlayıcı CQI raporlamadaki değişikliğe göre kullanıcı hızlarını yavaş ve hızlı olarak ikiye ayırmaktadır. Eğer hücrede aynı anda hem hızlı hem yavaş sınıfta kullanıcı varsa önceliği yavaş hareket eden kullanıcıya vermektedir. Fakat hücredeki tüm kullanıcılar aynı sınıfta ise CQI bilgisine göre yapılan sıralama değiştirildiğinden dolayı tüm kullanıcıların throughput değerleri düşmektedir. [34] ve [35] nolu çalışmalarda ise RR ve diğer ticari olarak kullanılan algoritmaların hiçbir değişiklik yapılmadan dönüşümlü olarak kullanılması önerilmiştir. RR ve Best CQI zamanlayıcıları her zamanlama aralığında dönüşümlü olarak kullanılmıştır [34]. Karar metriği iyileştirilmemiş ve önerilen dönüşümlü yönetimin hakkaniyete etkisi paylaşılmamıştır. [35] nolu çalışmada RB'lar birleştirilerek ızgara yapısı oluşturulmuş ve bir kullanıcı bir önceki ızgaradan kaynak aldıysa güncel ızgaradan kaynak atanması engellenmiştir. Bu geciktirmenin kullanıcıların throughput değerlerine olan etkisi paylaşılmamış ve benzetimler sadece beş kullanıcı için yapılmıştır.

Kaynakların kullanımı ve hakkaniyet arasında (p, α) ağırlıklandırma parametrelerinin kullanıldığı bir ağırlık modeli [36] nolu çalışmada önerilmiştir. Önerilen modele göre α sıfıra eşit olduğu zaman, hakkaniyet kıstası geniş kapsamlı throughput en iyilemesine karşı gelmektedir. α parametresi sonsuza giderken [36] nolu çalışmadaki ağırlık modeli Max-Min hakkaniyetine benzemekte ve bire eşit olduğu özel durumda ise PF'e benzemektedir. Her iki durumda da önerilen algoritma şebeke kapasitesi olarak gecikme ve pencere boyutunu dikkate almaktadır. Gezgin haberleşme şebekelerinde kullanılan radyo kanal kalitesi ve kapasitesini dikkate almamaktadır.

Bu tez çalışmasında önerilen Yalın zamanlayıcıda ise, telefonun geri besleme olarak verdiği bilgiler ve kullanıcı istatistikleri dikkate alınarak, kullanıcılar arasında kaynakları verimli bir şekilde paylaşırabilmek için M_k isimli dinamik sınırlı bir

skalermetrik oluşturulmuştur (3.1). M_k metriği k 'nci kullanıcı için gerçek zamanlı CQI ölçümleri, anlık ve ortalama throughput değerleri dikkate alınarak tanımlanmaktadır. Bu metrik önerilen Yalın Zamanlayıcıda kullanıcılar arasında o TTI için sıralama yapmak amacıyla kullanılmaktadır. Daha sonra M_k , kullanıcıların telefonlarında kullandıkları haberleşme uygulamalarının hücre sınırında bile kabul edilebilir bir kaliteyle çalışmasını sağlamak üzere sonraki TTI anları için aşağıda önerilen yapıda optimize edilir.

$$M_k(t) = \alpha_{RRE} \times \log\left(\frac{R_k(t)}{T_k(t)}\right) - \alpha_F \times \log\left(\frac{CQI_k(t)}{CQI_{\max}}\right) \quad (3.1)$$

3.1 nolu formülde $T_k(t)$ k 'nci kullanıcının belli sayıdaki geçmiş TTI ortalama throughput değerini, $R_k(t)$ k 'nci kullanıcının anlık throughput değerini, $CQI_k(t)$ k 'nci kullanıcının anlık CQI değerini ve son olarak $CQI_{\max}$ ise bir kullanıcının LTE gezgin haberleşme sistemlerinde alabileceği en yüksek CQI değerini göstermektedir. LTE gezgin haberleşme sistemlerinde en yüksek CQI değeri 15'e eşittir [29]. 3.1 nolu formülde ifadelerin logaritmasının alınmasının sebebi farklı aralıktaki parametrelerinin normalizasyonunun sağlanmak istenmesidir. Yalın Zamanlayıcı α_{RRE} ve α_F ağırlık çarpanlarını her TTI için aşağıdaki şekilde günceller:

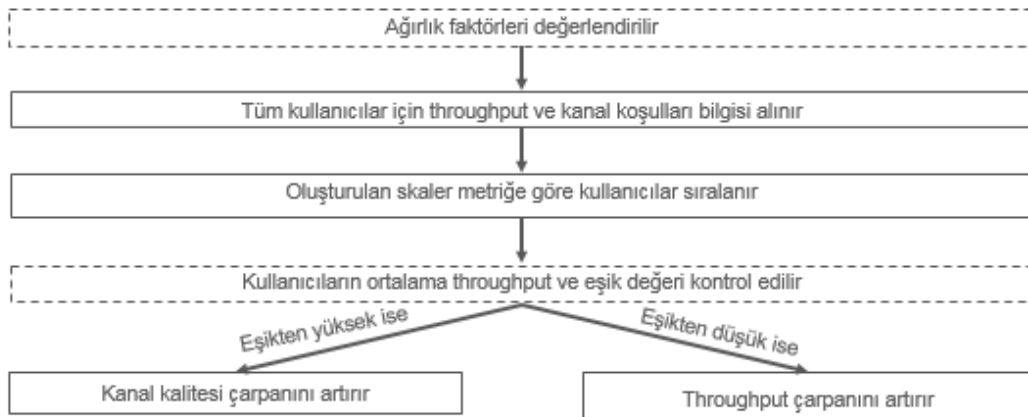
1. Yalın Zamanlayıcı ilk olarak kullanıcıları zamanlamaya başladığında atanabilecek en düşük değeri α_{RRE} 'ye ve atanabilecek en yüksek değeri ise α_F 'ye tanımlar. Bu şekilde başlayarak yalın zamanlayıcı baz istasyonu kaynaklarını birinci ms'den itibaren verimli kullanmak istemesindendir.
2. Sınırlı skalermetrik M_k hücredeki tüm kullanıcılar için hesaplanır. Daha sonra Yalın Zamanlayıcı tüm kullanıcılara en yüksek M_k değerinden en düşüğe doğru kaynak atamasını gerçekleştirir.
3. Bir sonraki zamanlama periyodunda (TTI) her bir kullanıcının ortalama throughput değerinin tezin birinci bölümde paylaşılan 1 Mbps eşik değerinden daha düşük olup olmadığı kontrol edilir:
 - a. Eğer bir kullanıcı eşik değerinden daha yüksek bir throughput değerine sahipse o kullanıcıya ait M_k metrik hesabında:
 - i. α_{RRE} ve α_F ağırlık çarpanları, α_F ağırlık çarpanının alabileceği en yüksek değere ulaşmışsa değiştirilmez.

- ii. α_F ağırlık çarpanı, α_F ağırlık çarpanının alabileceği en yüksek değere ulaşmamışsa bir basamak yukarı artırılır. α_{RRE} ağırlık çarpanı ise 3.2 nolu ifadeye göre azaltılır.
- b. Eğer bir kullanıcı eşik değerinden daha az bir throughput değerine sahipse o kullanıcıya ait M_k metrik hesabında:
 - i. α_{RRE} ve α_F ağırlık çarpanları, α_F ağırlık çarpanının alabileceği en düşük değere ulaşmışsa değiştirilmez.
 - ii. α_F ağırlık çarpanı, α_F ağırlık çarpanının alabileceği en düşük değere ulaşmamışsa bir basamak aşağı azaltılır. α_{RRE} ağırlık çarpanı ise 3.2 nolu ifadeye göre artırılır.
- 4. Yalın Zamanlayıcı 2. ve 3. adımları ara belleklerinde veri olan kullanıcı olduğu sürece tekrarlar.

Her zamanlama periyodunda Yalın Zamanlayıcı α_F ağırlık çarpanını azaltabilir veya artırabilir. Bu tez çalışmasında önerilen α_{RRE} ve α_F ağırlık çarpanları arasındaki ilişki 3.2 nolu formülde paylaşılmıştır.

$$\alpha_{RRE} + S_{Lean}\alpha_F = 1 \quad (3.2)$$

S_{Lean} dinamik bir değişkendir. Dinamik olarak tanımlanmasının amacı gezgin haberleşme servisi veren operatörlerin Yalın Zamanlayıcı algoritmasını hakkaniyet ve şebeke verimi arasında yönlendirebilmesini sağlamaktır. Yalın Zamanlayıcı ağırlık çarpanlarını her TTI için nasıl güncellediği aşağıdaki şekilde özetlenmiştir.



Şekil 3.3 : Özet Yalın Zamanlayıcı algoritma gösterimi.

Dördüncü bölümde paylaşılan benzetim sonuçlarını elde ederken S_{Lean} yardımıyla α_F ağırlık çarpanı küçük adımlarla artırılırken büyük adımlarla da düşürülmüştür. Bu sayede kullanıcıların haberleşme uygulamalarını kullanırken kabul edilebilir kaliteye isteklerine hızlıca cevap verilmesi sağlanmıştır.

Her 1 ms (1 TTI) zamanlama periyodunda Yalın Zamanlayıcı tüm kullanıcılar için M_k değerini hesapladıktan sonra radyo kaynaklarını kullanıcılara aldıkları M_k metrik değerine göre atamaktadır. M_k ifadesinde bulunan throughput ve CQI değerlerini logaritmik fonksiyonla normalize edilmektedir. Hareketli ortalama throughput değeri olan $T_k(t)$ ise aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır [37]:

$$T_k(t) = \begin{cases} \left(1 - \frac{1}{t_c}\right) T_k(t-1) + \frac{1}{t_c} R_k(t-1) \leftarrow k = k^* \\ \left(1 - \frac{1}{t_c}\right) T_k(t-1) \leftarrow k \neq k^* \end{cases} \quad (3.3)$$

t_c ortalama pencere boyutunu göstermektedir. $k=k^*$ 'nin anlamı k 'nci kullanıcının bir önceki zamanlama periyodunda kaynaklara ulaştığıdır. $T_k(t)$ değeri her TTI için güncellenmektedir.

Aç gözlü algoritma (Greedy Algorithm) yaklaşımıyla her RB kullanıcılara 3.1 formülünde belirtilen M_k metriğinin aldığı değer sıralamasına göre atanır. Toplam RB sayısı kullanılan bant genişliğine göre değişmektedir. 20 MHz bant genişliği için toplam RB sayısı yüze eşittir.

3.3 Gecikmeye Duyarlı Yalın Zamanlayıcı

Gerçek zamanlı uygulama kullanan kullanıcılar için gecikme değeri throughput performans ölçüsünden daha önemli hale gelmektedir. Veri en yüksek bekleme süresinden daha geç gönderildiği zaman sistem tarafından kullanılamamaktadır. LTE gezgin haberleşme sistemlerinde medya kullanımı, dosya paylaşım, video veya ses çağrısı için kullanılan uygulamalar yüksek gecikmeyi tahamül edemeyebilirler. Bugün bir çok gezgin haberleşme şebekelerinde %50 ile %70 arası video trafiği YouTube uygulamasından gelmektedir. 2016 yılının istatistiklerine göre tüm trafiğin %50'si video kaynaklıdır. 2022 yılında tüm gezgin haberleşme şebekelerinin taşıdığı trafiğin %75 video kaynaklı olacağı tahmin edilmektedir [38].

Literatür araştırmasında da paylaşıldığı gibi gezgin haberleşme sistemlerinde gerçek zamanlı uygulama kullanan kullanıcıların zamanlamasıyla ilgili birçok çalışma vardır. [8] nolu çalışmada gecikmeye duyarlı zamanlayıcılar detaylı olarak incelenmiştir. İncelenen zamanlayıcıların çoğu için kullanılan parametre değerleri benzetimi yapılan özel durum için geçerlidir. Daha gelişmiş zamanlayıcıların daha karmaşık olduğu ve kaynakları verimsiz olarak kullanma riski olduğu görülmüştür. Çalışmada bahsedilen zamanlayıcıların benzetim sonuçları benzer sonuçlar gösterdikleri için paylaşılmamıştır. EXP (Exponential), EXP-Rule (Exponential Rule), Log-Rule ve M-LWDF zamanlama algoritmaları [39] nolu çalışmada karşılaştırılmıştır. Çalışmada kullanılan gecikme tolerans değeri kanal kalitesine göre değişmektedir. Yeni bir zamanlayıcı önerilmemiş, kullanıcıların veri paketi kayıp değerlerine göre gecikme toleransları değiştirilmiştir. Yüksek hızlı kullanıcılarda elde edilen iyileşme gösterilirken gerçek zamanlı olamayan kullanıcıların çalışmada yapılan parametre değişiminden ne kadar etkilendiği paylaşılmamıştır.

Bu tezde gerçek zamanlı trafiğin gecikmesini dikkate alarak sistem kaynaklarının verimli kullanılmasını sağlamak amacıyla Gecikmeye Duyarlı Yalın Zamanlayıcı geliştirilmiştir. Önerilen algoritmanın sonuçlarını göstermek için karşılaştırılan gerçek zamanlı ve gerçek zamanlı olmayan uygulamalar aşağı ve yukarı yöndeki throughput ihtiyaçlarına göre üç sınıfa ayrılmıştır:

- Medya kullanım veya dosya paylaşım uygulamaları: Aşağı yönde throughput ihtiyacı yukarı yöndeki ihtiyaçtan çok daha fazladır.

- Gerçek zamanlı ses uygulamaları: Aşağı ve yukarı yönde throughput ihtiyaçları yaklaşık aynıdır.
- Sosyal medya: Yukarı yönde throughput ihtiyacı aşağı yöndekinden fazladır.

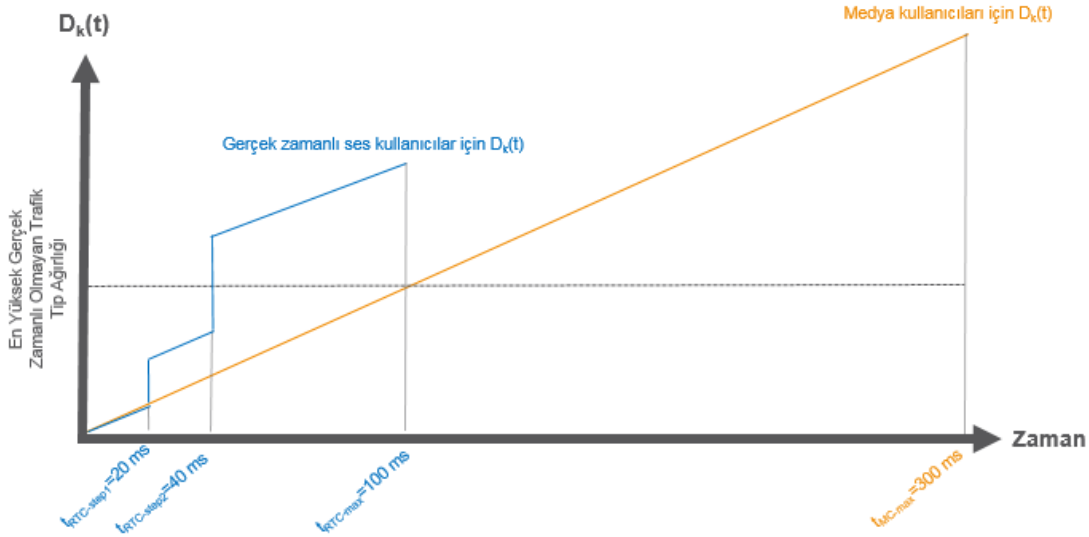
Gecikmeye Duyarlı Yalın Zamanlayıcı gerçek zamanlı ses ve medya kullanım isteklerini gerçek zamanlı olamayan kullanıcılara göre önceliklendirir. Bu önceliklendirmeyi yaparken gerçek zamanlı olmayan kullanıcıların en düşük kabul edilebilir seviyede throughput hızlarına ulaşması sağlanmaktadır. Gerçek zamanlı olmayan kullanıcılar sosyal medya veya dosya paylaşım uygulamaları kullanan kullanıcılar olarak sınıflandırılmıştır. Önerilen Gecikmeye Duyarlı Yalın Zamanlayıcı ile gerçek ve geçek zamanlı olmayan kullanıcıların verimli şekilde kaynaklara ulaşması amaçlanmıştır. Veri paketleri için mücadele edilen gecikme değerinin yüksek olması durumunda, gerçek zamanlı konuşma uygulamalarını kullanan kullanıcıların paket kayıpları artacağı için şebeke kalite algısı kötüleşecektir. Örneğin veri paket kaybı VoLTE kullanımı sırasında sessizlik gibi probleme sebep olabilmektedir. Diğer taraftan veri paketleri için mücadele edilen gecikme değerinin düşük olması durumunda gerçek zamanlı olmayan kullanıcıların ortalama yukarı ve aşağı yönde ulaşabilecekleri throughput hızları düşecektir.

Verinin bekleme süresine, paket gecikmesi, kalite ve throughput değerlerine göre öncelik ağırlıklandırılması Gecikmeye Duyarlı Yalın Zamanlayıcı tarafından yapılmaktadır. Buna yönelik olarak, 3.1 nolu formüle verinin bekleme süresini dikkate alan üçüncü bir ağırlık ifadesi eklenmiştir. Gecikmeye Duyarlı Yalın Zamanlayıcının kullandığı algoritma bu şekilde güncellenirken, karmaşıklığın artırılmaması amaçlanmıştır. İfadeye yeni eklenen terim $D_k(t)/D_{\max}$ ile gösterilmekte olup k . kullanıcıya ait veri için t anında atanan bekleme süresinin en yüksek paket gecikme değerine oranıdır. Veri bekledikçe ve en yüksek bekleme süresi olan $D_{\max}$ 'a yaklaştıkça ağırlığı artmaktadır. Gecikmeye Duyarlı Yalın Zamanlayıcı için güncellenen sınırlı skalermetrik M_k , 3.4 nolu formülde gösterilmiştir.

$$M_k^{\text{GecikmeyeDuyarlı}}(t) = \alpha_D \times \beta_D \times \frac{D_k(t)}{D_{\max}} + \alpha_{RRE} \times \log\left(\frac{R_k(t)}{T_k(t)}\right) - \alpha_F \times \log\left(\frac{CQI_k(t)}{CQI_{\max}}\right) \quad (3.4)$$

Bu ifadede α_D ve β_D gecikme ölçütünün kaynak kullanımı ve hakkaniyet ölçütleri yanında ne kadar öncelikli olacağını belirleyen diğer ağırlık katsayılarıdır. $D_k(t)$ kullanıcının zamanlayıcıda bekleme süresini göstermektedir. β_D ağırlıklandırma

ifadesi verinin bekleme süresi ve tipine göre değişmektedir. Bu tez çalışmasında önerilen β_D ağırlıklandırma ifadesinin farklı tip kullanıcılar için $D_k(t)$ fonksiyonuna etkisi Şekil 3.4’de mavi ve turuncu renkli fonksiyonlarla gösterilmiştir. Ağırlık değerinin gerçek zamanlı olmayan trafik tipinin ağırlığını ne zaman geçeceği ise kesikli siyah çizgiyle belirtilmiştir.



Şekil 3.4 : Farklı tip kullanıcılar için zaman cinsinden gecikme ağırlık fonksiyonu.

Gerçek zamanlı ses çağrılarının ağırlığı t_{step1} , t_{step2} ve t_{max} anları için belirlenen doğrusal parçalı fonksiyon ile ifade edilmiştir. Zaman basamakları gerçek zamanlı ses çağrıları için müsaade edilen gecikme değerleridir ve en yüksek ulaşabileceği değer 100 ms olarak algoritmada tanımlanmıştır [25]. Turuncu doğrusal fonksiyonla gösterilen medya kullanıcılarının ağırlık değişimi tamamen doğrusaldır ve gecikme değerini alabileceği en yüksek değer 300 ms’dir [25]. Gerçek zamanlı olmayan kullanıcıların alabileceği ağırlık değeri tekrar iletim ve kullanıcıların sinyal kalitesine göre değişkenlik gösterebilir.

Basamak şeklinde doğrusal parçalı fonksiyon sayesinde gerçek zamanlı kullanıcılar için gerçek zamanlı olmayan kullanıcılara göre ihtiyaç olmadığı durumlarda öncelik tanımlanmamaktadır. Gerçek zamanlı ses kullanıcıları için t_{step1} ve t_{step2} anında ağırlık değerleri basamak şeklinde artırılır. Amaç ses kullanıcıların müsamaha gösterebileceği zaman sonunu kadar gerçek zamanlı olmayan trafiğe göre önceliklendirmeyerek kullanıcıların CQI ve throughput değerlerine göre önceliklendirilmesi sağlanmaktadır. Bu sayede LTE gezgin haberleşme sisteminin verimliliği artırılırken gerçek zamanlı kullanıcılarının [25] nolu referansta belirtilmiş olan eşik değerlerine uyulmaktadır.

Telefon kullanıcısı 100 ms daha düşük gecikmeyi düşük kalite olarak algılamamakta ve bu sayede diğer gerçek zamanlı kullanıcıların veri transferleri tamamlanarak zamanlayıcının listesinden çıkartılmaları sağlanmaktadır. Önerilen Gecikmeye Duyarlı Yalın Zamanlayıcı α_D (Delay), α_F (Fairness) ve α_{RRE} (Radio Resource Efficiency) ağırlık çarpanlarını dinamik olarak değiştirerek gerçek zamanlı ve gerçek zamanlı olmayan kullanıcılar arasında bir denge elde etmektedir.

3.4 nolu formülde kullanılan logaritmik fonksiyonlar ve kullanıcıların alabileceği anlık değerlerin en yüksek CQI ve gecikme değerlerine bölünmesi ile M_k metriğinin normalleştirilmesi sağlanmıştır. Normalleştirme, her bir metriğin ağırlıklarını yapılandırmasına izin vererek gezgin haberleşme operatörünün zamanlayıcı ağırlık çarpanlarını dinamik olarak değiştirmesine yardımcı olur. Throughput, kalite ve gecikme için kullanılan büyüklükler böylece ilgili ağırlık çarpanlarıyla çarpılarak tek bir metriğe, M_k 'ya dönüştürülür. Bu şekilde 1 ms içinde kolayca hesaplanabilen bir ifade elde edilmiş olmaktadır. M_k önerilen ifade ile kolayca hesaplanabilirken ayrıca ağırlık katsayılarının dinamik olarak değişmesi sayesinde gerçek zamanlı olmayan kullanıcılar için iyi bir throughput performansı ve gerçek zamanlı kullanıcılar için kabul edilebilir bir gecikme değeri verebilmektedir.

Şekil 3.3'de turuncu ve mavi renkli farklı kullanıcı tipindeki kullanıcıların gecikme ağırlığı $D_k(t)$ aşağıda verilen formüllerle ifade edilir. $D_k(t)$ Mavi fonksiyonla gösterilen gerçek zamanlı ses kullanıcıları için 3.5 nolu formülle ifade edilirken, turuncu renkli fonksiyonla gösterilen medya kullanım için 3.6 nolu formülle ifade edilmektedir.

$$D_k(t) = \begin{cases} \beta_D \times D_k(t-1) + 1 \leftarrow t \bmod 20 = 0 \text{ \& } t \leq 40 \\ D_k(t-1) + 1 \leftarrow t \bmod 20 \neq 0 \end{cases} \quad (3.5)$$

$$D_k(t) = D_k(t-1) + 1 \quad (3.6)$$

β_D ağırlık katsayısı tez çalışması için 2 olarak seçilmiştir. Gerçek canlı şebeke uygulamalarında operatörlerin gecikmeye verecekleri önceliğe göre farklı değer veya $D_k(t)$ 'nin fonksiyonunun eğimini değiştirecek şekilde değerler seçilebilir. Gecikmeye Duyarlı Yalın Zamanlayıcı α_D , α_{RRE} ve α_F ağırlık çarpanlarını her TTI için aşağıdaki şekilde günceller:

1. Gecikmeye Duyarlı Yalın Zamanlayıcı ilk olarak kullanıcıları zamanlamaya başladığında atanabilecek en düşük değeri α_D ve α_{RRE} 'ye ve atanabilecek en yüksek değeri ise α_F 'ye tanımlar.

2. Sınırlı skaler metriği M_k k'nci kullanıcı için oluşturulur. M_k hesaplaması hücredeki tüm kullanıcılar için yapılır. Daha sonra Gecikmeye Duyarlı Yalın Zamanlayıcı tüm kullanıcılara en yüksek M_k değerinden en düşüğe doğru kaynak atamasını gerçekleştirir.
3. Bir sonraki zamanlama periyodunda, gerçek zamanlı kullanıcıların gecikme değeri 70 ms eşik değerinden daha düşük olup olmadığı kontrol edilir:
 - a. Eğer bir kullanıcı eşik değerinden daha düşük bir gecikme değerine sahipse:
 - i. α_D değeri bir basamak aşağı düşürülür. Daha sonra α_{RRE} ve α_F ağırlık çarpanları alabilecekleri en yüksek değere ulaşmışsa değiştirilmezler.
 - ii. α_D değeri bir basamak aşağı düşürülür. Daha sonra α_{RRE} ve α_F ağırlık çarpanları alabilecekleri en yüksek değere ulaşmamışlarsa α_{RRE} ve α_F çarpanları bir basamak artırılır.
 - b. Eğer bir kullanıcı eşik değerinden daha yüksek bir gecikme değerine sahipse:
 - i. α_D değeri bir basamak yukarı artırılır. Daha sonra α_{RRE} ve α_F ağırlık çarpanları alabilecekleri en düşük değere ulaşmışsa değiştirilmezler.
 - ii. α_D değeri bir basamak yukarı artırılır. Daha sonra α_{RRE} ve α_F ağırlık çarpanları alabilecekleri en düşük değere ulaşmamışlarsa α_{RRE} ve α_F çarpanları bir basamak düşürülür.
4. Yalın Zamanlayıcı 2. ve 3. adımları ara belleklerinde veri olan kullanıcı olduğu sürece tekrarlar.

Tüm kullanıcılar için M_k değerleri hesaplandıktan sonra Gecikmeye Duyarlı Yalın Zamanlayıcı radyo kaynaklarını en yüksek M_k değerini alan kullanıcılardan başlayarak dağıtmaya başlar. Bu işlem kullanıcılara gönderilecek veri bitene kadar ya da benzetim süresi tamamlanana kadar devam eder.

Her zamanlama periyodunda Yalın Zamanlayıcı α_D , α_{RRE} , α_F ağırlık çarpanlarını azaltabilir veya artırabilir. α_D , α_{RRE} ve α_F ağırlık çarpanları arasındaki ilişki 3.7 nolu formülde paylaşılmıştır.

$$\alpha_D + S_{Lean}\alpha_{RRE} + S_{Lean}\alpha_F = 1 \quad (3.7)$$

S_{Lean} gerçek zamanlı trafik içinde dinamik olarak kullanılmaktadır. Dinamik olarak tanımlanmasının amacı gezgin haberleşme servisi veren operatörlerin Yalın Zamanlayıcı algoritmasını gecikme, hakkaniyet veya şebeke verimi arasında yönlendirme yapmaları sağlayabilmektir. Dördüncü bölümde paylaşılan benzetim sonuçlarını elde ederken S_{Lean} yardımıyla α_F ve α_{RRE} ağırlık çarpanları yavaşça artırılırken gecikmeye duyarlı kullanıcılar için hızlıca düşürülmüştür.

$t_{RTC-step}$ sayaç değeri 20 ms ve 40 ms olarak seçilmiştir. Gezgin haberleşme sistemi LTE’de veri paketi gecikme tolerans değeri her servis için farklı değer almaktadır [25]. Gerçek zamanlı kullanıcılar için bu değer, $t_{RTC-max}$ 100 ms’ye eşittir. Sayaç basamak ve en yüksek değerlerinin hangi değere atanacağı gezgin haberleşme operatörlerine bırakılmalıdır. Tek bir doğru değer olmamasının sebebi gezgin haberleşme şebekelerinin kurulumuna bağlıdır. Her gezgin haberleşme şebekesi farklı çekirdek ve iletim (transmisyon) altyapısına sahip olduğu için kullanıcılar arasında farklı MTE (Mouth-to-Ear) değerine sahiptir. Bu yüzden Gecikmeye Duyarlı Yalın Zamanlayıcı için belirlenecek eşik değerleri farklı operatörler için farklı değerlere sahip olabilir.

4. BENZETİM SONUÇLARI

Bu bölümde tez çalışması kapsamında önerilen Yalın ve Gecikmeye Duyarlı Yalın Zamanlayıcıların benzetim sonuçları tartışılmıştır. Yeni geliştirilen algoritma için üç ayrı benzetim programı incelenmiş, en uygun benzetim programının Vienna LTE Simulator olduğu anlaşılmıştır. Tez kapsamında kullanılan Vienna LTE Simülasyon programı açık kaynak yazılımlı olduğu, zamanlayıcı algoritmalar üzerinde yeni geliştirmeler yapılmasına müsaade etmesi ve LTE FDD gezgin haberleşme sistemlerini desteklemesi nedeniyle diğer benzetim programları içinde tercih edilmiştir.

4.1 MIMMI Simülasyon Programı

İlk olarak test edilen program Ericsson İsveç ARGE firmasının kullandığı Matlab [40] üzerinde geliştirilen çoklu baz istasyonu gezgin haberleşme benzetim programıdır. MIMMI, 2002 yılından itibaren yüzden fazla araştırmacı tarafından geliştirilmiştir. MIMO, HetNet gibi birçok yeni özelliği desteklemektedir. OFDM tabanlı gezgin haberleşme sistemlerinden LTE veya WiMAX benzetim için seçilebilmektedir. Makro, mikro ya da piko tipindeki baz istasyonlarının benzetimleri için kullanılabilir. Kapalı kaynak ticari yazılım olan MIMMI'nin yeni geliştirmelere açık olduğu fakat tüm hesaplamanın matris yapısı üzerine kurulduğundan dolayı çok yavaş olduğu anlaşılmıştır. 30 kullanıcı üzerine çıktığında yüksek kapasite bilgisayar kullanıldığında bile benzetim süresinin gün seviyesine çıktığı gözlemlenmiştir. Ericsson İsveç Arge firmasının MIMMI yazılımını çok kullanıcılı canlı şebeke testleri yerine yeni zamanlama veya anten teknolojilerinin fonksiyon kabul testleri için kullandığı anlaşılmıştır. Yapılan denemeler sonucunda MIMMI benzetim programının tez kapsamında yeni algoritma geliştirmek için uygun olmadığı anlaşılmıştır.

4.2 NS-3 (Network Simulator-3) Simülasyon Programı

İkinci olarak test edilen, NS-3 (Network Simulator-3) [41] simülatörü, araştırma ve eğitim amaçlı geliştirilen ayrık olay bazlı ağ (discrete-event network) benzetim programıdır. 2006 yılından bu yana C++ üzerine açık kodlu olarak geliştirilmektedir. NS-3 ile gerçek sistemlerle çok zor gerçekleştirilebilecek denemeler kolaylıkla yapılabilir. Denemeler esnek kontrol imkânı olan tekrar üretilebilir bir ortamda yapılmaktadır. NS-3 benzetim yazılımı internet ve internet olmayan sistemleri desteklemektedir. NS-3 belli kütüphanelerin birleşiminden oluşmaktadır. NS-3 için yazılmayan grafik ya da istatistiksel kütüphaneleri de desteklemekdir. NS-3 benzetim programı kendi web sitesinde [42] ifade edildiği gibi yukarı (UL) yönde sadece RR algoritmasını desteklemektedir. Aşağı yönde (DL) NS-3, farklı zamanlama algoritmalarıyla denendiğinde benzer sonuçlar vermiştir. RR dışında algoritmaları teorik olarak desteklediğinden bahsedilse bile yeni geliştirilen veya RR dışında diğer zamanlayıcı algoritmaları seçildiğinde benzetim sonuçları çok benzer çıkmaktadır. Değiştirilen parametrelerin ya da önceliklerin NS-3 programının ana kodu üzerinde bir etkisi yoktur. Tez kapsamında karşılaşılan bu problem diğer NS-3 kullanıcıları tarafından gözlemlenmiş ve bu problem programın forum sayfasında tartışılmıştır. NS-3 açık kodlu yazılım olduğundan ve LTE dışında başka teknolojileri de desteklediğinden dolayı yaşanan probleme çözüm üretilmemektedir. Yapılan denemeler sonucunda NS-3 benzetim programının tez kapsamında yeni algoritma geliştirmek için uygun olmadığı anlaşılmıştır.

4.3 Vienna LTE Simülasyon Programı

Vienna LTE simülasyon programını ticari olmayan akademik lisans ile Vienna Teknoloji Üniversitesi tarafından dağıtılmaktadır. Nesnel tabanlı olarak Matlab [40] için geliştirilmiştir. Vienna LTE simülasyon programının iki çeşidi vardır. Birincisi zamanlama, gezgin kullanıcıların hücreler arası geçisi ve kirlilik yönetimi gibi konular için geliştirilen Vienna LTE System Level Simulator programıdır. İkinci çeşidi ise telefon ve baz istasyonu arasındaki radyo iletim kayıplarını ve modellerini inceleyen Vienna LTE DL&UL Link Level Simulator programıdır.

Tez çalışması kapsamında önerilen zamanlayıcıların ve diğer zamanlayıcıların performanslarını karşılaştırılması için LTE System Level Simulator programının

v1.8r1375 sürümü kullanılmıştır [43]. Geliştirilen her iki zamanlayıcı da aşağı yönde LTE gezgin haberleşme şebekeleri için hazırlanmıştır. Benzetim sırasında bir baz istasyonu ile çoklu kullanıcı için senaryolar denenmiştir. Yalın Zamanlayıcı için kullanılan benzetim parametreleri Çizelge 4.1.'de verilmiştir.

Çizelge 4.1 : Yalın Zamanlayıcı için kullanılan benzetim parametreleri.

Parametre	Değer
Frekans Bandı	2.00 GHz
Bant Genişliği	20 MHz
İletim Tipi	FDD
RB	180 kHz
Her bir RB için alt taşıyıcı	12
Çerçeve süresi	1 ms
Benzetim süresi	500 TTI (500 ms)
Kullanıcı sayısı	3,15,30,45,75,150
Baz istasyonu sayısı	1
Hücre sayısı	3
Yol kayıp modeli	TS36942
Benzetim ortamı	Şehir
Kanal modeli	Winner+
Kullanıcı hızı	5 km/hour
Baz istasyonu anten kazancı	15 dBi
Baz istasyonu gücü	40 W
Trafik modeli	Full buffer
Baz istasyonu yüksekliği	20 m
Kullanıcı yüksekliği	1.5 m
Anten tipi	Kathrein 742212
Zamanlama algoritmaları	Yalın, Best CQI, PF, RR

Yalın zamanlayıcı için 100 ms benzetim yapılmıştır. Benzetim sırasında kullanıcı konumu ve hareketleri farklı zamanlayıcı performans denemeleri için aynı tutularak radyo koşulları tüm denemeler için eşitlenmiştir.

Gerçek zamanlı ses kullanıcıların performansını Gecikmeye Duyarlı Yalın ve M-LWDF zamanlayıcılarında görebilmek için simülasyon süresi 300 ms'ye uzatılmıştır. Gecikmeye Duyarlı Yalın Zamanlayıcının benzetimlerinde kullanılan parametreler Çizelge 4.2'de paylaşılmıştır.

Çizelge 4.2 : Gecikmeye Duyarlı Yalın Zamanlayıcı için kullanılan benzetim parametreleri.

Parametre	Değer
Frekans Bandı	2.14 GHz
Bant Genişliği	20 MHz
İletim Tipi	FDD
RB	180 kHz
Her bir RB için alt taşıyıcı	12
Çerçeve süresi	1 ms
Benzetim süresi	500 TTI (500 ms)
Kullanıcı sayısı	30,90,150,300
Baz istasyonu sayısı	1
Hücre sayısı	3
Yol kayıp modeli	TS36942
Benzetim ortamı	Şehir
Kanal modeli	Winner+
Kullanıcı hızı	5 km/hour
Baz istasyonu anten kazancı	15 dBi
Baz istasyonu gücü	40 W
Trafik modeli	Sosyal medya, gerçek zamanlı ses uygulamaları, medya kullanım ve dosya paylaşım uygulamaları
Baz istasyonu yüksekliği	20 m
Kullanıcı yüksekliği	1.5 m
Anten tipi	Kathrein 742212
Zamanlama algoritmaları	Gecikmeye Duyarlı Yalın Zamanlayıcı, M-LWDF

Kullanıcıların sosyal medya, gerçek zamanlı ses uygulamaları, medya kullanım ve dosya paylaşım uygulamaları arasında dağılımı sırasıyla %50, %10 ve %40 olarak seçilmiştir. LTE System Level Simulator programı güç kontrol özelliğini desteklememektedir. Tüm zamanlayıcıların kullandığı anten çıkış gücü aynıdır. μ W cinsinden bit başına enerji her kullanıcı için iletilen toplam güç (Tx), simülasyon süresi ve taşınan trafik kullanılarak hesaplanır. Kullanıcıların konumları simülatör tarafından rasgele atandığından dolayı farklı radyo koşullarına sahiplerdir. Zamanlayıcılar kullanıcılara atadıkları RB sayılarına göre baz istasyonu ne kadar güç ayıracağını kararını verir. Daha sonra bit başına düşen enerji μ W cinsinden hesaplanır.

Bu tez çalışmasında hakkaniyet, gecikme ve throughput büyüklükleri benzetim sonuçları içinde göz önüne alınan anahtar performans göstergeleridir. Hakkaniyet kıstası olarak literatürde en çok tercih edilen Jain hakkaniyet ölçüsü kullanılmıştır [44].

4.4 Yalın Zamanlayıcı Benzetim Sonuçları

Yalın zamanlayıcının benzetim sonuçları olarak hakkaniyet, enerji tüketimi, hücre ve kullanıcı throughput değerleri Çizelge 4.3’de paylaşılmıştır. Üç kullanıcı olduğu senaryoda tüm zamanlayıcılar için her hücrede (sektörde) bir kullanıcı olduğundan dolayı aynı performans izlenmiştir.

Baz istasyonunda kullanıcı sayısı artmaya başladığında Yalın Zamanlayıcının throughput performansında PF ve RR algoritmalarına göre çok daha iyi sonuçlar elde etmiştir. 30 kullanıcı durumunda Yalın Zamanlayıcının ortalama hücre throughput değeri 130.99 Mb/s iken RR ve PF sırasıyla 97.09 Mb/s ve 110.98 Mb/s çıkabilmiştir. Ayrıca Yalın Zamanlayıcının en yüksek kullanıcı throughput değeri tüm senaryolarda RR ve PF algoritmalarına göre daha iyidir. Yalın zamanlayıcı hücre sınırındaki kullanıcıya en düşük 1 Mb/s hız verebilmek için α_{RR} ve α_F ağırlık çarpanlarını dinamik olarak değiştirmektedir. Baz istasyonundaki kullanıcı sayısı 150 olduğu zaman Yalın Zamanlayıcı güncel ağırlık çarpanları sayesinde akış verimliliğini artırarak hakkaniyeti iyileştirmeyi başarmıştır. 150 kullanıcıli durumda, Yalın Zamanlayıcı hakkaniyeti 15 kullanıcı için elde edilen 0.574569 değerinden 0.855366’e yükseltmiştir.

Çizelge 4.3 : Yalın Zamanlayıcının benzetim sonuçları.

Kullanıcı Sayısı*	Zamanlayıcılar	En yüksek Kullanıcı Throughput [Mb/s]	Ortalama Kullanıcı Throughput [Mb/s]	En Düşük Kullanıcı Throughput [Mb/s]	Hakkaniyet	Ortalama Hücre Throughput [Mb/s]	Ortalama Kullanıcı Spektral Verimliliği [bit/cu]	Ortalama bit başına harcanan enerji [μ W]
15	<i>Yalın Zamanlayıcı</i>	61.03	19.71	5.08	0.560908	98.53	5.22	0.74
	Proportional Fair	22.50	18.52	13.79	0.981587	92.58	5.77	0.66
	Best CQI	127.23	23.88	0.07	0.277335	119.41	6.03	0.62
	Round Robin	27.87	15.74	9.65	0.910777	78.71	4.69	0.83
30	<i>Yalın Zamanlayıcı</i>	35.00	13.10	1.29	0.574569	130.99	6.63	1.20
	Proportional Fair	14.09	11.10	8.68	0.977696	110.98	7.05	1.12
	Best CQI	102.65	16.08	0.00	0.24418	160.84	8.90	0.61
	Round Robin	15.24	9.71	4.12	0.886787	97.09	5.78	1.42
75	<i>Yalın Zamanlayıcı</i>	10.14	5.18	1.04	0.714511	129.54	6.85	2.95
	Proportional Fair	5.01	4.35	3.60	0.989731	108.8	7.16	2.83
	Best CQI	33.18	6.64	0.00	0.214997	165.99	9.79	1.02
	Round Robin	5.87	3.64	1.16	0.84913	91.04	5.42	4.27
150	<i>Yalın Zamanlayıcı</i>	3.80	2.28	1.02	0.855366	114.16	6.62	6.07
	Proportional Fair	2.39	2.11	1.75	0.990895	105.7	6.88	5.80
	Best CQI	18.35	3.32	0.00	0.161221	166.19	9.85	1.74
	Round Robin	2.94	1.67	0.56	0.827421	83.8	4.96	9.45

*Her baz istasyonu için toplam sayı.

Benzetim performans göstergelerinden Yalın Zamanlayıcının ortalama ve en yüksek throughput performansları kullanıcı sayısından bağımsız tüm senaryolar için PF ve RR zamanlayıcılarına göre daha iyidir.

Beklenildiği gibi yüksek kullanıcı throughput'un getirisi olarak Yalın Zamanlayıcının bit başına harcanan enerji miktarı RR zamanlayıcısına göre daha iyi fakat PF zamanlayıcısına göre daha kötü performans sergilemiştir.

Yalın Zamanlayıcının hakkaniyet göstergesi farklı kullanıcı senaryoları için 0.560908 ile 0.890235 değerleri arasında değişmektedir. Önerilen zamanlayıcının hakkaniyet göstergesi Best CQI ile PF arasına yerleşmiştir.

Bazı kullanıcılar Best CQI algoritmasında zamanlama algoritmasından kaynak alamamaktadır. Best CQI zamanlayıcısında hiçbir kaynağa ulaşamayan kullanıcıların sayısı farklı senaryolar için Çizelge 4.4'de belirtilmiştir.

Çizelge 4.4 : Benzetim sırasında kaynak atanmayan kullanıcı sayısı.

Kullanıcı Sayısı*	15	30	75	150
<i>Yalın Zamanlayıcı</i>	0	0	0	0
Best CQI	0	8	33	78

*Her baz istasyonu için toplam sayı.

30 kullanıcıli senaryoda Best CQI zamanlayıcı algoritması çalıştığı zaman 8 kullanıcı hiçbir zaman kaynağa ulaşamamaktadır. 150 kullanıcıli senaryoda bu sayı 78'e çıkmaktadır. Önerilen Yalın Zamanlayıcı bu problemi yüksek akış verimliliğini kaynak verimliliğine göre önceliklendirerek çözmektedir. Yalın Zamanlayıcıda tüm kullanıcılar radyo koşullarına göre kaynaklara ulaşabilmektedir. Ayrıca tüm kullanıcılara en düşük 1 Mb/s throughput değeri verilmeye çalışılmıştır. Sonuç olarak Yalın Zamanlayıcı kullanıcıların haberleşme uygulaması için ihtiyacı olduğu throughput değerini hücre sınırında bile sağlamaktadır.

4.5 Gecikmeye Duyarlı Yalın Zamanlayıcı Benzetim Sonuçları

Gecikmeye Duyarlı Yalın Zamanlayıcı algoritmasının Vienna LTE System Level Simulator programıyla elde edilen sonuçları Çizelge 4.5'de paylaşılmıştır. Benzetim göstergelerine bir önceki Yalın Zamanlayıcı için elde edilen sonuçlara ek olarak kullanıcı gecikme değerleri eklenmiştir.

Önerilen zamanlayıcı algoritması en yüksek gecikmeyi 70 ms ile kısıtlamayı başarırken M-LWDF zamanlayıcısı 300 kullanıcı senaryoda 100 ms değerini geçerek gerçek zamanlı ses kullanıcılarının paket kaybı yaşamasına neden olmuştur. Kullanıcı sayısı artıkça Gecikmeye Duyarlı Yalın Zamanlayıcısının gecikme performansı M-LWDF zamanlayıcısına göre çok daha iyi duruma gelmektedir.

Gecikmeye Duyarlı Yalın Zamanlayıcısının M-LWDF zamanlayıcısına göre bariz olan üstünlüğü gerçek zamanlı kullanıcıların veri paketlerinin iki aşamalı olarak zamanlama algoritmasında işlenmesidir. İki aşamalı yapı Şekil 3.3 ile 3.5 ve 3.6 nolu formüllerde verilmiştir. M-LWDF zamanlayıcısı veri paketlerinin bekleme süresini doğrusal olarak dikkate almaktadır. Dolayısıyla çok kullanıcı olduğu durumda Gecikmeye Duyarlı Yalın Zamanlayıcı gerçek zamanlı veri paketlerini için daha az ortalama ve en yüksek gecikme değerlerine sahiptir. 30 ve 90 kullanıcı senaryoda görüldüğü gibi Gecikmeye Duyarlı Yalın Zamanlayıcı gerçek zamanlı olmayan kullanıcıları, gecikme eşik değerine ulaşmamış gerçek zamanlı kullanıcılara göre önceliklendirerek daha yüksek hücre ve kullanıcı throughput değerleri elde etmeyi başarmıştır. Örneğin 30 kullanıcı senaryoda Gecikmeye Duyarlı Yalın Zamanlayıcı 55.36 Mb/s throughput değerine ulaşırken M-LWDF ancak 9,62 Mbp/s değerine ulaşabilmiştir. Önerilen algoritma bunu başarırken gerçek zamanlı kullanıcıların gecikme sürelerinde veri kaybı gibi olumsuz bir etki yapmamıştır.

Tüm senaryolar için Gecikmeye Duyarlı Yalın Zamanlayıcısının bit başına tükettiği enerji miktarı M-LWDF zamanlayıcısından daha iyidir.

Gecikmeye Duyarlı Yalın Zamanlayıcısının iki aşamalı kaynak atama yöntemi spektral verimlilik ve gezgin haberleşme operatörlerinin istedikleri hedefler arasında ödünleşimin (trade-off) sağlanmasını garantilemektedir. Tüm senaryolar için önerilen algoritma hücre seviyesinde 100 Mbp/s hız sağlarken M-LWDF sadece 300 kullanıcı olduğu senaryoda 100 Mb/s hızına ulaşabilmektedir.

Çizelge 4.5 : Gecikmeye Duyarlı Yalın Zamanlayıcının benzetim sonuçları.

Kullanıcı Sayısı *	Zamanlayıcılar	En Yüksek Sosyal Medya ve Dosya Paylaşım Uygulamaları Kullanıcı Throughput [Mbps]	Ortalama Sosyal Medya ve Dosya Paylaşım Uygulamaları Kullanıcı Throughput [Mbps]	En Düşük Sosyal Medya ve Dosya Paylaşım Uygulamaları Kullanıcı Throughput [Mbps]	Hakkaniyet	Ortalama Hücre Throughput [Mbps]	Ortalama bit başına harcanan enerji [μ W]	En yüksek/Ortalama Medya Kullanım Kullanıcı Gecikmesi [ms]	En Yüksek/Ortalama Gerçek Zamanlı Ses Kullanıcı Gecikmesi [ms]
30	Gecikmeye Duyarlı Yalın Zamanlayıcı	55.36	24.86	4.42	0.326717	109.10	16.11	15/3.69	24/4.86
	M-LWDF	9.62	5.39	2.29	0.819451	55.16	18.45	7/3.13	23/3.78
90	Gecikmeye Duyarlı Yalın Zamanlayıcı	17.07	6.85	1.16	0.464667	110.80	16.47	85/4.27	63/6.06
	M-LWDF	6.49	3.45	1.28	0.706990	68.34	20.64	42/6.78	73/9.89
150	Gecikmeye Duyarlı Yalın Zamanlayıcı	5.88	3.29	0.50	0.650269	98.32	15.81	18/3.97	63/5.10
	M-LWDF	5.20	2.71	0.71	0.687930	85.82	17.55	57/11.13	87/19.38
300	Gecikmeye Duyarlı Yalın Zamanlayıcı	2.03	1.48	0.55	0.797181	98.60	14.31	27/4.48	23/5.31
	M-LWDF	2.82	1.48	0.42	0.751448	101.83	14.67	84/12.82	123/23.83

*Her baz istasyonu için toplam sayı.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tezde kanal kalitesini dikkate alarak kaynak verimliliği üzerine yüksek akış verimliliği sağlayan yeni bir zamanlayıcı önerilmiştir. Önerilen Yalın Zamanlayıcı verimlilik matrisine göre kullanıcıların hakkaniyet ve throughput performans göstergelerini dengelemiştir. Yalın Zamanlayıcı hücre sınırında bulunan kullanıcıların bile sistemde belli bir eşik throughput değerinde servis almalarını sağlarken Best CQI zamanlayıcısında görülen kullanıcıların kaynaklara atanmama problemi yaşanmamıştır. Ayrıca RR ve PF zamanlayıcılarına göre daha iyi en yüksek throughput değerini kullanıcılara sağlamıştır.

Yalın Zamanlayıcının farklı radyo koşullarına sahip kullanıcıların olduğu durumda yüksek spektral verimlilik sağladığı görülmüştür. Bunu verimliliği karar ifadesi olan M_k sınırlı skaler metriğiyle sağlamaktadır. Önerilen algoritma tek bir M_k metriğini kullandığından dolayı canlı gezgin haberleşme şebekelerindeki uygulama maliyeti diğer algoritmalara göre daha düşüktür.

Yalın zamanlayıcı geliştirildikten sonra gerçek zamanlı ses trafiğini desteklemesi için Gecikmeye Duyarlı Yalın Zamanlayıcı önerilmiştir. Bu zamanlayıcıda Yalın Zamanlayıcı gibi kaynak verimliliği üzerine yüksek akış verimliliği sağlamayı başarmıştır. Bunu yaparak gerçek zamanlı olmayan kullanıcıların throughput değerini artırırken gerçek zamanlı olan kullanıcıların gecikmeden dolayı paket kaybı yaşamalarına engel olmuştur. Gerçek zamanlı olmayan kullanıcıların throughput değerlerindeki artış, gecikmeye hassas olan kullanıcıların gecikme değerlerinde kabul edilebilir seviyede yükselmeye müsaade edilerek sağlanmıştır.

Her iki önerilen zamanlayıcı en yaygın kullanılan zamanlayıcılarla karşılaştırılarak performans göstergeleri paylaşılmıştır. Yalın Zamanlayıcının hakkaniyet ve throughput arasında ödünleşim yaparak baz istasyonunun kaynaklarını verimli kullanırken Gecikmeye Duyarlı Yalın Zamanlayıcı ise gecikme ve throughput arasında ödünleşim yapmıştır.

Önerilen zamanlayıcılar her iki algoritmada tek bir sınırlı skaler metrikle karar aldığı için hesaplama maliyetini düşürmektedir ve bu nedenle canlı ticari olarak kullanılan baz istasyonlarında kullanılabilecektir.

5.1 SanTez ve Çalışmanın Uygulama Alanı

Bu tez çalışması Türkiye Cumhuriyeti Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığına ve Ericsson Araştırma Geliştirme ve Bilişim Hizmetleri A.Ş. tarafından SanTez olarak desteklenmiştir. Desteklerin sonucunda tez çıktısı olarak elde edilen her iki zamanlayıcı canlı gezgin haberleşme şebekelerinde kullanılabilir. Her iki algoritma mevcut performans göstergelerini sınırlı skaler metrikle işlediği için canlı şebekelerde kullanımında sıkıntı yoktur. Aktif olarak kullanılan LTE gezgin haberleşme şebekelerine uygulanabilir.

5.2 Patent Başvuruları

Bu tez çalışmasında önerilen zamanlama algoritmalarının canlı LTE gezgin haberleşme şebekelerinde kullanılması planlandığı için ilk olarak Yalın Zamanlayıcıya patent başvuru yapılmış ve kabul almıştır. İkinci olarak geliştirilen Gecikme Duyarlı Yalın Zamanlayıcının patent başvurusu yapılmış ve inceleme aşamasındadır.

KAYNAKLAR

- [1] **GSM (Groupe Spéciale Mobile) Association - GSMA intelligence global data**
<<https://www.gsmainelligence.com/>>, erişim tarihi 14.10.2017.
- [2] **E. Telefonaktiebolaget LM - Ericsson mobility report November 2015**
<<https://www.ericsson.com/res/docs/2015/mobility-report/ericsson-mobility-report-nov-2015.pdf>>, erişim tarihi 14.08.2017.
- [3] **E. Telefonaktiebolaget LM - Communication in the world of APP**
<<https://www.ericsson.com/assets/local/news/2015/6/ericsson-consumerlab-communication-in-the-world-of-apps.pdf>>, erişim tarihi 14.08.2017.
- [4] **E. Telefonaktiebolaget LM - APP coverage in cities**
<<https://www.ericsson.com/res/docs/2013/app-coverage-in-cities.pdf>>, erişim tarihi 14.08.2017.
- [5] **Holtzman, J. M.** (2001). Asymptotic Analysis of Proportional Fair Algorithm. *Proceedings of the IEEE Conference on Personal Indoor and Mobile Radio Communications, Vol 2*, 33-37.
- [6] **Alfayly, A., Mkwawa, I., Sun, L. & Ifeachor, E.** (2012). QoE-based performance evaluation of scheduling algorithms over LTE. *Globecom Workshops (GC Wkshps), 2012 IEEE*, vol., no., pp.1362-1366. Dec. 3-7.
- [7] **A. Chiumento, S. Pollin, C. Desset, L. Van der Perre & R. Lauwereins** (2012). Analysis of power efficiency of schedulers in LTE. *19th IEEE Symposium on Communications and Vehicular Technology in the Benelux (SCVT), Eindhoven, 2012*, pp. 1-4.
- [8] **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.
- [9] **Akyıldız H.A., Akkuzu B., Hökelek İ. & Çırpan H.A.** (2014). A QoS-aware reconfigurable LTE MAC scheduler [Servis kalitesine duyarlı yeniden yapılandırılabilir lte mac çizelgeleyici]. *22nd Signal Processing and Communications Applications Conference, SIU 2014 - Proceedings*, pp. 1467-1470.
- [10] **Ö. F. Gemici, İ. Hokelek & H. A. Çırpan** (2013). Trade-off analysis of QoS-aware configurable LTE downlink schedulers. *ICT 2013, Casablanca*, pp. 1-5.
- [11] **Navarro-Ortiz, J., Ameigeiras, P., Lopez-Soler, J.M., Lorca-Hernando, J., Perez-Tarrero, Q. & Garcia-Perez, R.** (2013). A QoE-Aware Scheduler for HTTP Progressive Video in OFDMA Systems. *Communications Letters, IEEE*, vol.17, no.4, pp.677-680.

- [12] **Jinping Niu, Daewon Lee, Tao Su, Li G.Y. & Xiaofeng Ren** (2013). User Classification and Scheduling in LTE Downlink Systems with Heterogeneous User Mobilities. *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, vol.12, no.12, pp. 6205-6213.
- [13] **Kwan Raymond, Cyril Leung & Jie Zhang** (2009). Proportional fair multiuser scheduling in LTE. *Signal Processing Letters, IEEE* 16.6, pp. 461-464.
- [14] **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.
- [15] **S. B. Lee** (2013). Swap-based frequency-domain packet scheduling algorithm for small-queue condition in OFDMA. *IEEE Commun. Lett.*, vol. 17, no. 5, pp. 1028–1031.
- [16] **J. Niu, D. Lee, X. Ren, G. Y. Li & T. Su** (2013). Scheduling exploiting frequency and multi-user diversity in LTE downlink systems. *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 12, no. 4, pp. 1843–1849.
- [17] **C. Guo, M. Sheng, X. Wang & Y. Zhang** (2013). Throughput Maximization with Short- and Long- Term Jain' s Index Guarantees in OFDMA Systems. *2013 IEEE 24th International Symposium on Mobile Radio Communications*. 1523–1527.
- [18] **S. M. Chadchan & C. B. Akki** (2013). A Fair Downlink Scheduling Algorithm for 3GPP LTE Networks. *IJCNIS*, vol.5, no.6, pp.34-41.
- [19] **Kela, P., Puttonen, J., Kolehmainen, N., Ristaniemi, T., Henttonen, T. & Moisio, Martti** (2008). Dynamic packet scheduling performance in UTRA Long Term Evolution downlink. *3rd International Symposium on Wireless Pervasive Computing, ISWPC 2008*, pp. 308-313, May 7-9.
- [20] **Huang Bo, Tian Hui, Chen Lan & Zhu Jianchi** (2010). DRX-Aware Scheduling Method for Delay-Sensitive Traffic. *IEEE Communications Letters*, vol.14, no.12, pp.1113-1115.
- [21] **M. E. Aydin, R. Kwan & J. Wu** (2013). Multiuser scheduling on the LTE downlink with meta-heuristic approaches. *Phys. Commun.*, vol. 9, pp. 257–265.
- [22] **M. Sajid Mushtaq, A. Shahid & S. Fowler** (2012). QoS-Aware LTE downlink scheduler for VoIP with power saving. *Proc. - 15th IEEE Int. Conf. Comput. Sci. Eng. CSE 2012 10th IEEE/IFIP Int. Conf. Embed. Ubiquitous Comput. EUC 2012*, pp. 243–250.
- [23] **O. Ergul, O. Yilmaz, A. T. Koc & O. B. Akan** (2013). DRX and QoS-aware energy-efficient uplink scheduling for long term evolution. *2013 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), Atlanta, GA, 2013*, pp. 4644-4649.
- [24] **Holma, H. & Toskala, A.** (2009). *LTE for UMTS - OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access*. Wiley, pp. 1-11.
- [25] **3GPP Policy and Charging Control Architecture**. (2017). 3GPP TS 23.203 V14.4.0.

- [26] **Womack J. P., Jones D. T. & Roos D.** (2007). *The machine that changed the world*, Free Press.
- [27] **Moding, N. & Ahlstrom, P.** (2015). *This is Lean: resolving the efficiency paradox*. Rheologica Publishing, pp. 97-117.
- [28] **Dahlman, E., Parkvall, S., Skold J. & Beming P.** (2014). *3G Evolution: HSPA and LTE for Mobile Broadband*. Academic Press, pp. 105-124.
- [29] **3GPP Physical layer procedures.** (2017). 3GPP TS 36.213 V14.3.0.
- [30] **Dikamba, T.** (2011). *Downlink Scheduling in 3GPP Long Term Evolution (LTE)* (Master's thesis). Delft University of Technology.
- [31] **Kim H. & Han Y.** (2007). An opportunistic channel quality feedback scheme for proportional fair scheduling. *IEEE Communication Letter*, 11, (6), pp. 501–503.
- [32] **Schwarz S., Mehlführer C. & Rupp M.** (2010). Low complexity approximate maximum throughput scheduling for LTE. *Conf. Rec. - Asilomar Conf. Signals, Syst. Comput.*, pp. 1563–1569.
- [33] **J. Niu, D. Lee, X. Ren, G. Y. Li & T. Su.** (2013). Scheduling Exploiting Frequency and Multi-User Diversity in LTE Downlink Systems. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 12, no. 4, pp. 1843-1849.
- [34] **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.
- [35] **Bechir N., Nasreddine M., Mahmoud A., Walid H. & Sofien M.** (2014). Novel Scheduling Algorithm for 3GPP Downlink LTE Cellular Network. *Procedia Computer Science*, Vol. 40, pp. 116-122.
- [36] **Mo J. & Walrand J.** (2010). Fair end-to-end window-based congestion control. *IEEE/ACM Trans. Netw.*, 8, (5), pp. 1974–1988.
- [37] **Sun Z., Yin C. & Yue G.** (2006). Reduced-Complexity proportional fair scheduling for OFDMA systems. *Communications, Circuits and Systems Proceedings*, 2, pp.1221-1225.
- [38] **E. Telefonaktiebolaget LM - Ericsson mobility report June 2017** <<https://www.ericsson.com/assets/local/mobility-report/documents/2017/ericsson-mobility-report-june-2017.pdf>>, erişim tarihi 14.08.2017.
- [39] **Hendaoui S., Zangar N. & Tabbane S.** (2015). Downlink scheduling for real time application over LTE-A network: Delay aware scheduling. *5th International Conference on Communications and Networking (COMNET), Tunis*, pp. 1-6.
- [40] **Mathworks - MATLAB Documentation** <<http://www.mathworks.com/help/matlab/index.html>>, erişim tarihi 14.08.2017.
- [41] **NS-3 (Network Simulator-3) - Overview** <<https://www.nsnam.org/overview/what-is-ns-3/>>, erişim tarihi 14.08.2017.

- [42] **NS-3 (Network Simulator-3) - THE NS-3 LTE MODULE** <
<https://www.nsnam.org/tutorials/consortium14/ns-3-training-session-6.pdf>>, erişim tarihi 14.08.2017.
- [43] **Ikuno J. C., Wrulich M. & Rupp M.** (2010). System level simulation of LTE networks. *IEEE 71st Vehicular Technology Conference, Taipei*, pp. 1-5.
- [44] **Jain R., Chiu D. M. & Hawe W. R.** (1984). A quantitative measure of fairness and discrimination for resource allocation in shared computer system. *DEC technical report*, pp. 1–38.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Mehmet İzzet Sağlam
Doğum Tarihi ve Yeri : 01/05/1979 Osmaniye
E-posta : mehmet.izzet.saglam@ericsson.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2001, Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği
- **Yükseklisans** : 2003, İstanbul Teknik Üniversitesi, İletişim Sistemleri Anabilim Dalı, Uydu Haberleşmesi ve Uzaktan Algılama Programı
- **Yükseklisans** : 2005, Yıldız Teknik Üniversitesi, İşletme Anabilim Dalı, İşletme Yönetimi Tezsiz Yüksek Lisans Programı

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2001 – 2006 yılları arasında İstanbul Teknik Üniversitesi Uydu Yer İstasyonunda araştırma görevlisi
- 2006 – 2017 yılları arasında Ericsson Türkiye’de çözüm mimarı
- 2015 – 2017 yılları arasında 0717.STZ.2014 SanTez projesinde doktora öğrencisi olarak çalıştı.

DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- Buyukoglu, A., **Saglam, M. I.**, Kavas, A., Kartal, M. (2016). An Efficient Throughput Averaging Method for Proportional Fair Algorithm Used in Mobile Networks. *RTUWO, October 03-05, Riga, Latvia*.
- **Saglam, M. I.**, Bekleyen I., Kartal M. & Kavas, A. (2017). 3GPP MBB Downlink Lean Scheduler. *Patent No. PCT/EP2017/072687*. Sweden, Stockholm: Ericsson Patent and Trademark Office.

- **Saglam, M. I.**, Bekleyen I. & Kartal M. (2017). Delay Based Lean Scheduler. *Patent No. P73224 FAM*. Sweden, Stockholm: Ericsson Patent and Trademark Office.
- **Saglam, M.I.** & Kartal, M. (2017). Dördüncü Nesil Gezgin Haberleşme Sistemleri için Yalın Zamanlama Algoritması, *IAREC 2017, 1. Uluslararası İleri Araştırmalar ve Mühendislik Kongresi, Kasım 16-18. Osmaniye, Türkiye.*
- **Saglam, M.I.** & Kartal, M. (2018). A New 4G Mobile Communication Lean Scheduler, *Advances in Electrical and Computer Engineering.*
- **Saglam, M.I.**, Kavas, A. & Kartal, M. (2018). Delay Based Lean Scheduler, *IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering.*

DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Saglam M.I.** (2001). *The Wave Propagation Modeling for Wireless Communication* (BSc Thesis). Electrical and Electronics Engineering Department, Cukurova University.
- **Saglam M.I.** (2003). *Classification of Satellite Images with Self Organizing Map and Linear Support Vector Machine Decision Tree* (Master's Thesis). Institute of Informatics, Istanbul Technical University.
- **Saglam M. I.**, Ersoy O., Yazgan B. (2003). Classification of Satellite Images with Self Organizing Map and Linear Support Vector Machine Decision Tree. *2nd Annual Asian Conference and Exhibition, 13-15 October, Kuala Lumpur, Malaysia.*
- **Saglam M. I.**, Ersoy O. & Yazgan B. (2003). Self Organizing Map and Linear Support Vector Machine Decision Tree with Optimized Class Separability. *ANNIE 2003, 2-5 November, St. Louis, Missouri, USA.*
- **Saglam M. I.**, Ersoy O., Yazgan B. (2004). Application of Self Organizing Map and Linear Support Vector Machine Decision Tree for Detecting Landuse Effects: Bosphorus, Istanbul. *Studying Land Use Effects in Coastal Zones with Remote Sensing and GIS, 13-16 August, Kemer, Antalya, Istanbul.*
- **Saglam M. I.**, Ersoy O. & Erer I. (2004). Self Organizing Global Ranking Algorithm and It's Applications. *ANNIE 2004, 7-10 November, St. Louis, Missouri, USA.*
- Sirin T., **Saglam M. I.**, Erer I. & Gokmen M. (2005). Edge Detection in Images Using Clustering Algorithms", *WSEAS TeleInfo 2005, 13-15 March, Prague, Czech Republic.*
- Sirin T., **Saglam M. I.**, Erer I. & Gokmen M. (2005). Edge Detection Using Clustering Algorithms. *WSEAS Transaction on Computers, Issue 5, Volume 4, May 2005, pp 417-423.*
- **Saglam M. I.**, Sirin T., Ersoy O., Erer I & Gokmen M. (2005). Edge Detection in Multispectral Remote Sensing Image. *RAST 2005, 09-11 June, Istanbul, Turkey.*
- Sirin T., **Saglam M. I.**, Ersoy O., Erer I. & Gokmen M. (2005). A Comparative Evaluation of Competitive Learning Algorithms for Edge Detection Enhancement. *EUSIPCO, 04-08 September, Antalya, Turkey.*
- **Saglam M.I.** (2005). *Firma Başarısızlıklarının Tahmini* (Yüksek lisans tezi). Sosyal Bilimler Enstitüsü, Yıldız Teknik Üniversitesi. İstanbul.