

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**LİSANSIZ LTE-LAA VE Wi-Fi BİRLİKTE VAROLUŞ
SORUNLARI VE ÇÖZÜM YAKLAŞIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Maqsood SULAIMANI

**Enstitü Anabilim Dalı : BİLGİSAYAR VE BİLİŞİM
MÜHENDİSLİĞİ**

Tez Danışmanı : Dr. Öğr. Üyesi. Seçkin ARI

Mayıs 2019

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**LİSANSIZ LTE-LAA VE Wi-Fi BİRLİKTE VAROLUŞ
SORUNLARI VE ÇÖZÜM YAKLAŞIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Maqsood SULAIMANI

Enstitü Anabilim Dalı : **BİLGİSAYAR VE BİLİŞİM
MÜHENDİSLİĞİ**

Bu tez/...../2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Doç.Dr
Ahmet SAYAR
Jüri Başkanı



Dr.Öğr.Uyesi
Seçkin ARI
Üye



Doç.Dr
Cüneyt BAYILMIŞ
Üye



BEYAN

Bu tez çalışmasında kullanılan tüm verilerin tarafımda, çeşitli kaynaklardan, akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve akademik etiğe uygun bir şekilde sunulduğunu, alıntı yapılan hiçbir kısmın tahrif edilmediğini ve kaynaklarının belirtildiğini, tezde yer alan verilerin başka üniversitelerde veya çalışmalarda yer almadığını beyan ederim.

Maqsood SULAIMANI

15.05.2019

TEŞEKKÜR

Herkesten ve her şeyden önce bu tez çalışmamı tamamlayabilmek için bana yardım eden ve kuvvet veren Yüce Rabbime binlerce şükürler olsun.

Ayrıca, araştırma boyunca bana her konuda destek veren ve çalışma sonuna kadar beni motive eden değerli danışman hocam Dr.Öğr.Üyesi.Seçkin Arı'ya içten teşekkürlerimi sunarım. Danışmanımın rehberliğinde değerli tavsiyeler ve teşvikler aldım. Onun desteği, rehberliği ve yardımı olmadan, bu tezi tamamlayamazdım.

Ayrıca aileme, özellikle annem ve babama eğitimim boyunca yardımları ve destekleri için teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	viii
TABLolar LİSTESİ.....	ix
ÖZET.....	x
SUMMARY.....	xi

BÖLÜM 1.

GİRİŞ.....	1
1.1. Bağlam ve Motivasyon.....	1
1.2. Araştırma katkısı.....	3
1.3. Sorun Belirtmesi.....	4
1.4. Araştırma Soruları.....	5
1.5. Tezin Yapısı.....	5

BÖLÜM 2.

Wi-Fi ve LTE'ye GENEL BAKIŞ.....	7
2.1. Wi-Fi'ye Genel Bakış.....	7
2.1.1. Wi-Fi MAC katmanı.....	8
2.1.1.1. DCF.....	8
2.1.1.2. PCF.....	11

2.2. LTE.....	12
2.2.1. Taşıyıcı agregasyonu (CA).....	14
2.2.2. LTE kanalları ve işlevleri.....	15
2.2.2.1. Mantıksal kanallar.....	16
2.2.2.2. Taşıma kanalları.....	16
2.2.2.3. Fiziksel kanallar.....	17
2.2.3. LTE MAC katmanı.....	19
2.3. Wi-Fi ve LTE-LAA “birlikte-varoluş” un Geçmişi ve Özellikleri.....	20
2.3.1. 5GHz lisanssız bandında LTE-LAA ve Wi-Fi’nin “birlikte -varoluş” konusundaki sorunları ve zorlukları.....	21
2.3.2. LTE-LAA ve Wi-Fi “birlikte-varoluş” ile ilgili özellikler.....	22
2.3.3. LTE-LAA ve Wi-Fi arasındaki performans farkları.....	24
2.3.3.1. Spektrum verimliliği.....	24
2.3.3.2. LTE-LAA üzerinden Wi-Fi ayrıcalıkları.....	25
2.3.4. Yukarıda tartışılan özelliklerin özetlenmesi.....	26
2.3.5. Wi-Fi ve LTE-LAA’nın “birlikte-varoluş” mekanizmaları ve performanslarının düşürülmesi.....	26
BÖLÜM 3.	
LİSANSIZ LTE (U-LTE)’ ye GENEL BAKIŞ.....	29
3.1. Lisanssız LTE Türleri (U-LTE).....	30
3.1.1. Lisansız-LTE (LTE-U).....	31
3.1.1.1. DCS ve CSAT.....	31
3.2. LTE-LAA.....	32
3.3. Geliştirilmiş Lisans Destekli Erişim-LTE (eLAA-LTE).....	33
3.4. MulteFire.....	33
3.4.1. MultiFire’ın LTE’ye benzer performansı.....	35

3.4.2. MuteFire'in Wi-Fi'ya benzer dağıtım kolaylığı.....	35
---	----

BÖLÜM 4.

5GHZ BANT GENİŞLİĞİNDE DAĞITIM KURALLARI.....	37
4.1. 5GHz Kanalları ve Frekansları.....	40
4.1.1. İletim gücü.....	41
4.1.1.1. Radyo yerel alan ağ (RLAN) bant-1 (5150-5350MHz).	41
4.1.1.1.1. Sadece iç-mekânlarda alt-bant I (5150-5250MHz).....	41
4.1.1.1.2. Sadece iç-mekânlarda alt-bant II (5250-5350MHz).....	42
4.1.1.2. RLAN bant-2 (5470-5725 MHz).....	42
4.1.1.3. Geniş bantlı radyo erişim ağı ya BRAN (5725-5875MHz).....	42
4.1.2. Kısa mesafeli cihazları (SRD).....	42
4.1.3. Dinamik frekans seçimi (DFS).....	43
4.1.4. İletim gücü kontrolü (TPC).....	44
4.2. 5GHz Bant Genişliğinde LAA için Bant Tanımı.....	44

BÖLÜM 5.

HARQ VE KANAL İZLEME MEKANİZMASINA DAYALI LTE-LAA VE Wİ-Fİ'İN BİRLİKTE VAROLUŞUMU.....	45
5.1. HARQ ve Kanal İzleme Mekanizması.....	47
5.1.1. HARQ ve kanal izleme tabanlı çarpışma olasılığı (HC_{mbp}).....	48
5.1.2. HARQ ve kanal izleme tabanlı ölçeklendirilmiş pencere.....	49
5.2. Performans Değerlendirmesi.....	51
5.3. Wi-Fi ve LTE-LAA Parametreleri.....	52
5.4. Simülasyon Sonuçları.....	53

5.5. Sonuç ve neri.....	56
KAYNAKLAR.....	57
ÖZGEÇMİŞ.....	62

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

3GPP	: Third generation partnership project (Üçüncü nesil ortaklık projesi)
3GPP-R	: 3GPP-Release (3GPP-Sürüm)
4G	: Fourth generation (Dördüncü nesil)
ACK	: Acknowledgement (Onaylama)
AP	: Access point (Erişim noktası)
ATRA	: Afghanistan telecom regulatory authority (Afganistan Telekom düzenleme makamı)
BCCH	: Broadcast control channel (Yayın kontrol kanalı)
BCH	: Broadcast channel (Yayın kanalı)
BRAN	: Broadband radio access network (Geniş-bant telsiz erişim ağı)
BSS	: Basic service set (Temel servis seti)
BWA	: Broadband wireless access (Geniş-bant kablosuz erişim)
CA	: Carrier aggregation (Taşıyıcı kümelenmesi)
CCA	: Clear channel assessment (Net kanal değerlendirmesi)
CCCH	: Common control channel (Ortak kontrol kanalı)
CQI	: Channel quality indicator (Kanal kalitesi göstergesi)
CSAT	: Carrier sense adaptive transmission (Taşıyıcıya duyarlı uyarlamalı iletim)
CSMA/CA	: Carrier sense multiple access/ collision Avoidance (Taşıyıcı algılama çoklu erişim/çarpışma kaçınması)
CW	: Contention window (Çekişme penceresi)
DCCH	: Dedicated control channel (Özel kontrol kanalı)
DCF	: Distributed coordination function (Dağıtılmış koordinasyon işlevi)

DCS	: Dynamic channel selection (Dinamik kanal seçimi)
DFS	: Dynamic frequency selection (Dinamik frekans seçimi)
DIFS	: DCF-inter-frame space (DCF-çerçeveler arası boşluk)
DL	: Downlink (Aşağı bağlantı)
DL-SCH	: Downlink-shared channel (Aşağı bağlantı paylaşılan kanalı)
DTCH	: Dedicated traffic channel (Özel trafik kanalı)
ECCA	: Extended-CCA (Genişletilmiş-CCA)
ED	: Energy detection (Enerji tespiti)
EIRP	: Efficient isotropically radiate power (Verimli izotropik olarak yayılan güç)
eNB	: Evolved Node-B (Gelişen Düğüm-B)
ETSI	: European telecommunication standard institute (Avrupa telekomünikasyon standart enstitüsü)
E-UTRAN	: Evolved-universal telecommunication radio access network (Geliştirilmiş evrensel telekomünikasyon radyo erişim ağı)
FCC	: Federal communication commission (Federal iletişim komisyonu)
FDD	: Frequency division duplex (Frekans bölmeli dubleks)
GHz	: Gigahertz
GSM	: Global system for mobile communications (Mobil iletişim için küresel sistem)
HARQ	: Hybrid automatic repeat request (Hibrit otomatik tekrarlama talebi)
HC _{mbp}	: HARQ and Channel monitoring-based collision probability (HARQ ve Kanal izleme tabanlı çarpışma olasılığı)
ICTA	: Information and communication technology authority (Bilgi ve iletişim teknolojisi otoritesi)
IEEE	: Institute of electric and electronic engineering (Elektrik ve elektronik mühendisliği Enstitüsü)
IP	: Internet protocol (İnternet protokolü)
KL	: Kullanıcı
LBE	: Load based equipment (Yük tabanlı donanım)

LBT	: Listen before talk (Konuşmadan önce dinle)
LTE	: Long term evolution (Uzun süreli evrim)
LTE-A	: LTE-advanced (LTE-gelişmiş)
LTE-LAA	: LTE license assisted access (LTE lisans destekli erişim)
LTE-U	: LTE-unlicensed (Lisansız-LTE)
MAC	: Media access control (Medyum erişim kontrolü)
MBMS	: Multimedia broadcast multicast service (Multimedya yayını çok noktaya yayın hizmeti)
Mbps	: Megabit per second (Bir saniyede bir megabit)
MCCH	: Multicast control channel (Çok noktaya yayın kontrol kanalı)
MCH	: Multicast channel (Çok noktaya yayın kanalı)
MHz	: Megahertz
Ms	: Millisecond (Milisaniye)
M-SDU	: MAC-service data unit (MAC-servis veri birimi)
MTCH	: Multicast traffic channel (Çok noktaya yayın trafik kanalı)
NACK	: Negative-ACK (Negatif-ACK)
PBCH	: Physical-BCH (Fiziksel-BCH)
PCCH	: Paging control channel (Çağrı kontrol kanalı)
Pcell	: Primary cell (Birincil hücre)
PCF	: Point coordination function (Nokta koordinasyon fonksiyonu)
PCFICH	: Physical control format indicator channel (Fiziksel kontrol formatı gösterge kanalı)
PCH	: Paging channel (Çağrı kanalı)
PDCCH	: Physical-DL-control channel (Fiziksel-DL-kontrol kanalı)
PHICH	: Physical HARQ indicator channel (Fiziksel HARQ gösterge kanalı)
PMCH	: Physical-MCH (Fiziksel-MCH)
PRACH	: Physical random access channel (Fiziksel rasgele erişim kanalı)
PUCCH	: Physical uplink control channel (Fiziksel yukarı bağlantı kontrol kanalı)
PUSCH	: Physical uplink shared channel (Fiziksel yukarı bağlantı paylaşan kanalı)

RACH	: Random access channel (Rasgele erişim kanalı)
RF	: Radio frequency (Radyo frekansı)
RFI	: Radio frequency interference (Radyo frekansı girişimi)
RLAN	: Radio local area network (Radyo yerel alan ağı)
RLC	: Radio link control (Radyo bağlantı kontrolü)
RN	: Relay node
RTS/CTS	: Request-to-send/ Clear-to-send (Gönderme isteği / Göndermeye açık)
SC	: Small cell (Küçük hücreli)
SIB	: System information block (Sistem bilgi bloğu)
SIFS	: Short inter-frame space (Kısa çerçeveler arası boşluk)
SRD	: Short range device (Kısa mesafeli cihazlar)
STA	: Station (İstasyon)
TDD	: Time division duplex (Zaman bölmeli dubleks)
T-KL	: Toplam Kullanıcı
TPC	: Transmit power control (İletim gücü kontrolü)
TXOP	: Transmission opportunity (İletim fırsatı)
UE	: User equipment (Kullanıcı ekipmanı)
UL	: Uplink (Yukarı-bağlantı)
UL-SCH	: UL-shared channel (UL-Paylaşan kanalı)
UMTS	: Universal mobile telecommunication system (Evrensel mobil telekomünikasyon sistemi)
UNII	: Unlicensed national information infrastructure (Lisanssız ulusal bilgi altyapısı)
W	: Window (Pencere)
WLAN	: Wireless local area network (Kablosuz yerel alan ağı)
W_{max}	: Window maximum (Maksimum Pencere)
W_{min}	: Window minimum (Minimum pencere)
W_u	: Window upper margin (Pencere üst kenarı)

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Kablosuz LAN mimarisi.....	7
Şekil 2.2. IEEE 802.11 DCF MAC protokolünde RTS/CTS'a göre kanal erişimi.	10
Şekil 2.3. Wi-Fi çekişme penceresinde üstel artışı [12].....	11
Şekil 2.4. GSM'den LTE'ye kadar ağ evrimi [16].....	13
Şekil 2.5. Bant içi, bant arası bitişik olan ve olmayan taşıyıcı agregasyonu [19].	14
Şekil 2.6. Bant arası taşıyıcı agregasyon senaryosu.....	15
Şekil 2.7. LTE yukarı ve aşağı bağlantılar kanalların eşleşmesi [23].....	18
Şekil 2.8. LTE MAC ile ilgili katmanlar ve kanallar [25].....	20
Şekil 3.1. 2016 ile 2021 arasındaki küresel trafik artışı.....	29
Şekil 3.2. LTE-U tarafından kullanılan görev döngüsü mekanizması.....	32
Şekil 3.3. LAA-LBT ve Wi-Fi kanalı paylaşımı.....	33
Şekil 3.4. MulteFire ile Küçük Hücreler Dağıtım Fırsatları.....	34
Şekil 5.1. LTE-LAA eNB için LBT mekanizması HCmbp'ye göre süreci [65]....	50
Şekil 5.2. Wi-Fi ve LAA simülasyonunun birlikte-varoluşun iç mekân senaryosu.	51
Şekil 5.3. Wi-Fi ve LAA gecikme süresi (ms) HARQ-LBT'ye dayalı performansı.	54
Şekil 5.4. Wi-Fi ve LTE-LAA gecikme süresi (ms) HCmbp'ye dayalı performansı	54
Şekil 5.5. Wi-Fi ve LTE-LAA veri çıkışı HARQ-LBT'ye dayalı performansı.....	55
Şekil 5.6. Wi-Fi ve LTE-LAA veri çıkışı HCmbp'ye dayalı performansı.....	55

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1. Mantıksal kanalların işlevselliği.....	16
Tablo 2.2. Taşıma kanalların işlevselliği.....	17
Tablo 2.3. Fiziksel kanalları ve işlevselliği.....	17
Tablo 3.1. U-LTE Standartlarının Özetlenmesi.....	34
Tablo 4.1. 5GHz Kanalları Farklı Bölgelerdeki Kurallar ve Gereksinimler [56]...	40
Tablo 5.1. Her iki operatör için kullanılan simülasyon parametresi.....	52

ÖZET

Anahtar Kelimeler: LTE, Wi-Fi, LTE-LAA, “birlikte-varoluş”, Çekişme Penceresi, LBT, HARQ, HC_{mbp}

“Long Term Evolution-License Assisted Access, Uzun Süreli Evrim-Lisanslı Destekli Erişim” (LTE-LAA), hücrel verilerin boşaltılması için en iyi çözümlerden birisi ve aynı zamanda hızla büyüyen hücrel ağ trafiği talebine uygun bir teknolojidir. LTE-LAA, LTE'nin lisanssız spektrumuna uzantısıdır. Lisanssız spektrum ise kullanıcılara yüksek hızlı veri sağlamak için ikincil kaynak olarak kullanılır. LTE-LAA, Wi-Fi gibi diğer bazı teknolojiler tarafından işgal edilmiş 5GHz'lik lisanssız bant genişliğinde çalışmaktadır. Mevcut Wi-Fi kanal erişim mekanizması, “Carrier Sense Multiple Access/ Collision Avoidance, Çarpışmadan Kaçınma ile Taşıyıcı Algılama Çoklu Erişim” (CSMA/CA) mekanizmasına dayalıdır. Yani kullanıcı kanalın meşgul olduğunu ya olmadığını belirlemek için kanalı ilk olarak algılar. Ayrıca iletim kanalında çarpışmayı önlemek için rastgele geri çekilme mekanizması kullanılır. Diğer taraftan, LTE-LAA “Listen Before Talk, Konuşmadan Önce Dinle” (LBT), LTE-LAA kullanıcının ilk önce verileri göndermeden önce kanalı dinlediği, CSMA/CA (Wi-Fi kanal erişim mekanizması) kanal erişim mekanizmasına benzer bir mekanizma kullanır. Ancak, bu iki teknolojinin (LTE-LAA ve Wi-Fi) aynı 5GHz kanalında çalıştığı durumlarda bu 5GHz kanalının dengesiz/uyumsuz bir şekilde paylaşma sorunuyla karşı karşıya geleceklerdir. Bu tez çalışması, bu sorunu iyileştirmek için Wi-Fi ve LTE-LAA kullanıcıları arasındaki uygun “birlikte-varoluşu” sağlamak adına uygun bir mekanizmayı “Hybrid Automatic Repeat Request and Channel Monitoring based Collision Probability” (HC_{mbp}) önermektedir. Daha özellikli olarak, eNB, HC_{mbp}'nin mekanizmasına dayalı çarpışma olasılığını gözlemleyecektir. Ayrıca, kanalda çarpışma olduğu veya olmadığı zaman çekişme, pencerenin artması ve azalması HC_{mbp} mekanizmasına dayalıdır. Simülasyon sonuçları, önerilen HC_{mbp} mekanizmasının, mevcut LBT mekanizmasına kıyasla daha iyi bir “birlikte-varoluş” sağladığını göstermektedir.

UNLICENSED LTE-LAA AND WI-FI COEXISTENCE PROBLEMS AND THEIR SOLUTION APPROACH

SUMMARY

Keywords: LTE, Wi-Fi, LTE-LAA, Coexistence, Contention Window, LBT, HARQ, HC_{mbp}

Long Term Evolution-License Assisted Access (LTE-LAA) which is one of the best solution for offloading the cellular networks data and also a suit respond to the rapidly growing cellular network traffic demand. LTE-LAA is the extension of LTE to the unlicensed bandwidth, in which unlicensed spectrum is used as secondary resource for providing high speed data to the users. Since LTE-LAA operates in 5GHz unlicensed bandwidth where it is already in used by Wi-Fi. The current channel access mechanism of Wi-Fi is based on Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance (CSMA/CA) where the station first sense the channel to specify if the channel is busy or free. And a random back-off is used to prevent the collision in transmission channel. From other hand LTE-LAA uses Listen Before Talk (LBT) a CSMA/CA (Wi-Fi channel access mechanism) like channel access mechanism where a LTE-LAA user first will listen to the channel before sending the data. However, there is a fair coexistence issue when these two technologies (LTE-LAA and Wi-Fi) share the same 5GHz channel. To overcome this coexistence issue in this thesis study we propose a joint, “Hybrid Automatic Repeat Request and Channel Monitoring based Collision Probability” (HC_{mbp}) channel access mechanism to bring the fairness between LTE-LAA and Wi-Fi stations. More specifically, the eNB will observe the collision probability based on HC_{mbp} mechanism. The contention window is updated based on HC_{mbp} mechanism. Based on simulation results the proposed HC_{mbp} mechanism brings a better fairness compared to the current mechanism of LBT.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

1.1. Bağlam ve Motivasyon

İnternet tabanlı hizmetlerin hızlı ilerlemesi ve hoş deneyimi olarak kablosuz iletişim sistemlerinde önümüzdeki yıllarda mobil trafiğin büyümesinin bin kattan fazla olacağını ve ayrıca yüksek veri hızına olan talebin artacağını göstermektedir [1]. Bununla birlikte, mevcut lisanslı spektrum sınırlı olduğundan, yeni lisanslı frekans bantları nadir ve pahalı hale gelmişlerdir. Artan kablosuz iletişim kapasitesi talebine cevap verebilmek için, lisanssız bantlar da dâhil olmak üzere trafik boşaltımı için farklı türdeki spektrumların daha iyi kullanılmasını sağlayan tekniklere ihtiyaç duyulacaktır [2]. Hücresele ağlarda geniş-bant erişiminin %30 kadarının lisanssız bantlara boşaltılması mümkün olacaktır [3].

5GHz bandına “Long Term Evolution License Assisted Access, Uzun süreli evrim lisansı destekli erişim”, (LTE-LAA) uzatılması ve LTE-LAA'nın 5GHz'de çalışan diğer teknolojiler ile uyumlu bir şekilde “birlikte-varoluşun” sağlanması şartıyla ilgili “Third Generation Partnership Project, Üçüncü Nesil Ortaklık Projesi” (3GPP) tartışmanın iki ana gözlemidir [4]. Wi-Fi ve LTE-LAA'nın 5GHz spektrumundaki “birlikte-varoluşu” düşünülürse, LTE-LAA'nın, bir bölgedeki yerel hükümetin düzenleyici gerekliliklerine uyulması ve Wi-Fi ile “birlikte-varoluşu” sağlanmalıdır. ABD, Güney Kore ve Çin gibi bazı pazarlarda, LBT gereksinim duyulmamaktadır. Yani LTE hava ara-yüzü protokolünü değiştirmeden, bu senaryolarda Wi-Fi ile “birlikte-varoluş”, “Carrier Sense Adaptive Transmission, Taşıyıcı Algılama Uyarlamalı İletim” (CSAT) gibi özel teknikler kullanılarak gerçekleştirilebilir. Bununla birlikte, LBT'nin gerektiği Avrupa ve Japonya gibi pazarlarda, LTE hava ara-yüzünün, 3GPP-Sürüm-13'te tanıtılan LBT özelliği ile değiştirilmesi gerekecektir [5]. Mevcut araştırmalar, temel olarak LTE-LAA ve Wi-Fi “birlikte-varoluşu”

mümkün kılan mekanizmaları hedeflemişlerdir. LTE-LAA ve Wi-Fi'nin 5GHz spektrumundaki “birlikte-varoluş” performansının farklı dağıtım senaryolarında, çok fazla değişiklik göstereceği aşikârdır. LTE-LAA ve Wi-Fi, sundukları hizmet bakımından birbirleriyle değiştirilemezler. Hem LTE-LAA'nın hem de Wi-Fi'nin performansı birlikte tutulmalı ve 5GHz spektrumunda bir arada kullanıldığında birbirlerinden etkilenmemelilerdir.

LTE'nin 5GHz lisanssız bandında Wi-Fi ile “birlikte-varoluş”, LTE ve Wi-Fi “Medium Access Control, Medyum Erişim Kontrolü” (MAC) katmanları arasında temel bir fark olduğu için birçok zorluk yaratır. Wi-Fi'de MAC katmanı, CSMA/CA mekanizmasına dayalıdır. Böylece istasyon, kanalı algılar ve eğer kanalı serbest bulunursa iletimini gerçekleştirir. Kanalı boş olmadığı durumlarda ise istasyon, rastgele bir geri çekilme zamanlayıcısı seçip, zamanlayıcı sıfıra düştüğünde iletimi başlatır. LTE'deyken hiçbir algılama şeması yoktur. Sonuç olarak, LTE'nin lisanssız bantlarda Wi-Fi ile “birlikte-varoluşu”, Wi-Fi istasyon, kanalının kullanılabilirliğini kontrol ettikten sonra kendi verilerini gönderdiğinden dolayı Wi-Fi performansını ciddi şekilde düşürecektir [6]. Bu sorunu çözebilmek ve kanalı uygun bir şekilde paylaşmak için, lisanssız LTE üzerine bir çok farklı mekanizma incelenmiştir. Bu mekanizmalardan birisi LTE-LAA'daki, LBT, LTE-LAA'nın CSMA/CA'ya benzer kanal erişimi kullanan mekanizmasıdır [4]. Wi-Fi'de bulunan ve diğer Wi-Fi istasyonları ile “birlikte-varoluş”unu sağlayan bir özellik olan LBT yoğun olarak incelenmiştir. Değerlendirilen birden fazla LBT şemaları vardır. Değerlendirme sonuçlarına dayanarak, 3GPP tarafından LTE-LAA'nın Wi-Fi ile “birlikte-varoluş”unu sağlamak için, Wi-Fi istasyonlarının kullandıklarına benzer bir kanal erişim mekanizması “LBT” belirlenmiştir. LBT, LTE-LAA için “birlikte-varoluş”un mekanizması olarak benimsenmiştir. Bu sayede, bir radyo vericisinin, ilemeden önce “Extended Clear Channel Assessment, Genişletilmiş bir Açık Kanal İncelemesi” (ECCA) tarafından takip edilen “Clear Channel Assessment”, Net bir Kanal Değerlendirmesi” (CCA) kontrolünün uygulanması gerekmektedir. CCA, bir kanalın işgal edilip edilmediğini veya net olup olmadığını belirlemek için belirli aralıklarla “Energy Detection, Enerji Tespiti” (ED eşiği) enerji tespitinde bulunmaktadır. Verici,

kanala eriştikten sonra, vericinin yalnızca “Transmission Opportunity, İletim Fırsatı” (TXOP) olarak adlandırılan sınırlı bir süre boyunca iletimine izin verilecektir.

1.2. Araştırma Katkısı

Bu araştırma çalışmasında, LTE-LAA ve Wi-Fi teknolojileri aynı 5GHz lisanssız bantta birlikte çalıştığına LTE-LAA ve Wi-Fi istasyonları arasında “birlikte-varoluşunu” iyileştirmek amacıyla HC_{mbp} mekanizmayı önerdik.

- İlk olarak, LTE-LAA kullanıcılar (Nodes) için kanaldaki çarpışma olasılığı, HC_{mbp} ’nın sonuçlarına dayanmaktadır. Kanalda çarpışma varsa, HC_{mbp} değeri sıfırdan büyük olacaktır ($HC_{mbp} > 0$), ancak kanalda çarpışma yoksa HC_{mbp} değeri sıfıra eşit olacaktır ($HC_{mbp} = 0$). Şimdi, $HC_{mbp} > 0$ olduğunda, kanalda çarpışma olduğu anlamına gelir, ancak $HC_{mbp} = 0$ ise, kanalda çarpışma olmadığı anlamını ifade eder.
- İkinci ise, çekişme penceresi HC_{mbp} mekanizmasının sonucuna dayanarak güncellenir. $HC_{mbp} > 0$ ise, çekişme penceresinin büyüklüğü maksimum seviyeye çıkarılır, ancak $HC_{mbp} = 0$ ise çekişme penceresinin büyüklüğü minimuma ayarlanır.
- Simülasyon sonuçlarına göre, gecikme ve verim (throughput) düşüşü hem LTE-LAA hem de Wi-Fi istasyonları için belirgin bir şekilde iyileştirmesini gösterilmektedir. Özellikle, bu iyileştirmenin etkisini Wi-Fi kullanıcıları için daha fazla görülmektedir.
- Önerilen HC_{mbp} mekanizması, LTE-LAA ve Wi-Fi kullanıcıları arasında 3GPP tarafından kullanılan mevcut HARQ-LBT mekanizmasına kıyasla daha iyi bir “birlikte-varoluşunu” sağlamaktadır.

Ayrıca bu araştırma çalışması tüm “birlikte-varoluşun” gereksinimlerini (birlikte-varoluş özellikleri, U-LTE ve Wi-Fi kanal erişim mekanizmaları, 5GHz lisanssız bant genişliğinde dağıtım kuralları ve gereksinimi) de kapsamaktadır.

1.3. Sorun Belirtmesi

Wi-Fi'deki çarpışmanın tespiti bir “Acknowledgment, Onay” (ACK) çerçevesine dayalıdır. İletim kanalında çarpışma varsa istasyona haber verilir. Ama LTE-LAA'da, kullanıcıya “Node” çarpışma olayını bildiren bir onay (ACK) çerçevesi yoktur. LTE-LAA'da, çarpışma tespiti HARQ geri bildirimine dayalıdır [7]. HARQ, iletilen çerçeveler için tek bir iletim fırsatındaki (TXOP) “Negative Acknowledgement, Negatif Onaylama” (NACK) numarasını içermektedir. 3GPP'ye göre, en son iletim fırsatının (TXOP), HARQ geri bildirimlerinin %80'i negatif onay (NACK) ise, LBT'de “Window, Pencerenin” (W) boyutunun arttırılması önerilecektir [8]. LTE, tek bir alt çerçevede birden fazla kullanıcı (Node) zamanlayabildiğinden, %80 eşliğini karşılamasını genellikle zor kılacaktır. Bir çarpışma gerçekleşse bile, bu zamanlanmış veri çerçevelerinin %80'inden daha azının çarpıştan muzdarip olduğunu, LTE-LAA “Evolved Node-B, gelişen-düğümü-B” (eNB), (Wi-Fi erişim noktası ile benzer şekilde) penceresini yükseltmeyecektir. Bu nedenle kanalda olmuş çarpışma çözülmeden kalacaktır. Ayrıca, LTE tarafından sunulan zamanlama gecikmeleri nedeniyle, belirli bir alt-çerçeveyle ilişkili HARQ geri bildirimini, iletim süresinden en az 4 ms sonra alınacaktır [9]. Bu nedenle, 3GPP, pencereyi (W) minimum gecikmeyle güncellemek için yalnızca bir iletim fırsatının (TXOP) ilk alt çerçevesi sırasında tespit edilen çarpışmaları dikkate almayı önermektedir. Sonuç olarak, alt-çerçevelerin geri kalanından gelen çarpışmalar göz ardı edilir. Bu tez çalışmasında, LTE-LAA eNB'nin pencere boyutunun ölçeklendirmesinin ve Wi-Fi ile aynı kanalı paylaştığında denge/eşitlik (fairness) sağlanmasının mümkün olabilmesi için HARQ ve kanal izleme tabanlı çarpışma olasılığı (HC_{mbp}) mekanizması önerilmektedir. HARQ geri bildirimlerinin yalnızca %80'den fazla olmasını beklemek yerine, önerilen HARQ ve kanal izleme tabanlı (HC_{mbp}) mekanizmasına göre pencerenin boyutunu artırır/azaltır. Önerilen mekanizma ayrıca pencere boyutunun artması/azalması için de farklıdır.

Daha spesifik olarak önerilen mekanizma (HC_{mbp}), HARQ olumsuz onaylarına ve izlenmiş yarıklarına (slots) dayalıdır.

1.4. Araştırma Soruları

Bu tez çalışması, 5GHz spektrumundaki Wi-Fi ve LTE-LAA “birlikte-varoluş”un ana kaygılarını, LTE-LAA'nın, Wi-Fi ağları tarafından işgal edilmiş 5GHz lisanssız bant genişliği kullanılmaya başlandığında ortaya çıkan problemleri, sorunları ve zorlukları içermektedir. Bu tez çalışmasında, aşağıdaki araştırma sorularının cevapları bulunmaktadır:

1. LTE-LAA ve Wi-Fi 5GHz kanalında çalıştığında hangi problemler ortaya çıkacaktır?
2. Hangi taraf (LTE-LAA veya Wi-Fi) daha fazla etkilenecektir?
3. LTE-LAA'nın Wi-Fi'yi etkileyen faktörler nelerdir?

1.5. Tezin Yapısı

Tezin yapısı aşağıda verilmiştir:

Bölüm 1, Giriş bölümüdür. Bu bölümde genel olarak tezin bağlam ve motivasyonu, çalışmanın sorun bildirimini, araştırma sorunları ve tezin yapısı bulunmaktadır. Bölüm 2, Wi-Fi ve LTE'ye genel bir bakış sunar. Wi-Fi MAC katmanı işlevselliği ve mekanizmaları hakkında inceleme yapılmıştır. Ayrıca Bölüm 2, LTE, LTE kanalları ve LTE MAC katmanını kapsamaktadır. Bunlarla birlikte Bölüm 2, LTE-LAA ve Wi-Fi “birlikte-varoluş” ve özelliklerini de sunar. Wi-Fi ve LTE-LAA “birlikte-varoluşun” özellikleri, performans farklılıkları, performansın düşmesi ve mevcut olan bazı “birlikte-varoluş” mekanizmaları incelenmiştir. 3. Bölüm ise, dört ana lisanssız LTE (U-LTE) teknolojisi (LTE-U, LTE-LAA, eLAA-LTE ve MulteFire) hakkında bilgi verecektir. Bölüm 4'te, 5GHz lisanssız bant genişliğinde dağıtım kuralları ve gereksinimleri incelenmiştir. “Transmission Power Control, İletim gücü kontrolü” (TPC), “Dynamic Frequency Selection, Dinamik Frekans Seçimi” (DFS), “Short

Range Devices, Kısa Mesafeli Cihazlar” (SRD) ve diğere bazı özellikler ele alınmıştır. Son bölüm 5. bölümdür. Bu bölümde, 5GHz bant genişliği kullanıldığında Wi-Fi ve LTE-LAA adına adil ve uygun “birlikte-varoluş” mekanizması sağlanması için, önerilen “birlikte-varoluş” mekanizması (HC_{mbp})’yi sunmaktayız. Son kısımda ise, bu çalışmanın son bilgisini veren sonuç ve öneri kısmı bulunacaktır.

BÖLÜM 2. Wi-Fi ve LTE'ye GENEL BAKIŞ

2.1. Wi-Fi'ye Genel Bakış

Wi-Fi, bilgisayarlar, akıllı telefonlar ve tabletler gibi cihazların bir erişim noktası (AP) aracılığıyla internete bağlanmasını sağlayan ve aynı zamanda diğer Wi-Fi cihazlarıyla iletişim kurmak için bağlantı olanağı sağlayan kablosuz ağ protokolüdür [10]. Wi-Fi'nin en önemli işlevi kullanıcıların internete kablosuz ve rahat bir şekilde kendi aralarında bağlanmalarını sağlamasıdır. Kablosuz verici olarak, geniş bant bağlantısı üzerinden internette bilgi alışverişinde bulunan elektronik bir cihaz gereklidir. Bu verici genellikle bir "Wireless Access Point, Kablosuz Erişim Noktası" veya (WAP) olarak adlanmıştır. WAP internette alınan bilgileri radyo dalgalarına dönüştürüp yayar ve etkin bir şekilde küçük bir yerel alan yaratır. Eğer cihazlarınızda doğru tipte kablosuz adaptör varsa, bu radyo sinyallerini alabilirler. Bu alan genellikle bir Kablosuz Yerel Alan Ağı, veya kısa WLAN olarak adlandırılır. Şekil 2.1.'de kablosuz LAN mimarisi gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Kablosuz LAN mimarisi

Wi-Fi, tamamen lisanssız spektrumlarda ücretsiz olarak çalışmaktadır. Ancak Wi-Fi tarafından sağlanan servis veya internet bağlantısı ücretsiz değildir. Yani Wi-Fi internet servisi sağlamak için, ücretsiz olmayan internet bağlantısına ihtiyaç duyar. Örnek olarak, eğer ofisinizde veya evinizde internete bağlı bir Wi-Fi bağlantınız varsa, size internet hizmeti veren bağlantıyı ödemek zorundasınız [10].

Wi-Fi'nin kolay ve hızlı uygulanabilir olması, özellikle kablolu ağ yerleştirmenin imkânsız olduğu veya kabloların takılmasına izin verilmediği yerlerde/alanlarda Wi-Fi teknolojisinin daha popüler hale gelmesini ve daha fazla yatırım çekmişini sağlamıştır. Wi-Fi teknolojisinin popüleritesi, insanları sürekli olarak Wi-Fi ağlarının geliştirilmesine yatırım yapmaya yönlendirip ve Wi-Fi'nin performansını daha da artırmak için Wi-Fi'de daha gelişmiş teknolojiler uygulanmasına neden olmuştur.

2.1.1. Wi-Fi MAC katmanı

Kablosuz ağda bir istasyon kendi iletimi ile diğer istasyondan gelen iletim arasındaki çarpışmayı bulamamaktadır. Kablosuz ağ istasyonları arasındaki medyum erişim kablolu bir ağa göre daha karmaşıktır. Kablosuz ağ istasyonu aynı iletim medyumunu diğer istasyonlarla paylaşırken çarpışmayı algılayamamasından kaynaklanır. Bu nedenle, kablosuz ağda bir verici aynı anda kendi iletimi ve diğer istasyonlardan gelen yayınları iletemez ve dinleyemez [11].

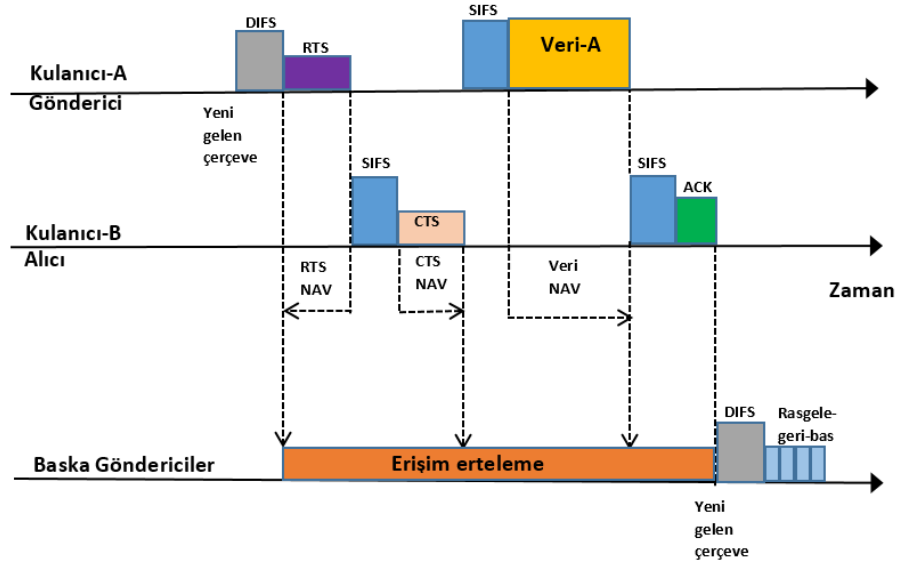
802.11 standardı iki yaygın MAC protokolünü, çekişmeli tabanlı, “Distributed Coordination Function, Dağıtılmış Koordinasyon İşlevini (DCF) ve çekişmesiz, “Point Coordination Function, Nokta Koordinasyon İşlevini” (PCF) tanıtmıştır. Bu iki iletim erişim protokolü aşağıda kısaca açıklanmışlardır.

2.1.1.1. DCF

DCF çekişmeli bir dağıtık mekanizmadır. DCF, CSMA/CA kanal erişim mekanizmaya dayalı bir mekanizmadır. Yani Wi-Fi istasyonunun iletimi sadece kanal boşta olduğunda mümkün hale gelebilir. CSMA/CA iki erişim yöntemi kullanır. Temel

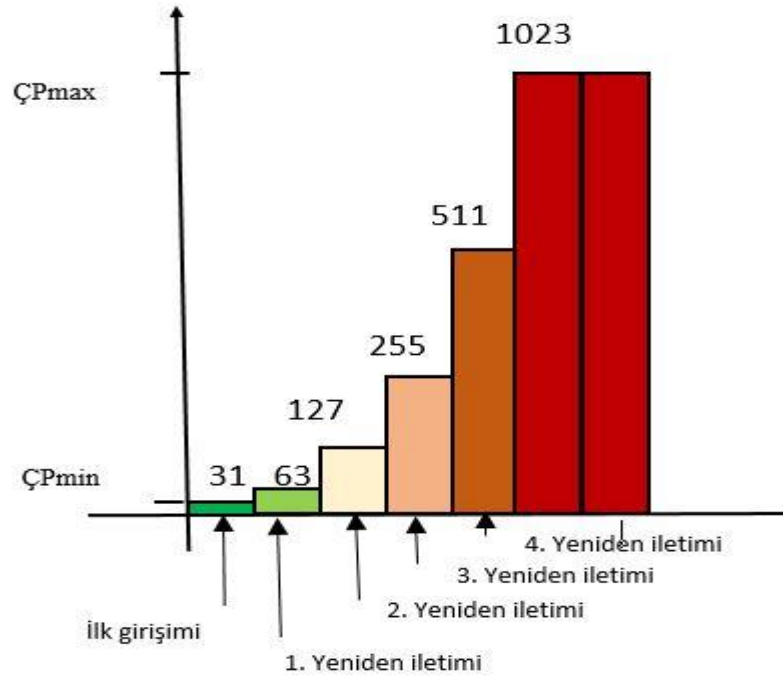
erişim yöntemi ve “Request to Send, Gönderim İsteği/Clear to Send, Gönderim için Net” (RTS/CTS) erişim yöntemidir [12]. Temel erişim yöntemi iki yönlü bir el sıkışmadır. Hâlbuki RTS/CTS erişim yöntemi Şekil 2.2.’de gösterildiği gibi dört yönlü bir el sıkışmadır. Temel erişim yönteminde, gönderici istasyonu çerçevesini veri iletim aşamasında hedef istasyona gönderir. Çerçeveyi doğru bir şekilde aldıktan sonra, alıcı istasyonu onaylama aşamasında gönderici istasyona bir bildirim gönderecektir. Böylece, bu süreçte iki yönlü el sıkışması tamamlanır. İkinci erişim yönteminde, kaynak istasyonu hedef istasyona bir RTS çerçevesi gönderir. Hedef istasyon RTS çerçevesini doğru bir şekilde alırsa ve alım için uygunsa, bir CTS çerçevesiyle yanıt verecektir. Kaynak istasyon CTS aldıktan sonra veri çerçevesini hedef istasyona gönderecektir. Veri çerçevesini doğru bir şekilde aldıktan sonra, hedef istasyonu, veri çerçevesinin bir alındı çerçevesine sahip olduğunu kabul edecektir. Böylece dört yönlü el sıkışması tamamlanır. Yük, belirli bir eşğin altındaysa temel erişim yöntemi kullanılır. Aksi halde, RTS / CTS erişim yöntemi kullanılacaktır.

CSMA/CA mekanizması ile birlikte çalışmak için Wi-Fi istasyonlarında geri-bas (Back-off) mekanizması uygulanmıştır. Geri-bas mekanizmasında, Wi-Fi istasyonu, “Contention Window, Çekişme Penceresi” (CW)'nin boyutu (0, CW)'dan rastgele bir geri alma numarası üretecektir. Ardından, “DCF- Inter-frame Space, Çerçeve-Arası Boşluk (DIFS) süreci sonrası kanal boşta algılandığında geri-bas sayacı azaltılır. Geri-bas sayacı sıfıra ulaştığında, paket iletimi için ilgili Wi-Fi istasyonunu tetiklenecektir. Alıcı Wi-Fi istasyonu, paketi başarılı bir şekilde aldıktan sonra “Short Inter-frame Space, Kısa Çerçeve-arası-Boşluk” (SIFS) sonrası kaynak Wi-Fi istasyonuna bir onay (ACK) gönderecektir [13]. Bununla birlikte, birden fazla istasyonun aynı geri-bas numarasını seçmesi mümkündür. Dolayısıyla farklı istasyonlar aynı zamanda iletim yapacak ve bir çarpışmaya yol açacaktır. Çarpışma olduğunda, Şekil 2.3.'te gösterildiği gibi, CW iki katına çıkacaktır (çekişme penceresi boyutunda üstel artış gerçekleşecektir). Wi-Fi’de çekişme penceresinin minimum boyutu 15 ve maksimum boyutu 1023 belirtilmiştir.



Şekil 2.2. IEEE 802.11 DCF MAC protokolünde RTS/CTS'a göre kanal erişimi

RTS/CTS erişim yönteminde, bir istasyon bir RTS çerçevesini gönderdikten sonra bir CTS zaman aşımı süresi içinde bir CTS çerçevesini almazsa, RTS/CTS erişim yöntemine ve geri dönüş algoritmasına göre çerçeveyi yeniden iletmeye çalışmaktadır. "Network Allocation Vector, Ağ tahsisi vektörü" (NAV) bir sanal taşıyıcı algılama mekanizması ve bir çerçevenin MAC başlığında bulunan süre değerlerini kullanarak ayarlanan bir zamanlayıcıdır [14]. Her bir çerçeve, bir istasyonun iletimini tamamlamak için gereken süreyi belirten bir süre değeri içerir.



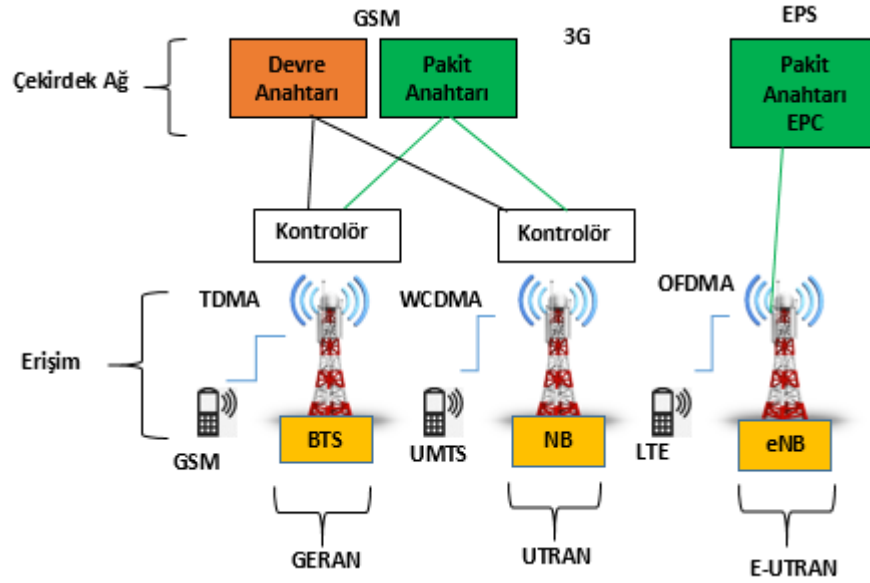
Şekil 2.3. Wi-Fi çekişme penceresinde üstel artışı [12]

2.1.1.2. PCF

DCF'ye ek olarak, IEEE 802.11 standardı, PCF olarak bilinen birden fazla medyum erişim yöntemi sunulmuştur. PCF çekişmesiz bir merkezi mekanizmadır. PCF modunda erişim noktası, her Wi-Fi istasyonunu sorgulayarak bir Wi-Fi ağı içindeki iletişimi kontrol etmekten sorumludur [14]. PCF modunda erişim noktası, bir sorgulama mesajı istasyona gönderir. İstasyon sorgulama mesajı aldıktan sonra verilerini iletebilir. Wi-Fi istasyonundan sorgulama geri-bildirimi aldıktan sonra, erişim noktası (AP) başka bir istasyonda sorgulanmaya devam edecektir. Bu durumda, istasyonlar sadece bir AP'den sorgulama mesajını aldıktan sonra paketlerini iletebilecektir. Bir istasyonun gönderilecek bir paketi yoksa istasyon AP'ye NULL(Boş) paketi gönderir ve bu da PCF modunun verimliliğini azaltır. Daha da kötüsü, ağdaki istasyon sayısını artırarak, medyum erişim için istasyonların bekleme süresi de artacaktır. Ayrıca, PCF'nin kullanılması için hem istasyon hem de AP'nin PCF modunu desteklemesi gerekmektedir. Öte yandan, DCF modunda paket çarpışmaları olsa da, DCF modu ölçeklenebilirliği, basitliği ve verimliliği nedenleriyle çok yaygın ve tercih edilmiş bir MAC mekanizmasıdır.

2.2. LTE

LTE, bir mobil iletişim standardıdır. “User Equipment, Kullanıcı Ekipmanı” (UE) ve çekirdek ağ arasında yüksek veri hızı iletişimlerini destekleyen başarılı bir hücresel sistemdir. LTE, 3.9G IP tabanlı hücresel sistemi iken LTE-gelişmiş (LTE-A), 4.nesil (4G) IP tabanlı hücresel sistemidir [15]. LTE, 3GPP-R8’de tanımlanan “Evolved-Universal Telecommunication Radio Access Network, Evrim Halindeki Evrensel Telekomünikasyon Radyo Erişim Ağı” (E-UTRAN) olarak da bilinir. Bu yeni tanıtılan standart veya teknolojinin gereksinimleri, spektrum verimliliği, yüksek veri hızı, ve bant genişliğinde esnekliktir [16]. “Global System for Mobile Communication, Mobil, İletişim için Küresel Sistem” (GSM)’dan LTE’ye kadar ağın evrimi, Şekil 2.4.’te gösterilmiştir. GSM, devre anahtarını kullanarak gerçek zaman servisi desteklenir. Daha sonra ilk internet protokolü (IP) tabanlı veri hizmeti “General Packet Radio Service, Genel Paket Radyo Servisi” (GPRS) çok düşük bir hız ile tanıtılmıştır. GPRS’tan sonra GPRS’tan daha yüksek veri hızına sahip “Enhanced Data Rate for GSM Evolution, GSM Evrimi için Gelişmiş Veri Hızı” (EDGE) tanıtıldı. “Universal Mobile Telecommunication System, Evrensel Mobil Telekomünikasyon Sistem” (UMTS)’ında daha yüksek veri oranlarına ulaşmak için yeni bir erişim teknolojisi “Wide Code Division Multiple Access, Geniş Kod Bölümlü Çoklu Erişim” (WCDMA) geliştirilmiştir. UMTS’deki erişim ağı, gerçek zamanlı servisler için bir devre anahtarlı bağlantı ve veri-hizmet servisleri için paket anahtarlı bir bağlantı uygulamaktadır.

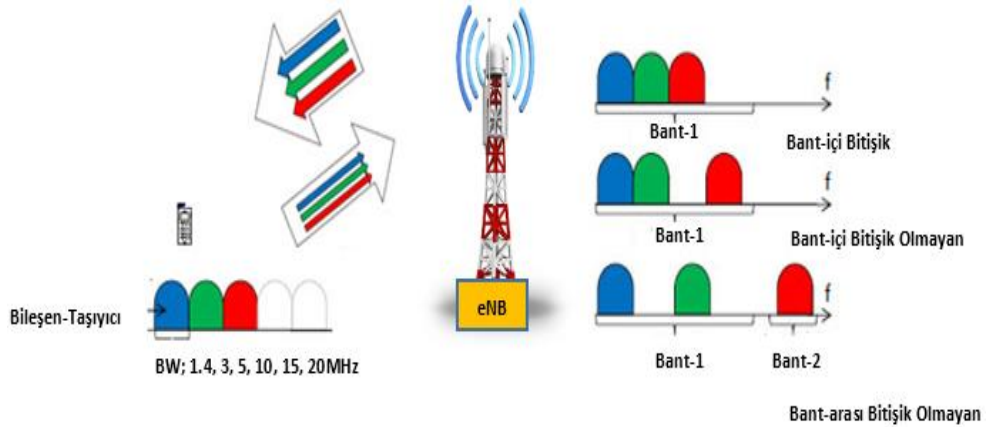


Şekil 2.4. GSM'den LTE'ye kadar ağ evrimi [16]

“Evolved Packet System, Evrimleşmiş Paket Sistemi” (EPS) olarak da adlandırılan LTE tamamen IP tabanlıdır. Hem gerçek zamanlı servisler hem de veri hizmetleri IP protokolü tarafından gerçekleştirilir. Mobil cihaz açıldığında ve IP adresi tahsis edilir. LTE'nin sürümü-10 2011'de standartlaştırıldıktan sonra LTE'de daha ileri teknolojiler uygulanmıştır. Ve LTE-A'yı o zamandan beri LTE'nin yeni adı olarak belirlenmiştir [17]. LTE-A, LTE'nin önceki sürümlerine kıyasla daha yüksek performans sunabilmiş. Ayrıca, LTE'nin (sürüm 10'dan önce), “International Telecommunication Union, Uluslararası Telekomünikasyon Birliği” (ITU) tarafından tanımlanan “International Mobile Telecommunication-Advanced, Uluslararası Mobil Telekomünikasyon-gelişmiş” (IMT-A) olarak da adlandırılan 4G gereksinimlerini karşılamadığı fark edilmiştir. Örneğin, LTE'nin yüksek veri hızı, IMT-A gerekliliklerine göre 1 saniyede 1 gigabit'e ulaşamaz. LTE-A, tüm 4G gereksinimlerini karşılayan ilk mobil iletişim standardıdır. Böylece, LTE-A ve LTE'yi ayırt etmek için, ITU, LTE-A gerçek 4G olarak tanımlanmıştır. LTE-A'de sunulan temel yeni fonksiyonlar, “Carrier Aggregation, Taşıyıcı Agregasyonu” (CA), çoklu anten tekniklerinin geliştirilmiş kullanımı ve radyo erişim ağı (RAN) desteğidir.

2.2.1. Taşıyıcı agregasyonu (CA)

Kapasiteyi artırmanın en kolay yolu daha fazla bant genişliği eklemektir. R8 ve R9 cep telefonları ile geriye dönük uyumluluğun sürdürülmesi önemli olduğundan, LTE-A'deki bant genişliğindeki artış R8/R9 taşıyıcılarının agregasyonu yoluyla sağlanmıştır [18]. Her bir birleşmiş taşıyıcı bir bileşen taşıyıcı olarak adlandırılmıştır. Bileşen taşıyıcısı, 1.4, 3, 5, 10, 15 veya 20 MHz'lik bir bant genişliğine sahip olabilir ve en fazla beş bileşenli taşıyıcı birleşebilir. Daha fazla açıklama için taşıyıcı agregasyon senaryosu Şekil 2.5.'te gösterilmiştir. Dolayısıyla maksimum bant genişliği 100 MHz olabilmektedir. Birleştirilmiş taşıyıcıların sayısı, "Downlink, Aşağı-bağlantı" (DL) ve "Uplink, Yukarı-bağlantı" (UL) 'de farklı olur. Ancak UL bileşen taşıyıcılarının sayısı, DL bileşen taşıyıcılarının sayısından asla fazla olamaz. Ayrıca, her bileşen taşıyıcı farklı bant genişliklerine sahip olabilmektedir [19].



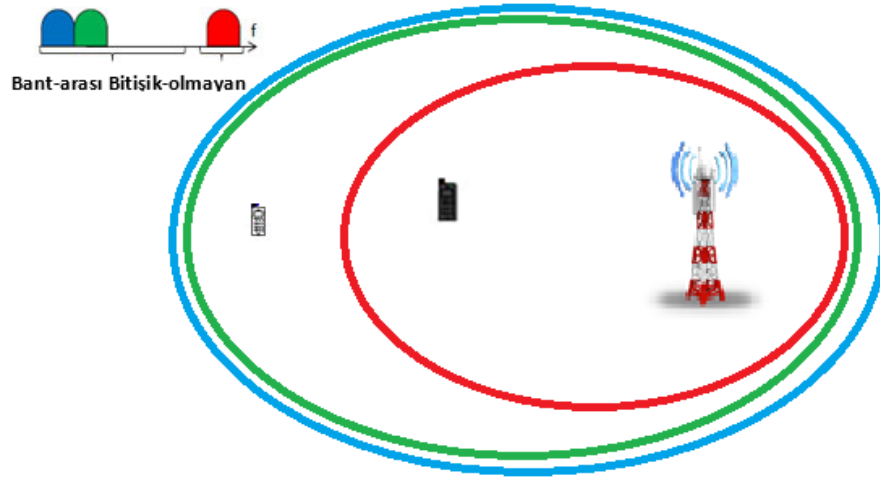
Şekil 2.5. Bant içi, bant arası bitişik olan ve olmayan taşıyıcı agregasyonu [19]

Sürümlere göre farklı taşıyıcı agregasyonları tanımlanmıştır. Sürüm 10'da (R-10'da), aşağı bağlantıda (DL) iki bileşen taşıyıcı ve yukarı bağlantıda (UL) sadece bir tane taşıyıcı (UL'te taşıyıcı agregasyonu yok) vardır. R-11'de, taşıyıcı agregasyonu kullandığında iki bileşenli taşıyıcı DL'de ve bir veya iki bileşenli taşıyıcı UL'de bulunmaktadır.

Şekil 2.6 Taşıyıcı agregasyonu bantlar-arası taşıyıcı agregasyonu kullanıldığında, her bir bileşen taşıyıcı için bir tane hizmet veren hücre vardır. Hizmet veren hücrelerin

kapsama alanı, bileşen taşıyıcı frekansları nedeniyle farklılık gösterir. “Radio Frequency Control, Radyo Kaynağı Kontrolü” (RRC) bağlantısı, “Primary Component Carrier, Birincil bileşen taşıyıcısı” (DL ve UL PCC) tarafından sunulan bir ana hizmet hücresi tarafından kontrol edilir. RRC bağlantısı bir hücre tarafından ele alınır. Birincil hizmet veren hücre, “Primary Component Carrier, Birincil Bileşen Taşıyıcısı” (DL ve UL PCC) tarafından sunulmaktadır. Diğer bileşen taşıyıcılarının hepsi “Secondary Component Carrier, İkincil Bileşen Taşıyıcı (DL ve UL SCC) olarak adlandırılıp ve ikincil hizmet veren hücrelere hizmet verir.

Şekil 2.6.'da gösterilen bantlar arası taşıyıcı agregasyonu örneğinde, üç bileşenli taşıyıcıların her birinde taşıyıcı agregasyonu sadece siyah kullanıcı (UE) için mümkündür. Beyaz kullanıcı ekipmanı kırmızı bileşen taşıyıcının kapsama alanı içinde değildir.



Şekil 2.6. Bant arası taşıyıcı agregasyon senaryosu

2.2.2. LTE kanalları ve işlevleri

Temel olarak LTE'de Mantıksal kanal (katman-3), Taşıma kanalı (katman-2) ve Fiziksel kanal (katman-1) olmak üzere üç tip kanal vardır. Bu kanallar farklı veri türlerini ayırmak ve farklı katmanlarda iletimlerini sağlamak için kullanılır. Bu kanallar, LTE protokol yığını içindeki her katmana arabirimleri ve verilerin düzenli ve tanımlanmış bir şekilde ayrılmasını sağlar. Aslında, LTE birkaç farklı tipte mantıksal,

taşıma ve fiziksel kanalları kullanır. Bu kanallar taşıdıkları bilgi türü ve bilgilerin işlenme şekli ile ayırt edilebilir. [20].

- a. Mantıksal kanallar (Ne tür bilgi?)
- b. Taşıma kanalları (Bu bilgi nasıl taşınır?)
- c. Fiziksel Kanallar (Bu bilgiyi nereye gönderecek?)

2.2.2.1. Mantıksal kanallar

Mantıksal kanallar, ne tür bilgilerin iletildiğini ve MAC katmanı tarafından sunulan veri iletim hizmetlerini tanımlar. Veri ve sinyal mesajları RLC ve MAC katmanları arasındaki mantıksal kanallar üzerine taşınır. Mantıksal kanallar ve işlevleri, Tablo 2.2.'de verilmiştir. En önemli mantıksal kanallar, “Dedicated Traffic Channel, Özel Trafik Kanalı” (DTCH) tek bir mobil cihaza veya oradan veriyi taşıyan ve sinyal mesajlarını taşıyan “Dedicated Control Channel, Özel Kontrol Kanalı” (DCCH)’tirler [21].

Tablo 2.1. Mantıksal kanalların işlevselliği

Kanal tipi	Kanal ismi	İşlevselliği
Kontrol kanalları	BCCH	Aşağı bağlantı kanalda sistem belgelerini yayınlanır
	PCCH	Aşağı bağlantı kanalında çağrı bilgilerini aktarılır
	CCCH	Ortak kontrol bilgilerini iletilir
	DCCH	Özel kontrol bilgilerini iletilir
	MCCH	Çok-noktaya bilgilerini iletilir
Trafik kanalları	DTCH	Belirli bir kullanıcı için veri iletilir
	MTCH	Birden çok kullanıcı için çok noktaya yayın verisi iletilir

2.2.2.2. Taşıma kanalları

Taşıma kanalları, verinin ne tür ve hangi özelliklerle fiziksel katmana iletildiğini tanımlar. Veri ve sinyal mesajları, MAC ve fiziksel katman arasındaki taşıma kanalları üzerinden gerçekleştirilir. Taşıma kanalları ve onların işlevleri Tablo 2.3.'te gösterilmiştir. En önemli taşıma kanalları, “Uplink Shared Channel, Yukarı-bağlantı Paylaşan Kanalları (UL-SCH) ve “Downlink Shared Channel, Aşağı-bağlantı Paylaşan Kanalları (DL-SCH)’dir.

Tablo 2.2. Taşıma kanallarının işlevselliği

Kanal tipi	Kanal ismi	İşlevselliği
DL-Taşıma kanalları	BCH	Bilgiyi BCCH'ye iletme / alma
	DL-SCH	Aşağı-bağlantı verileri ve sinyal mesajları taşınır
	PCH	Bilgiyi PCCH'ye iletme / alma
UL-Taşıma kanalları	MCH	Bilgiyi MCCH'ye iletme / alma
	UL-SCH	Yukarı bağlantı verileri ve sinyal mesajları taşınır
	RACH	Kullanıcının daha önce herhangi bir planlama yapmadan ağ ile iletişime geçebileceği özel bir kanal

2.2.2.3. Fiziksel kanallar

Tablo 2.3, fiziksel kanallar listelenmektedir. Fiziksel kanallar her iki yönde DL ve UL bulunur. Bu nedenle bunlar DL fiziksel ve UL fiziksel kanallara ayrılmışlardır. En önemli fiziksel kanallar, “Physical Downlink Shared Channel, Fiziksel Aşağı-bağlantı Paylaşan Kanal” (PDSCH) ve “Physical Uplink Shared Channel, Fiziksel Yukarı-bağlantı Paylaşan Kanal” (PUSCH) tırlar [22]. PDSCH, aşağı-bağlantı paylaşan kanaldan gelen veri ve sinyal mesajlarının yanı sıra çağrı kanalından gelen çağrı mesajları da taşımaktadır. PUSCH, yukarı-bağlantı paylaşan kanaldan veri ve sinyal mesajlarını ve bazen “Uplink Control Information, Yukarı-bağlantı Kontrol Bilgisini (UCI) taşımaktadır.

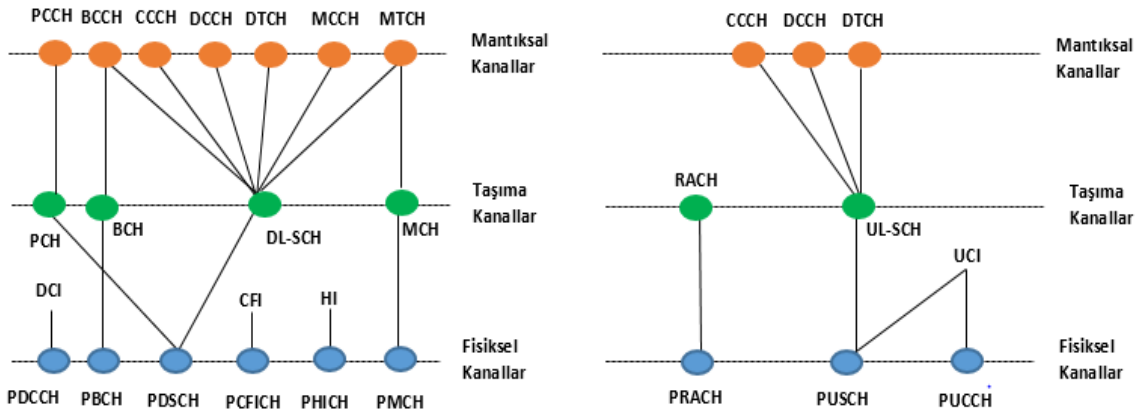
Tablo 2.3. Fiziksel kanalları ve işlevselliği

Kanal Tipi	Kanal İsmi	İşlevselliği
DL-Fiziksel Kanallar	PBCH	Sistem bilgilerini aşağı-bağlantı kanalında yayınlayan fiziksel yayın kanalı
	PDSCH	SIB bilgisi, Çağrı Bilgisi ve kullanıcı düzlemi verilerini taşır.
	PMCH	Bu kanal türü MCH taşımak ve çoğunlukla MBMS
	PCFICH	Servisleri için kullanılır.
	PDCCH	Adından da anlaşılacağı gibi PCFICH UE'ye alınan sinyalin formatı hakkında bilgi verir.
	PHICH	Belirli bir UE veya UE grubu için kontrol bilgilerini taşır. HARQ ACK / NACK sinyalini taşır.

Tablo 2.3 (Devamı)

Kanal Tipi	Kanal ismi	İşlevselliği
UL-Fiziksel Kanallar	PUSCH	UL-paylaşan kanaldan veri ve sinyal mesajlarını taşır.
	PUCCH	Çeşitli kontrol sinyalleri sağlar. Bu sinyalizasyon, Planlama talebi, DL verileri ACK / NACK ve CQI bilgisi olarak bilinir.
	RACH	RACH prosedürü adı verilen rastgele erişim prosedürü için kullanılır

Şekil 2.7.'de, sunulan her üç tip kanalın hem yukarı-bağlantı hem de aşağı-bağlantısında ki eşleşmesi gösterilmiştir. Bu kanalların eşleşmesi, verilerin katmanlar arasında ve aynı zamanda eNB ve kullanıcı ekipmanı arasında nasıl iletileceğini göstermektedir.



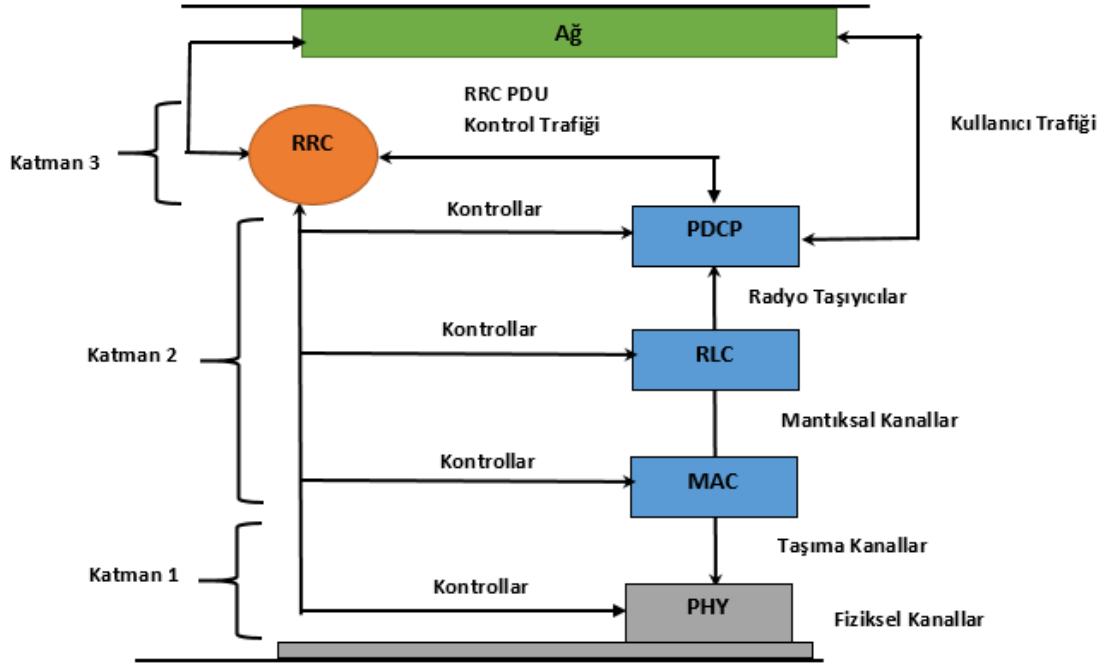
Şekil 2.7. LTE yukarı ve aşağı bağlantılar kanalların eşleşmesi [23]

Yukarı-bağlantı ve aşağı-bağlantı zamanlaması, yüksek spektrum verimliliğini elde etmek için iki önemli prosedürdür. Yukarı-bağlantı paylaşan kanal (UL-SCH), planlanan yukarı-bağlantı iletimlerini ve aşağı-bağlantı paylaşan kanal (DL-SCH), planlanan aşağı-bağlantı iletimlerini taşır [23]. Hem yukarı-bağlantı hem de aşağı-bağlantı iletimi, eNB tarafından planlanır. Her bir yukarı-bağlantı ve aşağı-bağlantı iletiminin sağlanması adına uygun kaynak ayırmak için, LTE'nin eNB'si özel kanallar üzerinden kullanıcı ekipmanının bilgileri istenecektir. Örneğin, "Channel State Information, Kanal Durumu Bilgisi" (CSI) raporlaması, UE'nin "Channel Quality Indicator, Kanal Kalite Göstergesini" (CQI) kontrol kanalları aracılığıyla eNB'ye raporlayabileceği için LTE'de önemli bir mekanizmadır. eNB, tüm kullanıcılardan CSI

raporunu aldıktan sonra, eNB her kullanıcıya uygun frekans ve kaynağı ayırır. Ayrıca, CQI parametresi, karşılık gelen aşağı-bağlantı iletimi için hangi modülasyon ve kodlama oranının kullanılması gerektiğini de önerir. LTE sistemlerinde yukarı-bağlantı ve aşağı-bağlantı zamanlama mekanizmalarını kullanarak, frekans ve kaynağı düzgün bir şekilde yönetebilir. Bununla birlikte LTE ağının yüksek kanal verimliliği de elde edilebilir. LTE trafiği merkezi kontrol tarafından planlanır. Böylece LTE ağında herhangi bir çarpışma olmayacaktır. Wi-Fi iletimi çekişmeye dayalıdır. Her iletimde önemli bir çekişme yükü oluşur. Wi-Fi ağlarında çarpışmalar da mümkündür. Böylece, kanal kullanımı perspektifinde, LTE ağları, Wi-Fi ağlarından daha verimli kanalları kullanır. Öte yandan, LTE teknolojisi, Wi-Fi teknolojisinden daha karmaşıktır. Aynı zamanda Wi-Fi ağlarına kıyasla dağıtımı da daha pahalı olacaktır. Böyle bir durumda, LTE ağı herhangi bir “birlikte-varoluş” algoritması arada bulunmadan Wi-Fi ağı ile bir arada bulunduğu Wi-Fi ağının performansını önemli ölçüde azaltacaktır. LTE eNB, LTE ağının kanal verimliliğini en üst düzeye çıkarmaya ve her zaman iletmeye çalıştığı için, Wi-Fi istasyonunun LTE şebekesinin iletilmesini durdurulana kadar iletimini tutması gerekmektedir.

2.2.3. LTE MAC katmanı

Adından da anlaşılacağı gibi, MAC katmanı, üst katmanların fiziksel (PHY) katmanı olan iletişim medyumuna erişimini kontrol etmek ve yönetmektedir. Aynı zamanda bilgileri “Radio Link Controller, Radyo Bağlantı Kontrolü” (RLC)’ya ve üst katmanlara iletmek için mantıksal kanalları ve bilgileri PHY ve alt katmanlara iletmek için taşıma kanallarını kullanır. Benzer şekilde, PHY katmanı, bilgileri MAC ve üst katmanlara iletmek için taşıma kanallarını kullanmaktadır. Son olarak, PHY katmanı, Hava ara-yüzü üzerindeki bilgileri iletmek için fiziksel kanalları kullanır [24]. Üst ve alt katmanları ile MAC katmanı yığını Şekil 2.8.’da gösterilmiştir.



Şekil 2.8. LTE MAC ile ilgili katmanlar ve kanallar [25]

MAC katmanını temel olarak, radyo kaynağı tahsis hizmeti ve veri iletim hizmetini üst katmanlara sağlamaktadır. Radyo kaynağı tahsis hizmetinin bir parçası olarak MAC katmanını, mantıksal kanalların önceliklendirilmesi, güç raporlaması, UL ve DL işlenmesi ve benzeri işlemleri gerçekleştirir. Ayrıca veri iletim hizmetinin bir parçası olarak MAC katmanını, zamanlama istekleri, arabellek durumunun raporlaması, rastgele erişim ve HARQ gibi işlemleri gerçekleştirir [25]. Ek olarak MAC katmanını, “Semi-Persistent Scheduling, Yarı-Süreklili Zamanlama” (SPS) prosedürünü ve “Discontinuous Reception, Süreksiz Alım” (DRX) prosedürünü ele almaktadır. SPS prosedürü, bir ses servisi hücre kapasitesini arttırmak için ve DRX prosedürü kullanıcılarının güç tüketimini azaltmak için kullanılır.

2.3. Wi-Fi ve LTE-LAA “birlikte-varoluş” un Geçmişi ve Özellikleri

LTE-LAA ve Wi-Fi ağları aynı kanalda uygun varoluşu, LTE-LAA'nin kabulünde belirleyici bir faktördür. Sonuç olarak, LTE-LAA'nin Wi-Fi'de neden olabileceği etkilerin neler olabileceğini ve bu iki teknolojinin 5GHz lisanssız frekans bandını verimli ve uygun bir şekilde paylaşmasını sağlamak için hangi mekanizmaların kullanılabileceğini belirlemek adına çok sayıda çalışmalar yapılmıştır.

2.3.1. 5GHz lisanssız bandında LTE-LAA ve Wi-Fi'nin “birlikte-varoluş” konusundaki sorunları ve zorlukları

LTE-LAA ve Wi-Fi'nin bir arada bulunmasının önündeki en büyük zorluk, Wi-Fi varlığında LTE-LAA aynı bandı kullandığında Wi-Fi CSMA/CA mekanizması nedeniyle sessizliğe geçtiğinden Wi-Fi sistemlerinin performansı önemli ölçüde etkilenecektir. Ama öte yandan LTE'nin performansı neredeyse değişmez denilecek kadar az değişim gösterir. Bu durum iki teknolojinin kanallara ulaşmakta kullandığı erişim prosedürlerinin birbirinden farklı olmasından kaynaklanır. LTE, bir operatörün belirli bir spektrumun özel kontrolüne sahip olduğu varsayımına dayanarak tasarlanmıştır. Veri trafiği olmadığında bile minimum zaman aralığı ile sürekli olarak iletim yapmaktadır. LTE ayrıca neredeyse sürekli bir iletim protokolüne ve ayrıca çeşitli kontrol ve referans sinyallerini iletmek için periyodik olarak iletim protokolüne sahiptir. Wi-Fi, aksine, rastgele geri çekilme ve kanal algılama yoluyla diğer teknolojilerle bir arada bulunacak şekilde tasarlanmıştır. Sonuç olarak, Wi-Fi kullanıcıları net bir kanal algılamak ve iletmek için çok az şansa sahip olacaklardır.

Teknolojiler arası koordinasyon ve karşılıklı girişim yönetiminin eksikliği, farklı kablosuz teknolojilerin etkin bir şekilde “birlikte-varoluş” sağlamalarının önündeki temel zorluklardan bazılarıdır. Çoğu geniş-bant kablosuz erişim sistemi girişim yönetimi mekanizmasına sahiptirler. Ancak bu girişim yönetimleri tasarlandıkları geniş-bant kablosuz erişim sistemi için verimli bir şekilde çalışabilmektedir [26]. Bu mekanizmalar, farklı kanal erişim mekanizmaları benimseyen, heterojen kablosuz protokollerde/standartlarda daha az etkili hale gelir. Günümüzde en çok kullanılan geniş-bant kablosuz erişim ağlarından, LTE ve Wi-Fi yalnızca birbirlerinden farklı değil, ayrıca aynı bantta çalıştığında uyumsuzlardır da.

Diğer bir zorluk, lisanssız spektrum bantları için LTE dağıtım modelidir. Birinci sınırlayıcı faktör düzenleyici kurumların lisanssız spektrum bantlarındaki etkili izotropik yayılan gücü (EIRP), LTE makro-hücrelerinde kullanılanlardan daha düşük seviyelere sınırlandırmasıdır. Ek olarak LTE, Wi-Fi'nin aynı spektrumda birlikte

çalışıp çalışmadığını ve bununla birlikte, “birlikte-varoluş” mekanizması kurup kurmayacağını belirleyebilmelidir [26].

2.3.2. LTE-LAA ve Wi-Fi “birlikte-varoluş” ile ilgili özellikler

LTE-LAA ve Wi-Fi arasındaki “birlikte-varoluş” mekanizmalarının daha iyi anlaşılması için, iki teknolojinin “birlikte-varoluş” ile ilgili özelliklerinin kısa özetleri bu bölümde gözden geçirilmiştir.

1. 5GHz’de Wi-Fi ile LTE-LAA Kullanma Motivasyonu: Mevcut mobil ağlar büyük kapasite sorunlarıyla karşı karşıya bulunmaktadır. Lisanssız spektrumda Wi-Fi ve LTE ağlarının “birlikte-varoluş”unun vaat ettiği faydalar araştırma topluluğunun ilgisini çekmeye başlamıştır [27]. Örneğin, LTE-LAA, bir Wi-Fi sistemine diğer bir Wi-Fi sistemine kıyasla daha az bitişik kanal parazitine neden olur. Öte yandan, Wi-Fi ve LTE arasında uygun bir “birlikte-varoluş” mekanizması bulunmazsa, bantta trafik yükü, spektrum kaynaklara yönelik çekişme ve tıkanıklık artacaktır. 5GHz’te LTE benimsemenin sebebi Wi-Fi’yi kaldırmak değil, 5GHz bandının spektral verimliliğini ve kapasitesini arttırmaktır. Aslında, Wi-Fi ve LTE’nin verimli bir entegrasyon için yararlanılabilecek tamamlayıcı faydalar sunacağı öngörülmüştür. Bir yandan, Wi-Fi’nin kontrolsüz doğası nedeniyle çok sayıda kullanıcılar arasındaki kaynaklar için rekabet önemli ölçüde düşük verim sağlayabilir. Bu trafiğin bir kısmını iyi yönetilen LTE ağına boşaltmak gerekli hale gelir. Öte yandan, LTE ağları arasındaki katmanlar arası parazit nedeniyle, paraziti ve tıkanıklığı azaltmak için trafiğin bir kısmı LTE ağlarından Wi-Fi bandına boşaltılabilir.
2. Lisanssız Bantla LTE Taşıyıcı Agregasyonu: Çok yüksek veri hızları elde etmek için iletim bant genişliğinde taşıyıcı sayısının artırılması gerekir. Önerilen yöntem, taşıyıcı agregasyonu (CA) olarak adlandırılmıştır. LTE-gelişmiş taşıyıcı agregasyonu kullanarak birden fazla taşıyıcı kullanmak ve bu şekilde genel iletim bant genişliğini artırmaktadır [28]. Dolayısıyla, taşıyıcı

agregasyonu,, LAA teknolojisinin hem lisanslı hem de lisanssız spektrumların birlikte kullanabilmelerini sağlamak için en önemli özelliklerden biridir.

3. LTE ve Wi-Fi MAC Protokolleri: LTE sistemi veri trafiği için fiziksel aşağı bağlantı paylaşan kanal (PDSCH) üzerine fiziksel kaynaklar tahsis eden dinamik bir kaynak zamanlayıcı içeren, merkezi bir MAC protokolünü kullanır. Zamanlayıcı, fiziksel kaynakları mobil cihazlar arasında paylaştığında trafik hacmi, servis kalitesi ve radyo kanalının durumları dikkate alınır. Öte yandan, Wi-Fi'nin MAC katmanı CSMA/CA mekanizmasına dayalıdır. Bu nedenle Wi-Fi sistemleri, LTE sistemlerinde gerektiği gibi merkezi bir kontrol cihazı gerektirmez.
4. İstikrarlı Hizmet Kalitesi (QoS): Sadece lisanssız spektruma dayanan iletimin, istikrarsız olduğu dikkate alınmalıdır. Çünkü lisanssız olma, doğası gereği garantili hizmet kalitesi (QoS) sağlamayı zorlaştırır [29]. Bu nedenle, LTE'nin lisanssız spektruma uzatılması sırasında lisanslı spektrumu kullanması da önem arz etmektedir. Kullanıcıların hem lisanslı hem de lisanssız spektrumlara erişmesini sağlamak ve birleştirilmiş bir LTE ağ altyapısı altında lisanslı ve lisanssız bantları kullanmak için, 3GPP, LT- sürüm-13'ta LTE-LAA'yı tanıtmıştı.
5. Lisanslı ve Lisanssız Bant Genişliği Kombinasyonu: Eğer ilave kapasite talebi varsa, yukarıda belirtildiği gibi farklı kapasite taşıyıcıları yönetmek için, "Primary Cell, Birincil Hücre" (Pcell) olarak görev yapan bir taşıyıcı ve "Secondary Cells, İkincil Hücreler" (Scells) olarak görev yapan başka bir taşıyıcı ile taşıyıcı agregasyonu kullanılabilir [30]. Bu durumda, ikinci taşıyıcı sadece SDL olacaktır. SDL modunda lisanssız bant veri trafiğini taşımak için kullandığında, UL ve kontrol kanalı lisanslı spektrumda kalacaktır.

2.3.3. LTE-LAA ve Wi-Fi arasındaki performans farkları

Mobil operatörler, 3GPP standardizasyonunda LTE-LAA'yı değerlendirmektedirler. Lisanssız banttaki LTE çoğunlukla “Small Cell, küçük hücreli” (SC) topolojilerde, çoğu zaman iç mekân dağıtımında operatörler, özellikle SC dağıtımını planlarken LTE-LAA ve Wi-Fi arasında seçim yapma konusunda karmaşık bir kararla karşı karşıya kalabileceklerdir. Bazı dağıtım senaryolarında ticari faktörler dikkate alındığında, LTE-LAA veya Wi-Fi “birlikte-varoluş” sorunu dikkate alınmadan 5GHz bandında tek başına kullanılmalıdır. “birlikte-varoluş” sorunu ele alınsa bile, LTE-LAA ve Wi-Fi dağıtımları da kendi özelliklerine bağlı olmalıdır. Bu iki teknoloji arasındaki performans farkını belirten bazı faktörler aşağıda verilmiştir.

2.3.3.1. Spektrum verimliliği

Aşağıdaki verilmiş faktörler LTE-LAA'nın Wi-Fi üzerinden spektral verimliliği belirler:

- a. Güçlü İletim Şemaları: Daha önce belirtildiği gibi, LTE senkronize bir sistemdir ve çekişmeli rasgele erişim yerine zamanlamaya dayalı kanal erişimini kullanır. LTE-LAA, kullanıcı kanal kalitenin geri bildirim bilgilerine dayanarak çok kullanıcıyı yayınları planlamak için merkezi MAC katmanını benimsemiştir.
- b. Etkili Girişim Yönetimi: Girişim koordinasyonu ve kaçınma mekanizmaları, yani “Enhanced Inter-Cell Interference Coordination, Gelişmiş Hücreler-arası Girişim koordinasyonu” (eICIC) ve “Coordinated Multipoint, Koordineli Çok-noktalı” (CoMP), girişimi azaltmak ve spektrum verimliliğini artırmak için LTE sistemlerinde benimsenmiştir. CoMP iletimi ve alımı, coğrafi olarak ayrılmış eNB arasında koordinasyon gerektiren çok çeşitli teknikleri ifade eder. Bu yolla, hücrelerin kenarındaki kullanıcılara verimi arttırmak için iki veya daha fazla eNB tarafından hizmet verilebilir [31] [32].

- c. HARQ ve ARQ: LTE ve Wi-Fi arasındaki yeniden iletim mekanizmalarının farklılığına gelince, LTE, Wi-Fi tarafından kullanılan onay (ACK) ile tek döngü ARQ'dan daha yüksek bir etkinliğe sahip olan MAC katmanındaki HARQ'yı kullanmaktadır [33]. ARQ için, alınan verilerde bir hata varsa (ARQ tarafından algılandığında), gönderilmiş veriyi ret edip ve göndericiden yeni bir iletim istenecektir. Öte yandan HARQ için, alınan verilerinde bir hata olduğunda, alıcı verileri tamponlanıp göndericiden sadece kayıp olan paketlerin yeniden gönderilmesi istenecektir. Bu durumda, eNB, kayıp paketin aynı kopyasını göndererek yeniden bir iletim gerçekleştirecektir. Ardından, alıcı yeniden gönderilmiş paketi orijinal versiyonuyla birleştirip hatayı çözmeye çalışacaktır. Çözme işlemi başarılıysa eNB'ye bir ACK mesajı gönderilecektir.
- d. Daha iyi Mobilite ve Kapsama Desteği: LTE-LAA kullanıcıları, birleşik bir mimaride işletilmektedir. Çünkü LTE erişim yöntemleri hem lisanslı hem de lisanssız spektrumu kullanılabilir. İlk olarak, birleşik bir mimari, aynı çekirdek ağ, aynı entegre kimlik doğrulama, yönetim ve güvenlik prosedürleri anlamına gelir. İkincisi ise, her iki spektrum tipinde girişim yönetimi daha iyi idare edilebileceğini ifade eder. Son olarak, birincil hücreler (Pcells) her zaman bir kullanıcı için her yerde kapsamı sağlayabilir.

2.3.3.2. LTE-LAA üzerinden Wi-Fi ayrıcalıkları

LTE-LAA'ya kıyasla, Wi-Fi'nin birçok avantajı vardır. Sağlam standardizasyonu ve yerleşik ekosisteminin yanında, işletmeler ve marketlerde geniş erişim noktası (AP) bulunmasıdır. Bu kurulu tabanı küçük hücreleri (SC) dağıtımını için bir prensip olarak kullanılabilir [34]. Wi-Fi erişim noktalarının (APs) mevcut olduğu yerlerde küçük hücrelerin (SCs) birlikte bulabilmesi dağıtımları hızlandırabilir. Ayrıca maliyet ve karmaşıklığı da azaltılabilir. Aksine, LTE-LAA dağıtımını için bir mobil operatör, bu

tesislere erişebilmeyi daha karmaşık bulabilir. Çünkü kurumsal ve ticari yerlerde yöneticilerin kendi Wi-Fi ağları vardır.

2.3.4. Yukarıda tartışılan özelliklerin özetlenmesi

1. Genel olarak, LTE ve Wi-Fi farklı MAC katmanlarını benimserler. Kanal erişimi ve kanal kullanım şemaları açısından, LTE sistemleri için algılama ve geri çekme prosedürleri yoktur. LTE lisanslı bantlar için tasarlanmıştır. LTE, her bir alt çerçevede hedef metriksi en üst seviyeye çıkarabilecek şekilde kullanıcıya her zaman bir kaynak birimi tahsis eden merkezi bir kontrol mimarisine sahiptir. Aksine, merkezi kontrolöre ihtiyaç duymayan bir Wi-Fi istasyonu, beklemede olan bir iletimi olduğunda ilk önce kanalı algılar. Dahası, Wi-Fi sistemleri kanalı yalnızca paketlerin iletilmesi gerektiğinde işgal edecektir.
2. Wi-Fi, LTE'nin sunduğu gibi kapsama, mobilite ve ağ verimliliğini geliştirmeye ihtiyaç duymaktadır. Ancak Wi-Fi'ye göre LTE ağı, mevcut operatör ağına iyi bir şekilde entegre edilmiştir. Böylece sağlam kimlik doğrulama, yönetim ve hizmet kalitesi (QoS) sağlar [35]. Ne yazık ki, Wi-Fi'ye yönelik büyük çaplı dönüşümün üzerindeki çeşitli kısıtlamalar nedeniyle, Wi-Fi performansında yukarıda belirtilen iyileştirme amacına ulaşmak imkânsız görünmektedir.
3. Wi-Fi, düşük maliyetli ve kolay dağıtımda yaygın şekilde kullanılmıştır. Ek olarak, LTE-LAA'nın Wi-Fi gibi piyasaya sunulması artık uzun bir yolculuk gerektirmektedir. Her iki teknolojinin kendi yararları göz önüne alındığında, Wi-Fi veya LTE-LAA seçimi ortam, finansal ve bazı diğer faktörlere bağlı olmalıdır.

2.3.5. Wi-Fi ve LTE-LAA'nın “birlikte-varoluş” mekanizmaları ve performanslarının düşürülmesi

U-LTE için önerilen farklı “birlikte-varoluş”un mekanizmaları mevcuttur. Önerilen mekanizmalardan bazıları, “Dynamic Channel Selection, Dinamik Kanal Seçimi (DCS), “Carrier Sense Adaptive Transmission, Taşıyıcı Algılama Uyarlamalı İletim

(CSAT) (LTE-U'da) ve LBT (LTE-LAA)'da bulunur. U-LTE ve Wi-Fi ortak 5GHz radyo frekans bandını paylaştığında, bu mekanizmaların RFI'yı azaltmak ve spektrum kullanım verimliliğini arttırmak için yararlı olduğu bulunmuştur. Ancak, her birinin rolü ve performansı, ağ boyutu, kullanıcı yoğunluğu, dağıtım ve radyo ortamı (iç mekân, dış mekân) ve diğer benzer parametrelerine göre değişir.

[36]'da, bu iki teknoloji bir ofis ortamında bir arada bulunduğu LTE ve Wi-Fi performansını değerlendirmek için simülasyonları yapılmıştır. Bu çalışmada Farklı dağıtım yoğunluğu kullanmıştır. Simülasyon sonuçları, LTE kanal erişim mekanizmasında herhangi bir değişiklik yapmaması durumunda, LTE ve Wi-Fi ağları arasındaki kanal paylaşımının Wi-Fi ağları için önemli ölçüde olumsuz olduğunu göstermiştir. Sistem başına 1 erişim noktası (AP) dağıtımı yaptığında LTE kullanıcılarının yalnızca marjinal performansı (temel performansın yaklaşık %4'ü) kaybettiklerini görmüşlerdir. Öte yandan, Wi-Fi kullanıcıları %70'e kadar performans kaybetmiştir. Sistem başına 5 APs kullandığında, Wi-Fi tarafından görülen kayıplar %100 civarında değer göstermiştir. [36]'da yapılan detaylı araştırmalar, LTE girişimleri/parazitleri mevcut olduğunda Wi-Fi için kanalın tıkalı/blok olduğunu ve dolayısıyla Wi-Fi kullanıcılarının çoğu zaman net bir kanal için “dinleyici” modunda kaldığını göstermiştir¹.

[37]'deki çalışma, [36]' da yapılanlara benzer gözlemlere sahiptir. Spesifik olarak, ağ yükü arttıkça LTE performansının sadece küçük bir bozulmaya maruz kaldığını, ama Wi-Fi performansının ise önemli ölçüde düştüğü tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, paylaşılan bantta artan LTE işgal oranı ile açıklanabilir. Çünkü LTE, ortak medyum erişimindeki Wi-Fi ile aynı kurallara uymamaktadır. Kanalda devam eden bir yayın varsa, Wi-Fi yayınlarını erteler. Ama LTE her zaman iletmeyi seçecek ve daha yüksek parazit düzeyleriyle başa çıkabilmek için modülasyon ve kanal kodlama şemasını uyarlayarak daha sağlam bir iletim metodu seçecektir. Böylece, LTE'nin tüm iletim fırsatlarını aldığı ve Wi-Fi cihazlarının erteleme ve geri-bas prosedürlerinde kilitlendiği bir durum ortaya çıkmıştır. Neyse ki, [37]'de elde edilen sonuçlar Wi-Fi

¹ Sonuç, Wi-Fi ve LTE'nin aynı kanalı paylaştığında, LTE'nin herhangi bir kanal erişim “birlikte-varoluş” mekanizması kullanmadığına dayalıdır.

üzerindeki bu olumsuz etkinin ciddiyetinin LTE aktivitesini kısıtlayarak etkin bir şekilde kontrol edilebileceğini göstermiştir.

[38]'deki araştırma, LTE-U varlığında Wi-Fi performansının düşme analizini test etmiştir. Sonuçlar, Wi-Fi, LTE neredeyse sürekli yayınlanmasından dolayı olumsuz olarak etkilendiğini göstermiştir. Spesifik olarak, lisanssız spektrumda LTE-U için şu anda önerilen iki işlem metodu dikkate alındığında, LTE protokolü tarafından sunulan "kapalı" süre Wi-Fi kullanıcılarının kanala erişmesi için çok kısadır. Sonuç olarak, Wi-Fi, LTE yayınları aynı kanalda olduğunda "dinle" modunda önemli miktarda zaman kaybettiği gözlemlenmiştir.

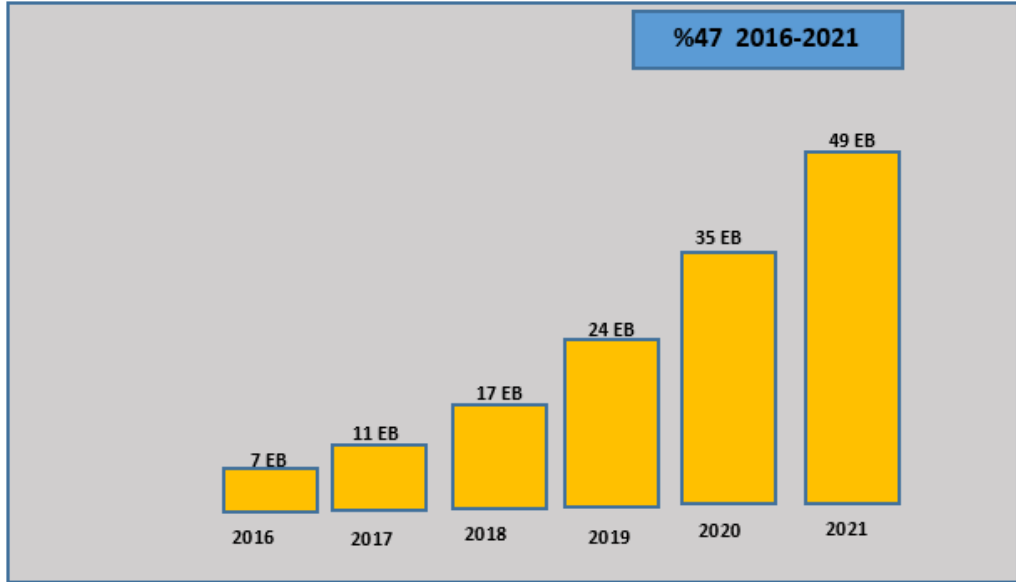
[39]'deki çalışma, 5GHz frekans bandında U-LTE (yani, LTE-U ve LTE-LAA) ve Wi-Fi "birlikte-varoluş"u sunmuştur. Sonuçlar, LTE-U'nun temel olarak iki faktörden dolayı Wi-Fi ile bir arada olumsuz sonuçlar doğurduğunu göstermiştir. Birinci faktör, LTE-U'nun "duty-cycle, görev-döngüsü" mekanizmasının Wi-Fi ekipmanı ile uyumsuzluğu ve ikinci faktör ise, senaryolarda etkin bir "birlikte-varoluş" mekanizmasının bulunmamasıdır. Ek olarak, LBT'ya dayalı LTE-LAA, tek başına Wi-Fi ile başarılı bir şekilde "birlikte-varoluş" u sağlayamamaktadır.

LAA-LTE tarafından kullanılan LBT mekanizmasının Wi-Fi ve LTE-LAA arasında uygun bir "birlikte-varoluş" ta ne kadar etkin olduğunu bilmek için simülasyon tabanlı bir çalışma [40] 'da yapılmıştır. Sonuçlara göre Avrupa düzenleyicileri tarafından öngördüğü gibi, mevcut haliyle LBT'nin kullanılması, LTE-LAA ve Wi-Fi arasındaki "birlikte-varoluş" sorununun uygun bir şekilde çözülemeyeceğidir. Wi-Fi kullanıcıları, LTE-LAA kullanıcılarına göre kanala erişim olasılıklarının daha düşük olduğu ortaya çıkmıştır. Ayrıca kullanıcı sayısı arttıkça çarpışma ve uyumsuzluk sayıları da artacaktır.

[41]'de LTE-LAA ve Wi-Fi'nin, televizyon (TV) boş uzay'ının (beyaz uzay) bandında "birlikte-varoluş" ları incelenmiştir. Simülasyon sonuçları, LTE-LAA ve Wi-Fi kullanıcılarının rastgele dağıtıldığı durumlarda, Wi-Fi veriminin LTE-LAA girişimi tarafından önemli ölçüde azaltılabildiği belirtilmiştir

BÖLÜM 3. LİSANSIZ LTE (U-LTE)' ye GENEL BAKIŞ

Küresel trafiğin 2016-2021 yılları arasında yedi kat artması beklenmektedir. Mobil veri trafiği, artan mobil cihaz sayısı ve verileri aç mobil uygulamaların patlaması nedeniyle 2016'dan 2021 yılına kadar % 47 büyüyecektir [42]. Trafikte beklenen artış Şekil 3.1.'de gösterilmiştir. Bu rakam 2021 yılına kadar 49 Exabyte² artışı gösterir. Trafikteki hızlı artış kullanıcılara verilen hizmet kalitesini (QoS) ciddi şekilde etkileyecektir. Sonuç olarak, bu sorun için uygun çözümlerden biri, hava ara-yüzünün veya "Radio Access Network, Radyo Erişim Ağının" (RAN) kapasitesini artırılması gerekmektedir. Artan hava ara-yüzünün kapasitesi daha fazla bant genişliği tahsis etmeyi gerektirir. Yani bu, daha fazla lisanslı spektruma ihtiyaç anlamına gelir. Ancak lisanslı spektrum sınırlı ve son derece pahalı olduğu için operatörler açısından büyük bir zorluktur.



Şekil 3.1. 2016 ile 2021 arasındaki küresel trafik artışı

² 1 Exabyte 1 milyar Gigabyte'ye eşittir
1 EB = 1 000 000 000 GB

Yukarıda belirtilen faktörler (sınırlı spektrum ve yüksek fiyat), hava ara-yüzünün kapasitesini arttırmak için uygun bir çözüm bulmayı gerektirir. Mobil trafiğin boşaltılması ve lisanssız bandın LTE tarafından kullanılması gibi en uygun ve verimli iki çözüm bulunmuştur.

Birincisi, mobil veri boşaltılmasıdır. Mobil veri boşaltımı, hem kullanıcılar hem de operatörler için birçok fayda ve verimlilik sağlayacaktır. Bu durum kullanıcıların geniş banda uygun fiyatla erişimi anlamına gelmektedir. Ayrıca mobil veri boşaltımı, operatörlere trafik sıklığını kontrol etmek için trafik yükünü azaltma şansı verir. Ek olarak Wi-Fi gibi teknolojiler kullanarak, ağ verimliliğini, kapsama alanını ve ağ kullanılabilirliğini artıracaktır. Yukarıda belirtilen faydaların yanında ne yazık ki, operatörlerin karşılaşacağı birçok zorluklar ve sorunlar da vardır. Altyapı koordinasyonu, ağ teknoloji türü, handoverler, ticari modeli ve önceden tanımlanmış standartların eksikliği gibi sorunlardır.

İkinci ise, LTE tarafından lisanssız bant kullanılmasıdır. Yani, LTE'nin hücrel sinyali Wi-Fi ve Radar gibi bazı diğer teknolojiler tarafından işgal edilen lisanssız spektruma kaydırılmasıdır. U-LTE 2013 yılında Qualcomm tarafından tanıtılmıştır. Şu anda U-LTE'nin en çok odaklandığı bant daha fazla kullanılabilirlik ve daha fazla sayıda kanal nedeniyle 5GHz'tir [43].

3.1. Lisanssız LTE Türleri (U-LTE)

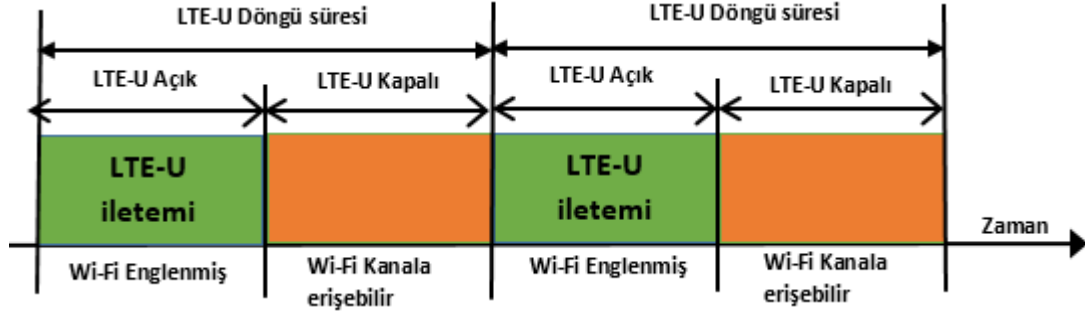
Dört tip U-LTE teknolojisi vardır. LTE-U, LTE-LAA, eLAA-LTE ve MulteFire [44]. İlk üç teknoloji LTE-U, LTE-LAA ve eLAA-LTE, lisanslı bant tabanına ihtiyaç duyarlar. Yani birincil işletim tabanları lisanslı spektrum anlamına gelir. Ancak lisanslı spektrum sınırlı ve son derece pahalı olduğundan daha fazla bant genişliği elde etmek için lisanssız spektrumun kullanılması gerekir. Dördüncüsü yani hiçbir lisanslı spektrum tabanı gerektirmeyen Multefire'dır (Qualcomm tarafından tanıtılmıştır). Multefire, iç/kapalı ve dış/açık alanlarda hizmet vermek için tasarlanmıştır. Ama çoğunlukla kapalı alanlarda, şirketler ve lisanslı bant genişliği olmayan bazı servis sağlayıcıları tarafından dağıtılmaktadır.

3.1.1. Lisansız-LTE (LTE-U)

Lisanssız bantta çalışan ve 3GPP- sürümü-10/11 ile tamamen uyumlu olan ve LTE'nin herhangi bir spesifikasyonu değiştirmeye gerek duymayan ilk teknolojidir [44]. Taşıyıcı agregasyon teknolojisini güçlendirip sadece DL iletim için lisansız bantta çalıştırılabilir. Lisansız spektrum kullanılması gelişmiş ağ kapasitesi ve kapsamı gibi olumlu etkilere yol açar. LTE çekirdek ağ lisanslı bantta kullanılmaya devam edecektir aynı zamanda küçük hücreler aracılığıyla lisanssız 5GHz bantta hizmet sunması hedeflenmiştir. Birincil odak sadece DL için lisanssız bandını kullanmasıydı [45]. LTE-U'nin Wi-Fi ile aynı kanalda çalışması için, LTE-U, iki tür “birlikte-varoluş”un mekanizmasını, “Dynamic Channel Selection, Dinamik Kanal Seçimini” (DCS) ve CSAT kullanır.

3.1.1.1. DCS ve CSAT

LTE-U forumu tarafından tanımlanan “birlikte-varoluş”un mekanizmaları DCS ve CSAT'lardır. DCS, LTE-U'nun iletişim için en net iletişim kanalını dikkate aldığını ve seçtiğini garanti eder. SDL iletim sırasında çalışma kanalının girişim enerji seviyesini gözlemleyen DCS, girişim enerji seviyesi önceden tanımlanmış eşik değerinden daha yüksek olduğunda kanalı değiştirecektir. LTE-U aynı kanalı diğer kullanıcılarla paylaştığında, CSAT, döngünün “açık” ve “kapalı” sürelerini kullanır [46]. CSAT, LTE-LAA tarafından LBT mekanizması yerine aynı bant genişliğini paylaşmak için “Time Division Multiplexing, Zaman Bölmeli Çoğullaşma” (TDM) döngüsü mekanizmasını kullanır. CSAT mekanizması Şekil 3.2.'de gösterilmiştir. CSAT bir zaman süre ya deviri (cycle) belirler, devir “açık” ve “kapalı” özelliklerine sahiptir. devir “açık” iken, LTE-U iletim için kanalı kullanmaya başlar ve Wi-Fi engellenir. Ancak devir “kapalı” olduğunda LTE-U kapanır ve Wi-Fi kanalı kullanmaya başlar.

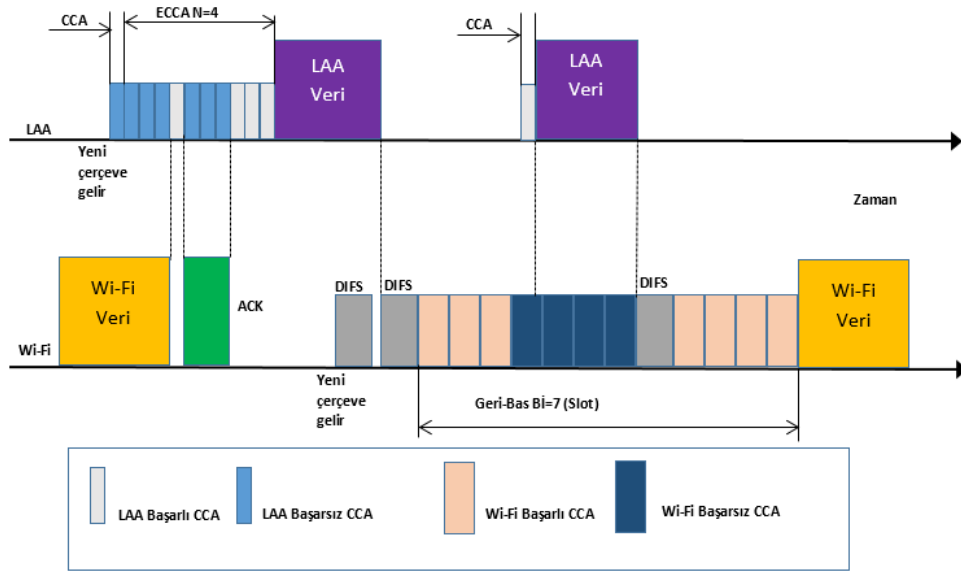


Şekil 3.2. LTE-U tarafından kullanılan görev döngüsü mekanizması

LTE tarafından lisanssız bant kullanımı, daha iyi spektrum verimliliği, yüksek veri oranı, servis güvenilirliğini sağlar. Taşıyıcı agregasyona dayalı, müşterilere daha iyi hizmet kalitesi ve güvenilirlik verebilecektir. Lisanssız bantta parazit sorunu olduğunda lisanslı bant aracılığıyla tekrar güvenilir hizmet sunulabilecektir [47]. Her iki dağıtımın temeli LTE teknolojisi olduğundan, ağ yönetimi basit olacaktır. Hem lisanslı hem de lisanssız hizmetler LTE tabanlı ağ tarafından yönetilecektir.

3.2. LTE-LAA

LAA standardı, 3GPP tarafından sürüm-13'te tanıtılmıştır [48]. LAA, mobilite, hizmet kalitesi, iç ve dış mekânlarda iyi bir kapsama sağlamak ve kullanıcı verimini orantılı olarak arttırmak için hem lisanslı hem de lisanssız taşıyıcıları bir araya getirmek için taşıyıcı agregasyon teknolojisini kullanır. Lisanslı bir taşıyıcı üzerindeki “Primary Cell, Birincil Hücre” (Pcell), iyi bir servis kalitesi (QoS), güvenilirlik ve mobilite garanti edecektir. Öte yandan lisanssız bant genişliğinde ek taşıyıcı kullanılarak yüksek veri oranı sağlanacaktır. LAA işlevselliği LTE-U'dan farklıdır. LAA, aynı bantı diğer teknolojilerle paylaşmak için LBT mekanizmasını kullanır. Ayrıca Avrupa ve Japonya gibi farklı bölgelerdeki kurallara uyularak bu teknoloji kullanılabilir. LAA, küresel bir teknolojidir. LAA dağıtımı LBT'ya dayalıdır. Öte yandan LTE-U dağıtımı, LBT mekanizmaya ihtiyaç duymamaktadır. Şekil 3.3., LAA'nın Wi-Fi ile kanal erişim mekanizmasını göstermiştir. LAA, tüm bölgelerdeki yasal gereklilikleri karşılamak için tek bir çözüm sunmayı amaçlayan küresel bir standarttır [49].



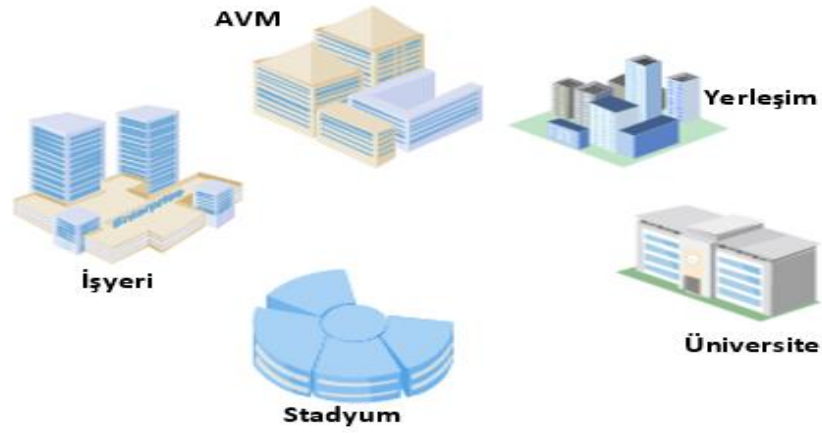
Şekil 3.3. LAA-LBT ve Wi-Fi kanalı paylaşımı

3.3. Geliştirilmiş Lisans Destekli Erişim-LTE (eLAA-LTE)

eLAA-LTE, LTE-LAA'nın evrimidir. LTE-LAA yalnızca DL için lisanssız spektrum kullanımı desteklenir. Ancak eLAA, 3GPP Sürüm-14'ün geliştirilmesi altında UP için lisanssız spektrum kullanımını genişletmiştir [50]. eLAA UP iletimi için aynı LAA'nın kullandığı temel "birlikte-varoluş" mekanizması (LBT) kullanır.

3.4. MulteFire

MulteFire sadece lisanssız bantta çalışan ve lisanslı spektruma gerek duymayan LTE tabanlı bir teknolojidir [51]. MulteFire, LTE ekosistemini, kendi lisanslı spektruma sahip olmayan kuruluşlara genişletmektedir. MulteFire ayrıca, mobil operatörlerine ağ trafiklerini boşaltmak için yeni dağıtım fırsatları sunar. MulteFire'in amacı, internete kablosuz erişim veya özellikle aşırı yoğun ortamlarda video/sesli arama yapmak için mümkün olan en iyi kullanıcı deneyimini sağlamaktır.



Şekil 3.4. MulteFire ile Küçük Hücreler Dağıtım Fırsatları

MulteFire özellikle aşırı yoğun ortamlarda küçük hücreler dağıtımları için en iyi fırsatlar yaratacaktır. MuteFire Küçük hücrelerin dağıtım fırsatları Şekil 3.4.'te gösterilmiştir. Farklı dağıtım modellerinde küçük işletmeler, şirketler, internet servis sağlayıcıları ve mobil operatörler tarafından kullanılabilir.

Tablo 3.1. U-LTE Standartlarının Özetlenmesi

Standart /Teknoloji	“Birlikte-varoluş” mekanizması	Ana özellikler	Güç	Kısıtlama
LTE-U	DCS, CSAT	Lisansız bantta SDL iletimi, hem lisanslı hem de lisanssız spektrumda çalışır	LTE hava ara-yüzü protokolünde değişikliğe gerek duymamaktadır	Bazı bölgesel düzenlemelere uyulamamaktadır lisanssız spektrumda sadece DL'yi destekler, Düzgün tasarlanmış değilse Wi-Fi için daha iyi bir dost olmayabilir.

Tablo 3.1. (Devamı)

Standart /Teknoloji	“Birlikte-varoluş” mekanizması	Ana özellikler	Güç	Kısıtlama
LTE-LAA	DCS, LBT	Lisansız bantta SDL iletimi, hem lisanslı hem de lisanssız spektrumda çalışır	Küresel kurallara riayet eden, Wİ-Fİ için iyi biri	LTE hava arayüzü protokolünü değiştirmek gerekir, sadece lisanssız spektrumda DL desteklenir
eLAA-LTE	DCS,LBT	Lisansız bantta UP ve DL iletimleri, hem lisanslı hem de lisanssız spektrumda çalışır	Lisansız bantta UP ve DL iletimleri desteklenir, Küresel kuralları riayet edilen, Wİ-Fİ için iyi biri	LTE hava arayüzü protokolünü değiştirmek gerekir
MulteFire	DCS, LBT	eLAA'nın kanal erişimi temel olarak kullanılır; sadece lisanssız spektrumda çalışır	Lisanslı bantta gerek duymaz, Lisansız bantta UP ve DL iletimleri desteklenir, Küresel kuralları riayet edilen, Wİ-Fİ için iyi biri	Ana bant lisanslı olmaması nedeniyle daha az güvenilir olabilir

3.4.1. MultiFire'in LTE'ye benzer performansı

- Gelişmiş kapasite ve alan
- Geliştirilmiş mobilite ve servis kalitesi
- Aşırı yoğun, kendi kendini organize eden dağıtımlar

3.4.2. MuteFire'in Wi-Fi'ya benzer dağıtım kolaylığı

- Sadece lisanssız spektrumda çalışır
- Bağımsız ağ mimarisi

MulteFire yaklaşık 44 üyeye sahiptir. Örneğin, Nokia, SAMSUNG, Qualcomm, HUAWEI, Intel vb. Yukarıda bahsedilen U-LTE standartlarının temel özellikleri, sağlamlığı, kısıtlamaları ve “birlikte-varoluş” mekanizmaları ile net bir görüşü, Tablo 3.1.'de özetlenmiştir.

BÖLÜM 4. 5GHZ BANT GENİŞLİĞİNDE DAĞITIM KURALLARI

Operatörler için 5GHz lisanssız spektrumun kullanılması için lisanslara ve ücretlere gerek yoktur. Ancak, girişimin önlenmesi ve bu kaynağın dürüst bir şekilde kullanılmasını sağlamak için ulusal ve uluslararası organizasyonlar tarafından çok sayıda gereklilik ve düzenlemeler uygulanmıştır [52]. U-LTE teknolojisinin, mevcut diğer tüm teknolojiler, özellikle IEEE 802.11/Wi-Fi teknoloji gibi bu kurallara uyması gerekir.

Radyo frekans (RF) spektrumu, 3KHz'den 3000GHz'e (3 THz) kadar olan elektromanyetik spektrumun bir parçasıdır [53]. Bu frekans aralığındaki radyo dalgaları modern teknolojilerde özellikle kablosuz iletişimde yaygın olarak kullanılmaktadır. Radyo spektrumu her biri bir veya birden fazla teknoloji tarafından kullanılabilen farklı parçalara veya bantlara bölünmüştür. "Radio Frequency Interference, Radyo Frekansı Paraziti" (RFI), cihazların normal çalışmasını bozabilir, bu nedenle RFI'yi kabul edilebilir seviyelerde tutmak veya sağlamak önemlidir. Bunun için radyo dalgalarının üretilmesi ve iletimi uluslararası organizasyonlar koordine edilen, örneğin "Federal Communication Commission, Federal İletişim Komisyonu" (FCC), "International Telecommunication Union, Uluslararası Telekomünikasyon Birliği" (ITU) ve "European Telecommunication Standards Institute, Avrupa Birliği Telekomünikasyon Standartları Enstitüsü" (ETSI), ulusal yasalar tarafından sıkı bir şekilde düzenlenmiştir [53]. Her ülke için RF spektrumu ulusal bir kaynaktır. Bu kaynağın kullanımını düzenleme süreci spektrum yönetimi veya tahsisi adlanmıştır. Spektrum tahsisi ülkeye ve veya düzenleyici alana göre değişir. Örneğin, ABD'de, FCC, Türkiye'de, "Information and Communication Technology Authority, Bilgi ve İletişim Teknolojileri Kurumu" (ICTA) ve Afganistan'da, "Afganistan Telecom Regulatory Authority, Afganistan Telekom

Düzenleme Kurumu” (ATRA), tüm bölgelerde radyo, televizyon, telefon, uydu ve kablo ile ulusal ve uluslararası iletişimi düzenlenir [54]. Yönetim açısından bakıldığında, radyo bantları lisanslı ve lisanssız kategorilere ayrılmıştır. Lisanslama, kablosuz operatörlerin belirli bir zaman içinde, belirli coğrafi alanlarda bir veya daha fazla bantların her birini özel olarak kullanmasıdır. Lisanslı bantları çoğunlukla bir spektrum açık artırma süreç ile operatörlere satılır. Kendi ait lisanslı bantlarında çalışan operatörler diğer kullanıcılardan RFI'yi önleyebilip ve böylece abonelerine sundukları hizmetlerin kalitesini garanti edebilirler. Ancak, telsiz telefonlar ve ana üniteler arasındaki iletişim gibi belirli kullanım durumları için lisanslama uygun görmemektedir. Bunun yerine, bu tür kablosuz teknolojiler, ITU radyo yönetmeliklerinin tanımladığı ve çoğu ülkede herhangi bir lisans ve ücret ödmeden lisanssız bantlarda çalışabilirler. Lisanssız bantlar çeşitli teknolojileri ve ürünleri, örneğin, Wi-Fi, Bluetooth ve diğer birçok düşük güç olan, kısa mesafeli iletişim teknolojileri etkinleştirir. Bu bantlar, kullanıcıların lisanslı spektrum bantlarında görülen maliyet gibi giriş engelleri olmadan çalışabilecek açık bantlardır. Günümüzde çoğu insanlar lisanssız bantları kullanan tüketici (Mikrodalga fırınlar, Wi-Fi ve Bluetooth) kullanmaktadırlar. Bu yüzden, lisanssız bantlarda RFI sorunun büyük imkân vardır. Sonuç olarak, lisanssız bantların kullanımı için izin almayı gerek olmamasına rağmen, üreticiler ve kullanıcılar diğerlerine RFI'leri en düşük seviyeye indirmek ve aynı zamanda bu bantlardaki radyo kaynağının dürüst bir paylaşımı temin etmek için çeşitli kurallara ve yönetmeliklere uymak önemli bir faktördür. IEEE 802.11/Wi-Fi lisanssız spektrumda çalışan en başarılı ve popüler bir teknolojidir. Wi-Fi üreticilerinin uyumluluk sertifikalarını Wi-Fi birlikten almaları gerekir. Wi-Fi sertifika programı ETSI ve FCC gibi radyo spektrum yönetim organizasyonları tarafından belirlenen kurallara göre tasarlanmıştır. En yaygın kullanılan iki lisanssız bantlar 2.4 ve 5GHz'dirler. Bu iki bantın çeşitli açılardan kendi avantajları ve dezavantajları vardır. 5GHz bant daha kısa mesafelerde daha hızlı veri hızları sağlar. Ota yandan 2.4 GHz bant kapsama açısından verimlidir. Ancak 2.4 GHz bant 5 GHz banda göre daha düşük veri hızı ve az kanallar sayısına sahiptir [55]. Yeni teknolojiler özellikle LTE-U, LTE-LAA, eLAA-LTE ve MulteFire gibi lisanssız LTE varyantlarının Wi-Fi ile birlikte 5GHz bandında çalışmaları hedeflenmiştir. U-LTE teknolojileri için 5GHz bandının seçimi (2.4GHz bant yerine) aşağıdaki nedenlerden kaynaklanır:

- a. Daha fazla kanal kullanılabilirliği: 2.4GHz bandında, her biri 20 MHz bant genişliği sağlayan sadece 14 kanal tanımlanmıştır. ABD'de (veya Avrupa'da), bu kanalların yalnızca 11 veya 13 kanalı yasal olarak kullanılabilir. Örtüşen nedeniyle, mümkün olan maksimum sayıda paralel bağımsız bağlantı 3 kanalla (1, 6 ve 11 kanalları) sınırlıdır. 5GHz bandında 21 örtüşen olmayan 20 MHz kanalı (veya 9 adet örtüşen olmayan 40 MHz kanal) vardır.
- b. Kalabalık değil: 2.4 GHz daha kalabalık hale geldikçe, birçok uygulamalar 5GHz bant genişliği kullanmaya başlamışlardır.
- c. Kanal kombinasyonu: Eğer 2.4 GHz iki 20MHz kanalını birleştirirse sadece bir tane 40 MHz örtüşen olmayan bir kanal olacaktır. Ama 5GHz bant 9 tane 40 MHz örtüşen olmayan kanala sahiptir.
- d. Düşük girişim riski: Mademki 2.4GHz bandı ilk ortaya çıkan, Wi-Fi ve diğer teknolojiler tarafından kullanılmış bu bant milyarlarca cihazlarıyla aşırı kalabalık hala gelmiştir. Mikrodalga fırınlar, telsiz telefonlar ve garaj kapısı açıcılar da dâhil olmak üzere 2.4GHz bandı kullanan birçok tüketici ürünü bulunmaktadır. Aksine, 5GHz bandının özel kullanım için nispeten yakın zamanda piyasaya sürülmesi, bu bandın çok daha az kalabalık olmasını ve dolayısıyla daha düşük RFI seviyesine sahip olmasını sağlamaktadır.
- e. Daha yüksek verimlilik ve veri hızı: 5GHz bandı daha geniş bir spektrumda çalıştığı için aşırı kalabalıklara maruz kalmamaktadır. Bu nedenle, 2.4GHz bandına kıyasla, 5GHz bandındaki her kanal daha iyi spektrum verimliliği ve daha yüksek veri hızları sağlar [56]. Belirtildiği gibi, lisanssız bantlarda çalışan herhangi bir teknolojinin, RFI'yi sınırlandırmak ve paylaşılan spektrumun daha büyük bir bölümünü uygunsuz bir şekilde ele geçirmemesini sağlamak için mevcut kurallara ve düzenlemelere uyması gerekmektedir. “Birlikte-varoluş”, U-LTE teknolojisinin 5GHz lisanssız bantta çalıştığında, evlerde, ofislerde ve kampüslerde günlük uygulamalar için aynı bantta dağıtılmış olan çok sayıda Wi-Fi cihazları ve ağları dikkate alındığında en önemli kaygılarından biridir.

5GHz bandını kullanan kablosuz cihazların sayısı son birkaç yılda hızla büyüdüğünden, takip eden bölüm temel gereklilikleri ve gözlenmesi gereken bazı mekanizmaları kapsayacaktır.

4.1. 5GHz Kanalları ve Frekansları

2.4GHz bant daha kalabalık hale geldikçe, birçok kullanıcı 5GHz lisanssız bant genişliğini kullanmayı tercih etmişlerdir. Bu sadece daha fazla spektrum sağlamakla kalmaz, aynı zamanda Wi-Fi ve diğer birçok cihazlar tarafından yaygın olarak kullanılmamaktadır. Bu kanalları kullanan farklı bölgelere ve ülkelere dayalı birçok kısıtlama vardır [57]. Tablo 3.1, farklı bölgelerde 5GHz kanallarının kullanımını göstermektedir.

Tablo 4.1. 5GHz Kanalları Farklı Bölgelerdeki Kurallar ve Gereksinimler [56]

Kanal numarası	³ Merkezi frekansı MHz	Avrupa (ETSI)	Kuzey Amerika (FCC)	Japonya
36	5180	İç Mekânı	İzinli	İzinli
40	5200	İç Mekânı	İzinli	İzinli
44	5220	İç Mekânı	İzinli	İzinli
48	5240	İç Mekânı	İzinli	İzinli
52	5260	İç /DFS/TPC	DFS	DFS/TPC
56	5280	İç /DFS/TPC	DFS	DFS/TPC
60	5300	İç /DFS/TPC	DFS	DFS/TPC
64	5320	İç /DFS/TPC	DFS	DFS/TPC
100	5500	DFS/TPC	DFS	DFS/TPC
104	5520	DFS/TPC	DFS	DFS/TPC
108	5540	DFS/TPC	DFS	DFS/TPC
112	5560	DFS/TPC	DFS	DFS/TPC
116	5580	DFS/TPC	DFS	DFS/TPC
120	5600	DFS/TPC	Yasak	DFS/TPC
124	5620	DFS/TPC	Yasak	DFS/TPC
128	5640	DFS/TPC	Yasak	DFS/TPC

³ Bir kanalın merkez frekansını bulmak için, kanal numarası 5 ile çarpıp ve 5000 ekleyin
Öğ. $36 \cdot 5 + 5000 = 5180 \text{MHz}$ or 5.18 GHz

Tablo 4.2. (Devamı)

Kanal numarası	Merkezi frekansı MHz	Avrupa (ETSI)	Kuzey Amerika (FCC)	Japonya
132	5660	DFS/TPC	DFS	DFS/TPC
136	5680	DFS/TPC	DFS	DFS/TPC
140	5700	DFS/TPC	DFS	DFS/TPC
149	5745	SRD	İzinli	Yasak
153	5765	SRD	İzinli	Yasak
157	5785	SRD	İzinli	Yasak
161	5805	SRD	İzinli	Yasak
165	5825	SRD	İzinli	Yasak

5 GHz kanallarının kullanılabilirliği ve kısıtlamaları, her ülkenin ulusal kanuna ve politikasına göre farklı olmaktadır. Bazı ülkelerde 5GHz'deki bazı kanalların Wi-Fi kullanımına izin verilmez, ancak bazı ülkelerde izin verilir.

4.1.1. İletim gücü

ETSI tarafından tanımlanan her bir bant, izin verilen maksimum iletim gücü seviyesine sahiptir. RF çıkış gücünün bir iletim sırasında “Efficient Isotropic-ally Radiated Power, Verimli İzotropik Radyasyon Gücü” (EIRP) olarak tanımlanmıştır [58].

4.1.1.1. Radyo yerel alan ağ (RLAN) bant-1 (5150-5350MHz)

4.1.1.1.1. Sadece iç-mekânlarda alt-bant I (5150-5250MHz)

İlk “Radio Local Area Network, Radyo Yerel Alan Ağ” (RLAN) alt-bandı 36-48 kanallarını içerir ve 23dBm'ye (200mW) bir EIRP güç sınırına sahiptir. Bu kanallar yalnızca iç mekân kullanımı için ihtisas edilmiş ve herhangi bir Dinamik Frekans Seçimi (DFS) veya “Transmission Power Control, İletim Gücü Kontrolü” (TPC) özelliklerine ihtiyaç duymamaktadır.

4.1.1.1.2. Sadece iç-mekânlarda alt-bant II (5250-5350MHz)

RLAN bant 1'in 52 ila 64 kanallı ikinci alt bandında ETSI, TPC olan cihazlar için EIRP güç limitini 23dBm (200mW) ve TPC'siz cihazlar için 20dBm (100mW) olarak ayarlamıştır. Bu bant genelde DFS desteğini gerekir. Ama Avrupa ve Japonya'da DFS ve TPC ikisini de gerekmektedir.

4.1.1.2. RLAN bant-2 (5470-5725 MHz)

100'den 140'a kadar olan kanallar ikinci RLAN bandının bir parçasıdır. DFS ve TPC desteği olan cihazlar için 30dBm (1000mW), TPC olmayan cihazlar için 27dBm'ye (500mW) ve ne TPC ne de DFS desteği olan cihazlar için 20dBm (100mW) EIRP güç sınırını belirlenmiştir.

4.1.1.3. Geniş bantlı radyo erişim ağı ya BRAN (5725-5875MHz)

ETSI, yalnızca “Broadband Wireless Access, Geniş Bant Kablosuz Erişim” (BWA) kullanımı için 155–171 kanallarını ihtisas edilmiştir. Sebebi, herhangi bir kablolu erişim ağı bulunmayan yerlere internet erişimi sağlamaktır. Maksimum EIRP çıkış gücü 36 dBm (4000mW) olarak ayarlanmıştır.

4.1.2. Kısa mesafeli cihazları (SRD)

“Short Range Devices, Kısa Mesafeli Cihazları” (SRD), kısa bir mesafede çalışacak şekilde tasarlanmış bir telsiz veya kablosuz cihaza uygulanan bir terimdir [59]. Aynı zamanda güç seviyelerinin düşük olduğu ve bu nedenle diğer cihazlara parazit olasılığının düşük olduğu anlamına gelir.

Genel olarak SRD terimi, bir watt'tan daha az güç çıkış seviyelerine sahip çeşitli kısa mesafeli verici alıcı sistemlerini ifade eder. SDR, kısa mesafelerde düşük güç iletimine ihtiyaç duyulan çok çeşitli yerlerde kullanılabilir. Kısa mesafeli cihazların kullanıldığı pek çok uygulamalar vardır. Aşağıda listelenen SDR uygulamalarından bazıları:

1. Erişim kontrolü (kapı ve kapı açıcılar dâhil)
2. Alarmlar ve hareket detektörleri
3. Kapalı devre televizyon (CCTV)
4. Kablosuz mikrofonlar dâhil kablosuz ses cihazları
5. Endüstriyel kontrol
6. Yerel alan ağları
7. Tıbbi implantlar
8. Sensörler ve Radarlar (yer tespiti radarı gibi)
9. Uzaktan kumanda
10. Radyo frekansı tanımlama (RFID)
11. Telemetry

4.1.3. Dinamik frekans seçimi (DFS)

Düzenleyici kurumlar artık Wi-Fi erişim noktalarındaki DFS gereksinimleri önemli bir faktör ifade ederler. Bu hem yeni cihazlar hem de eski cihazların güncellemeler için geçirilir [60].Wi-Fi kullanımı için açılmadan önce 5 GHz bandı havacılık ve hava durumu radarlarında kullanmıştır. Her yerde hala eski radarlar var ve Wi-Fi erişim noktaları bunlara müdahale etmemelidir. Bir erişim noktası bir radar sinyali algılandıktan sonra kanalını değiştirmelidir. Bu da genellikle müşterileriyle olan bağlantıları kesmektir. Bu mekanizma Dinamik Frekans Seçimi veya DFS olarak bilinir. Bir erişim noktası başlatıldığında, iletmeden önce en az bir dakika süreyle kanalı dinlemesi gerekir. Hava radarları 120–128 kanallarını kullanmaya devam edecektir ve bu kanallarda bekleme süresi 10 dakikadır.

Kullanım sırasında erişim noktaları radar tipi sinyalleri aramaya devam etmelidir. Ve kanalı otomatik olarak buna göre değiştirmelidir. Bir radar sinyali tespit edildikten sonra, tespit edilen radar sinyali, uçan bir helikopterden gelmiş olsa bile, erişim noktası 30 dakika boyunca kanala dönmemelidir. Yalnızca en düşük dört kanal olan 36–48 ve en yüksek tek sayılı kanallar 149–165, DFS gerekmemektedir.

Üreticiler bu kurallara uymak zorundadırlar yoksa ürünlerine hiçbir markette satmaya izin verilmezler. Bu, hem yeni hem de eski cihazlara ilgili güncellemeler için geçirmektedir.

4.1.4. İletim gücü kontrolü (TPC)

TPC iletim gücünün dinamik olarak ayarlanması, RFI'yi azaltmak için tasarlanmıştır [61]. İletim gücünün dinamik olarak ayarlanması, 5250–5350MHz ve 5470–5725MHz frekans bantlarının uydu servisleriyle paylaşılmasını kolaylaştırır. TPC, bağlantıyı sürdürmek için gereken minimum iletim gücünü belirtir. Bu frekans bantlarında TPC kullanılmazsa, izin verilen en yüksek EIRP ve karşılık gelen maksimum EIRP yoğunluğu 3 dB azalır. Bu kısıtlama, 5150–5350MHz frekans aralığı için uygulanmamaktadır.

4.2. 5GHz Bant Genişliğinde LAA için Bant Tanımı

Spektrumdaki tahsisler 5150MHz'den başlayıp bu spektrumdaki en yüksek dağılım 5825 MHz'e kadar olduğundan, 5 GHz, LAA bandı veya bantlarını 5150 - 5825 MHz frekans sınırları içinde tanımlanmıştır [62].

BÖLÜM 5. HARQ VE KANAL İZLEME MEKANİZMASINA DAYALI LTE-LAA VE Wİ-Fİ'İN BİRLİKTE VAROLUŞUMU

Kablosuz uygulamaların ve hizmetlerin evrimi ile birlikte, spektrum yetersizliği ciddi bir problem haline gelmiştir. Ne yazık ki, lisanslı spektrumun maliyeti ve kullanılabilirliği de ciddi bir sorundur. Bu nedenle, daha fazla spektrum bandına sahip bir çözüm bulmak gereklidir [63]. Bu çözümlerden biri, lisanssız spektrumu daha verimli bir şekilde diğer kablosuz teknolojilerle kullanılmasıdır. Lisansız bantlar, Wi-Fi gibi bazı kablosuz teknolojiler tarafından işgal edilmiştir. Bu bantlar ücretsiz olduğu için çekicidir. Ayrıca 5GHz bandında farklı servisler için yaklaşık 500MHz serbest spektrumu mevcuttur. Lisanssız spektrum, araştırmacıların büyük miktarda erişilebilir spektrum nedeniyle ilgisini çekmiştir. Öte yandan, bu geniş spektrum Wi-Fi ağları gibi diğer teknolojiler tarafından da kullanılmıştır. Bu nedenle, mevcut teknolojilerin performansını düşürmemek için uygun “birlikte-varoluş” mekanizmasını doğru tasarlamak önemlidir. LTE teknolojisi, yüksek verim, yoğun dağıtımda daha iyi performans ve daha fazla kapasite sağlamak için lisanssız bantlarda çalışmak üzere geliştirilmiştir [64]. Öte yandan, LTE'nin bu ücretsiz bantlarda Wi-Fi ile “birlikte-varoluş”u, LTE ve Wi-Fi MAC katmanları arasında temel bir fark olduğu için birçok zorluklar yaratır.

Wi-Fi'da MAC katmanı, çarpışma önleme mekanizmasına sahip CSMA/CA'ya dayalıdır. Böylece, istasyon kanalı algılar ve eğer serbest bulunursa iletim gerçekleşir, aksi takdirde istasyon, rastgele bir geri çekilme zamanlayıcısı seçip ve zamanlayıcı sıfıra düştüğünde iletimi başlatacaktır. LTE'deyken hiçbir algılama şeması yoktur. Sonuç olarak, LTE'nin lisanssız bantlarda Wi-Fi ile “birlikte-varoluş”u, Wi-Fi istasyon, kanalın kullanılabilirliğini kontrol ettikten sonra kendi verilerini gönderdiğinden dolayı Wi-Fi performansını ciddi şekilde düşürebilir [6]. Bu nedenle,

LTE ağından herhangi bir algılama şeması kullanmayan parazit olduğunda, Wi-Fi istasyonu herhangi bir iletim olmadan dinleyici modunda kalacaktır. Bu, LTE'yi biraetkilerken Wi-Fi'n açılığına neden olacaktır. Bu teknolojiler arasında “birlikte-varoluş”un mekanizması olmadığı zaman, 2.Bölümde de belirtildiği gibi, Wi-Fi performansının %70 ila 100'ü kadar etkilenecektir. Bu sorunun üstesinden gelmek ve kanalı adil bir şekilde paylaşmak için, lisanssız LTE üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Mekanizmalardan birisi LAA'daki LBT, LTE-LAA'nın CSMA/CA benzeri kanal erişim mekanizmasının kullanılmasıdır [4].

En iyi “birlikte-varoluş”un mekanizması hakkındaki farklı öneriler radyo erişim ağında (RAN) tartışılıp ve TR36.889 teknik raporunda ele alınmıştır. Wi-Fi'da bulunan ve diğer Wi-Fi istasyonları ile “birlikte-varoluş”u sağlayan bir özellik olan LBT'yi yoğun olarak incelemiştir. Değerlendirilen birden fazla LBT şemaları vardır. Değerlendirme sonuçlarına dayanarak 3GPP, LTE-LAA'nın Wi-Fi ile “birlikte-varoluş”unu sağlamak için Wi-Fi istasyonlarının kullandıklarına benzer bir muhafazakâr LBT mekanizması seçmiştir. LBT, LAA için “birlikte-varoluş”un mekanizması olarak benimsenmiştir. Bu sayede, bir radyo vericisinin, iletimden önce ECCA tarafından takip edilen bir CCA kontrolü uygulaması gerekir. CCA, bir kanalın işgal edilip edilmediğini veya net olup olmadığını belirlemek için belirli aralıklarla “Energy Detection, Enerji Tespiti” (ED eşığı) enerji tespitinde bulunmaktadır. Verici kanala eriştikten sonra, vericinin yalnızca iletim fırsatı (TXOP) olarak adlandırılan sınırlı bir süre boyunca iletmesine izin verilecektir.

Bu tez çalışmasında Wi-Fi kullanıcılarını STAs (istasyonlar) ve LTE-LAA kullanıcılarını Nodes olarak belirtmekteyiz. Bir ECCA'da gönderici, rastgele bir geri çekilme süresi (N) için iletim kanalını gözlemlemelidir. N seçimi rastgele bir şekilde $N = \in [1, W_{\max}]$ arasındadır. Üstsel geri çekilime dayanarak pencerenin (W) değeri farklı olacaktır. Çarpışma tespit edilirse, pencerenin (W) boyutu maksimuma (W_{\max}) yükseltilecek ve çarpışma olmaması durumunda, pencere minimuma (W_{\min}) düşürülecektir. Wi-Fi'daki çarpışmanın tespiti bir onay (ACK) çerçevesine dayalıdır ve bu durum iletim kanalında bir çarpışma olması durumunda istasyona haber verilmesini sağlamaktadır. Ama LTE-LAA'da, Node çarpışma olayını bildiren bir

onay (ACK) çerçevesi yoktur. LTE-LAA, çarpışmayı tespit etmek için HARQ geri bildirimini kullanır [7]. HARQ, iletilen çerçeveler için tek bir iletim fırsatındaki (TXOP) negatif onaylama numarasını (NACK) içerir. 3GPP'ye göre, en son iletim fırsatının (TXOP) HARQ geri bildirimlerinin %80'i negatif onay (NACK) ise, LBT'de pencerenin (W) boyutunun arttırılması önerilmiştir [8]. LTE-LAA, tek bir alt çerçevede birden fazla Nodes zamanlayabildiğinden, %80 eşiğini (Threshold) karşılaması genellikle zordur. Bir çarpışma gerçekleşse bile, bu zamanlanmış veri çerçevelerinin %80'inden daha azının çarpıştan muzdarip olacağını ve LTE-LAA, eNB'nin penceresini yükseltmeyeceğini dolayısıyla çarpışmanın çözülmeden kalacağı anlaşılmaktadır. Ayrıca, LTE tarafından sunulan zamanlama gecikmeleri nedeniyle, belirli bir alt-çerçeveyle ilişkili HARQ geri bildirimini, iletim süresinden en az 4 ms sonra alınır [9]. Bu nedenle, 3GPP, pencereyi (W) minimum gecikmeyle güncellemek için yalnızca bir iletim fırsatının (TXOP) ilk alt çerçevesi sırasında tespit edilen çarpışmaların dikkate alınması önerilmektedir. Sonuç olarak, alt-çerçevelerin geri kalanından gelen çarpışmalar göz ardı edilir.

Bu tez çalışmasında, LTE-LAA, eNB'nin pencere boyutunu ölçeklendirmesini ve Wi-Fi ile aynı kanalı paylaşırken eşit/adil (fairness) bir şekilde davranmasını sağlamak için ortak bir HARQ ve kanal izleme tabanlı çarpışma olasılığı (HC_{mbp}) mekanizmayı önermekteyiz. HARQ geri bildirimlerinin yalnızca %80'den fazla olmasını beklemek yerine, önerilen HC_{mbp} mekanizmasına göre pencerenin boyutunu arttırır/azaltır. Önerilen mekanizma ayrıca pencere boyutunun artması/azalması için de farklıdır.

5.1. HARQ ve Kanal İzleme Mekanizması

Yukarıda bahsedildiği gibi, mevcut LTE-LAA pencere (W) boyutu adaptasyon şeması (HARQ-tabanlı), birinci alt-çerçevede %80 çarpışma gereksinimini karşılayamazsa ve birinci alt-çerçeveden sonraki çarpışmaları görmezden gelirse, Wi-Fi ile “birlikte-varoluş”, kanal işgal açısından uygun bir davranış olmaz. Ayrıca, cihaz sayısı (Wi-Fi ve LTE-LAA kullanıcıları) arttığında durum daha da kötüleşecektir. Bu kısımda, ortak bir HARQ ve kanal izleme (slot izleme) tabanlı pencere (W) boyutu ölçeklendirme mekanizması önermekteyiz. Önerilen mekanizma, standart olan mekanizmaya iki

değişiklik getirecektir. Bunlardan ilki, geri-çekme penceresi (W) için HARQ tabanlı ölçeklendirmenin yerine, HARQ ve kanal izleme tabanlı çarpışma olasılığı (HC_{mbp}) getirilir. İkincisi ise, pencerenin üstsel artışı ve pencerenin boyutunun en aza geri dönüşü, HC_{mbp} 'ye göre artırılır ve azaltılır (büyütürülür ve küçültülür).

5.1.1. HARQ ve kanal izleme tabanlı çarpışma olasılığı (HC_{mbp})

Önerilen HC_{mbp} mekanizmasında, iletişim medyumunu bir CCA için boşta kaldıktan sonra, bir kanal için rekabet eden eNB, rastgele bir geri dönüş değeri N'yi seçerek ECCA prosedürüne devam edecektir. Boşta bir CCA'yı hemen takip eden zaman, izleme zaman aralıklarına/yarıklarına (α) ayrılmıştır. α süresi, boşta kalma süresi boyunca ya sabit bir yarık (δ) veya değişken bir çarpışan (meşgul) süredir. Kanal δ sırasında net algılanırken, N birer birer azalır. N sifıra ulaştığında sadece slot zamanının başında bir iletim fırsatı (TXOP) elde edilir. Ayrıca, kanalın meşgul olduğu algılanırsa, eNB, N'yi dondurur ve kanalı algılamaya devam edecektir. Kanalın CCA için tekrar boş olduğu algılanırsa, N devam ettirilir. $N \in (1, W_{max}, 1-63)$. Her bir eNB, kanal izlemeye dayalı koşullu çarpışma olasılığını HC_{mbp} 'de ölçebilir. HC_{mbp} 'nin tam olarak tahmin edilmesi için, her eNB'nin başarısız iletim sayısının (NACKs) gözlemlemesi, sayımı ve onun iletim deneme (attempt) toplam sayısına bölünmesi gerekir. Bununla birlikte, ECCA prosedürünün sırasında meşgul yarıklar (slots) da sayılırsa, HC_{mbp} için daha gerçekçi bir gözlem elde edilebilecektir. Çünkü eğer etiketli eNB, aynı meşgul slot zamanında iletilirse kanalda bir iletim çarpışmış olacaktır. HC_{mbp} şu şekilde (Denklem 5.1) güncellenmektedir:

$$HC_{mbp} = \frac{Bs + nack}{nack + N_{mbp}} \quad (5.1)$$

Yukarıda Bs izlenmiş meşgul yarık sayısı, nack HARQ'dan gelen negatif onay sayısı ve N_{mbp} toplam meşgul ve boşta kalan izlenmiş yarık sayısı ($N_{mbp} = N + Bs$) belirtmektedir.

Aşağıdaki örnekte, HC_{mbp} 'nin formülasyonu açıklanmıştır. Bir eNB'nin ECCA geri-bas değerini $N = 9$ seçtiği varsayılmıştır. Eğer etiketli eNB, N boşta kalan yarıkların (slots) izlenmesi sırasında 3 meşgul yarığ gözlemlerse ($N_{mbp} = 9 + 3 = 12$) ve en son iletim fırsatından (TXOP) elde edilen olumsuz onayların (NACKs) sayısı ikiyse (yani, $nack = 2$), HC_{mbp} , bir sonraki çekişme penceresi aşaması için şu şekilde güncellenmektedir: $\frac{3+2}{2+12} = \frac{5}{14} 0,35$.

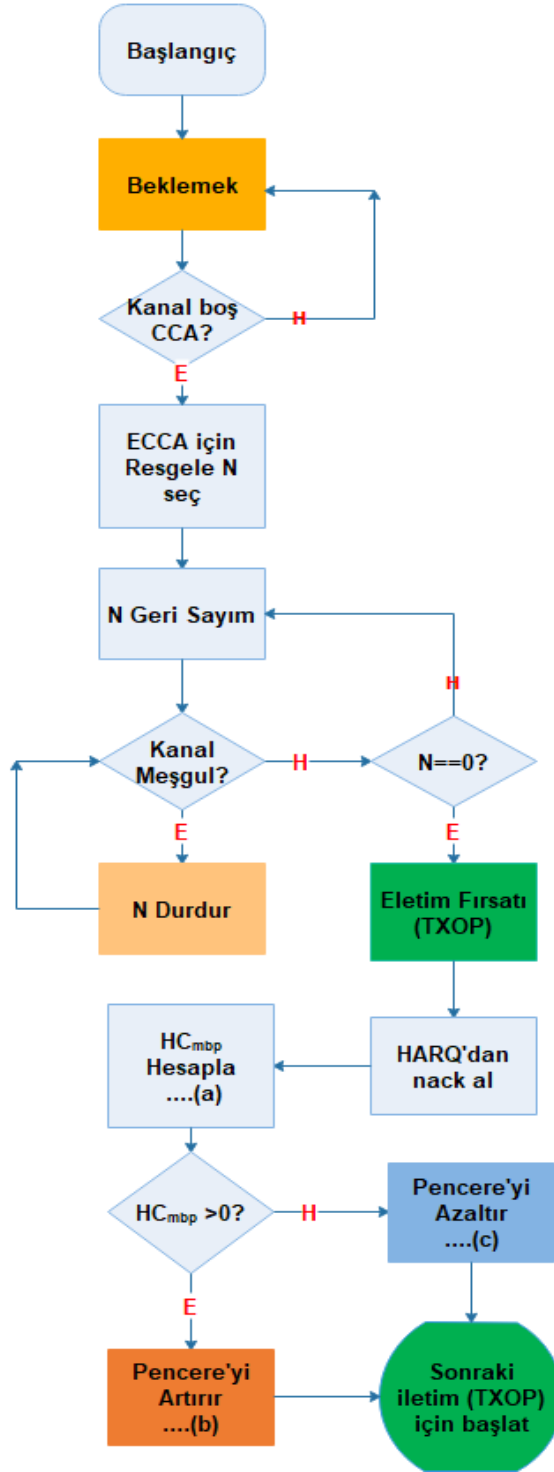
5.1.2. HARQ ve kanal izleme tabanlı ölçeklendirilmiş pencere

HARQ geri bildirimine dayalı mekanizmada, çekişme penceresinin ölçeklendirilmesi, son iletim fırsatından (TXOP) gözlenen olumsuz onaylara (NACKs) dayanır. Buradaki olumsuz bir onaylama (NACK) olduğu fikrinin, alıcı Node'un yüksek etkileşime girdiğinin göstergesi olabilecektir. Bu amaçla, önce HARQ geri bildirimine dayalı ölçeklendirme mekanizması, bir önceki kısımda formüle edilmiş olan ortak HARQ ve kanal izleme tabanlı çarpışma olasılığına (HC_{mbp}) dayalı bir yöntemle değiştirilmiştir. İlk olarak etiketli bir eNB, $HC_{mbp} > 0$ bulduğunda mevcut çekişme penceresi boyutlarını ölçeklendirebilir. Bu mekanizmada, geri bildirimde olumsuz onay (NACK) alınmasa bile, kanal izlemesi sırasında meşgul yarıklar (slots) nedeniyle çekişme penceresi ölçeklenebilir. İkincisi, LBT'deki pencerenin üstsel artıştan ve minimum değerine ayarlanan mekanizmadan farklı olarak pencerenin büyütülmesi ve küçültülmesi HC_{mbp} mekanizmasına göre çalışır. Çekişme penceresinin büyütülmesi ve küçültülmesi denklem 5.2 ve 5.3'ta verilmiştir.

$$W_c = \text{Pencere küçük ise, } \{(4 \times W_p) + 3, W_{max}\}, \text{ if } HC_{mbp} > 0 \quad (5.2)$$

$$W_c = \text{Pencere büyük ise, } \{(W_p - 3) / 4, W_{min}\}, \text{ if } HC_{mbp} = 0 \quad (5.3)$$

W_c mevcut büyütülmüş/küçültülmüş çekişme penceresi ve W_p önceki bir pencereden (W_p) olduğu durumu.



Şekil⁴ 5.1. LTE-LAA eNB için LBT mekanizması HCmbp'ye göre süreci [65]

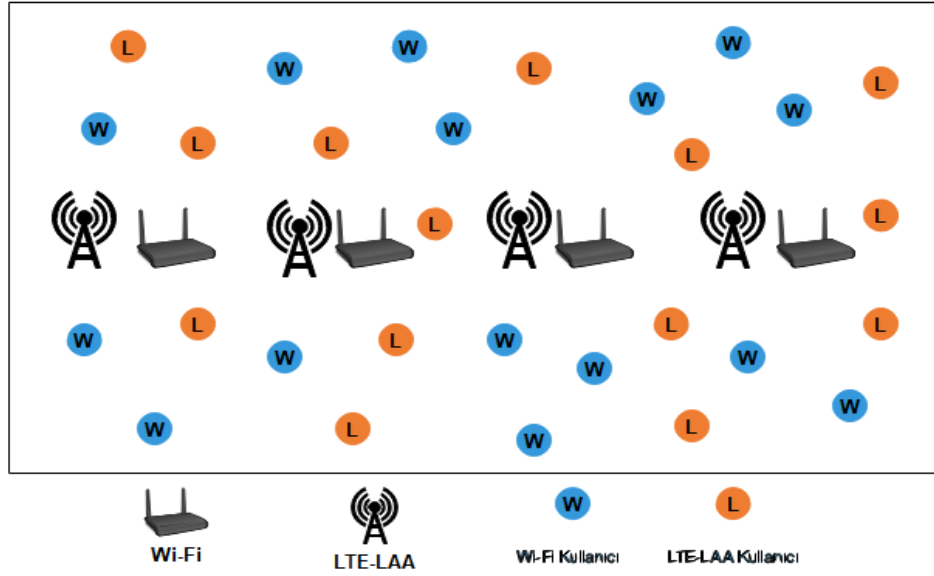
Şekil 5.1.'de, gösterdiği gibi geri-bas çekilme penceresini büyötmek ve küçölmek için HCmbp'ye göre LBT algoritma prosedürü açıklanmıştır. Kanal erişim

⁴ Şekilde 5.1'de E, Evet ve H, Hayır demektir

mekanizmasının (çekişme penceresi) ölçeklendirilmesi, lisanssız banttaki kanal için yarışan tüm cihazlara bağlı olan HC_{mbp} 'taki kanal izlemeye dayalı çarpışma olasılığına bağlı olduğundan, adil ve uygun “birlikte-varoluş”u sağlamaktadır.

5.2. Performans Değerlendirmesi

Bu kısımda, mevcut bir LTE-LAA ve Wi-Fi “birlikte-varoluş” modeline dayalı bir simülasyon [66] NS3 kullanarak, önerilen izleme (HC_{mbp}) mekanizmasının performansı değerlendirilmiştir. Özellikle, aynı 20 MHz kanalını kullanan iki hayali operatörü, operatör-A (LTE-LAA) ve operatör-B'yi (Wi-Fi) olarak belirtmekteyiz. Performansı, her iki operatörün de sistem verimi (Mbps) ve gecikme süresi (ms) olan kümülatif dağılım işlevi (CDF) olarak değerlendirmekteyiz.



Şekil 5.2. Wi-Fi ve LAA simülasyonunun birlikte-varoluşun iç mekân senaryosu

Operatörler, 3GPP tarafından LTE-LAA ve Wi-Fi “birlikte-varoluş” değerlendirilmesi için tasarlandığı ve önerildiği şekilde ağlarını iç mekân senaryosuna göre kullanırlar. Şekil 5.2.’de ise LTE-LAA ve Wi-Fi kullanıcıların düzenine genel bir bakışı sunmaktadır. İki operatör bir ortamda dört küçük hücreye dağıtılır. Her operatör için dört baz istasyonu eşit aralıklarla yerleştirilmiştir. Nodes ve istasyonlar, dikdörtgen bölgelere rastgele dağıtılmıştır. Bir yoğunluk kümesi için bir simülasyon

gerçekleştirdik. Her operatör için dört hücre, hücre başına beş Node/istasyon (hücre/operatör = 4, Kullanıcı ‘KL’ = 5, operatör = 2, toplam KL = 4 x 2 x 5 = 40) şeklinde belirttik. Tablo 5.1.’de her iki operatör için simülasyon senaryolarının detayları sunulmuştur. Mevcut senaryolar kullanıcı hareketliliğini (Mobilite) kullanmamaktadır.

Tablo 5.1. Her iki operatör için kullanılan simülasyon parametresi

Parametreler	Değerler
Senaryo	İç Mekân
Hücre / operatör sayısı	4
Kullanıcı / hücre sayısı	5
Paket varış oran λ	2,5
Trafik modeli	UDP üzerinden FTP
Frekans	5 GHz
Kanal genişliği	20 MHz
Kanal yüksek veri hızı	130 Mbps
W_{\min} (Wi-Fi/LTE-LAA)	15/15
W_{\max} (LTE-LAA/Wi-Fi)	63/1023
Enerji algılama eşiği (Wi-Fi/LTE-LAA)	-72 dBm
SIFS	16 μ s
DIFS	50 μ s
İletim fırsatı (TXOP)	8 ms
Slot süresi (Wi-Fi/LTE-LAA)	9 μ s

5.3. Wi-Fi ve LTE-LAA Parametreleri

Wi-Fi için 20 MHz 802.11n kanalı kullanılmıştır. Diğer radyo erişim teknolojilerinin (RAT) tespiti için enerji algılama tabanlı (ED), CCA -72 dBm'ye ayarlanmıştır [8]. Wi-Fi, pencereyi $W_{\min} = 15$ ve $W_{\max} = 1023$ ile güncellemek için ikili üstsel geri çekilme (BEB) mekanizması kullanır.

LTE-LAA, LBT ve HC_{mbp} protokolleri uygulanır. Tüm LBT parametreleri Aralık 2015'te 3GPP RAN genel kurulunda onaylanmıştır. İlk CCA zamanı 43 μ s ve LTE-LAA, CCA slot zamanı (δ) 9 μ s belirlenmiştir. LTE-LAA, ED eşiği -72dBm olarak , maksimum iletim fırsatı (TXOP) ise uzunluğu 8 ms olarak ayarlanmıştır. LBT için

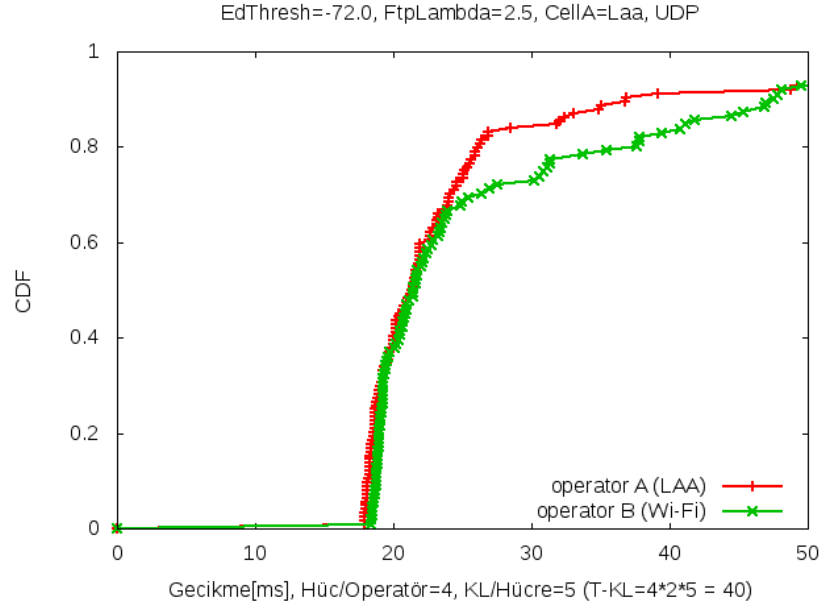
pencerenin (W) güncellenmesi, [8] 'te belirtildiği gibi, bir HARQ geri bildirimine dayalı yaklaşım izlenerek uygulanmıştır. Önerilen kanal izleme mekanizması, çarpışmayı belirtmektedir. $HC_{mbp} > 0$ ise çekişme pencereyi artırır ama eğer $HC_{mbp} = 0$ ise pencereyi azalttıracaktır. LBT için, çekişme penceresinin üst kenarı, ikili üstsel geri çekilmeye (BEB) göre {15, 31, 63} arasında değişirken, HARQ ve kanal izleme mekanizması (HC_{mbp}) için HC_{mbp} sonucuna göre {15- 63} arasında değişir.

Trafik modellere göre sunulan toplam yük, LTE-LAA ve Wi-Fi için aynıdır. Deneylerde, “File Transfer Protocol, Dosya İletim Protokolü (FTP) uygulayıp [67] 'te önerilen seçeneklerden birini, yalnızca aşağı bağlantı senaryosunda değerlendirdik. Bu model, gelen dosya transferlerini λ varış oranına göre simüle eder. λ için önerilen aralık 0,5 ila 2,5 arasındadır. Hem LTE-LAA hem de Wi-Fi'nin her zaman iletim için uygun veriye sahip olmasını sağlayan bir yük seviyesi kullanmak için $\lambda = 2.5$ ayarladık. $\lambda = 2.5$ için 244 saniyelik simülasyon süresini belirttik. Çünkü düşük trafik yoğunlukları ilginç performans farkları gösterecek kadar bağlantıyı işgal etmemektedir.

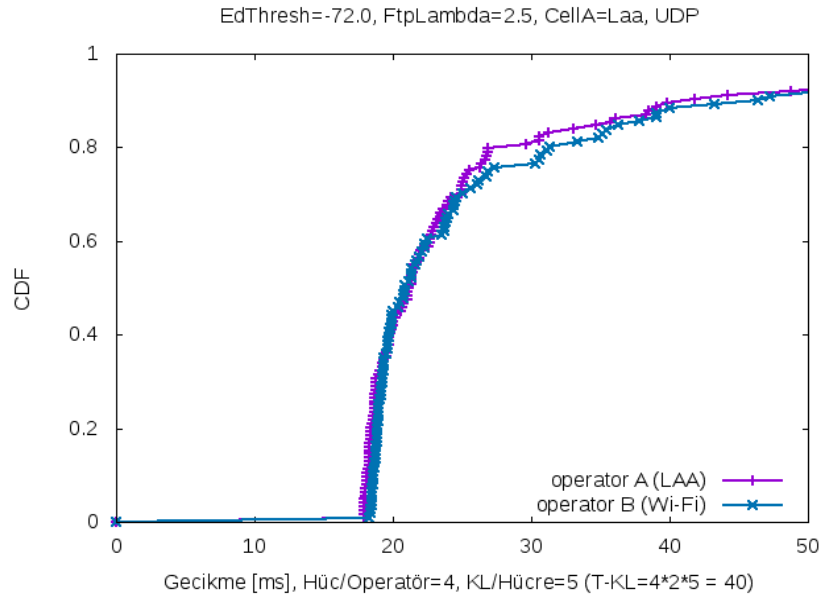
Performans ölçütleri, TR 36.889'da açıklanan ana performans ölçütleri, verim (Mbps) ve gecikme (ms) olarak belirlenmiştir [67].

5.4. Simülasyon Sonuçları

Bu kısımda ise simülasyon sonuçları incelenmiştir. Simülasyon sonuçları belli bir şekilde HARQ ve kanal izleme tabanlı çarpışma olasılığı (HC_{mbp}) mekanizmasının Wi-Fi ve LTE-LAA teknolojileri arasında yalnızca kullanılan HARQ-LBT mekanizmasından daha iyi bir şekilde “birlikte-varoluş”u sağladığını göstermektedir. HARQ-LBT mekanizması kullanıldığında Wi-Fi ve LTE-LAA teknolojileri arasındaki gecikme etkisi Şekil 5.3.'te gösterilmiştir. Sonuç, Wi-Fi kullanıcılarının gecikme ile “birlikte-varoluş” durumundan sorun yaşadıklarını göstermektedir. Diğer taraftansa Şekil 5.4.'te, HC_{mbp} mekanizmasına dayanan sonuçlar gösterilmiştir. Sonuçlar, HC_{mbp} mekanizmasının, Wi-Fi ve LTE-LAA arasındaki uygun gecikme, “birlikte-varoluş”u geliştirdiğini göstermektedir.

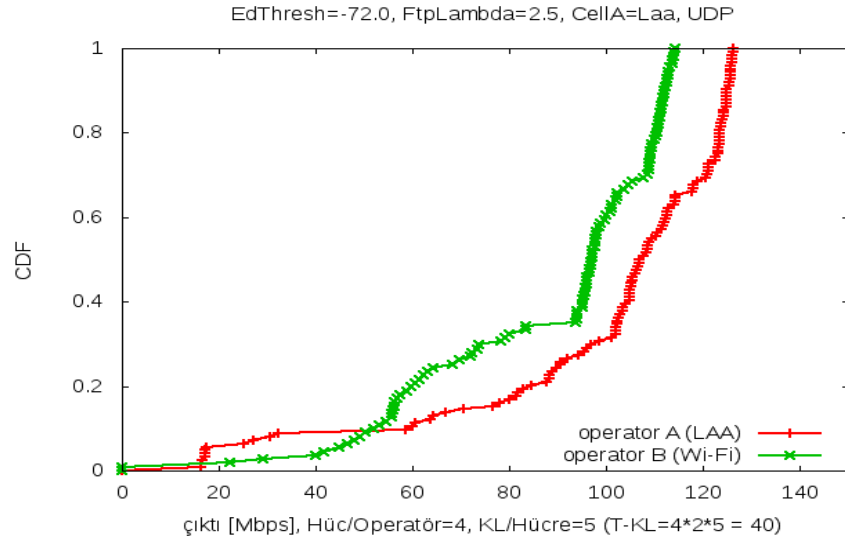


Şekil 5.3. Wi-Fi ve LAA gecikme süresi (ms) HARQ-LBT'ye dayalı performansı

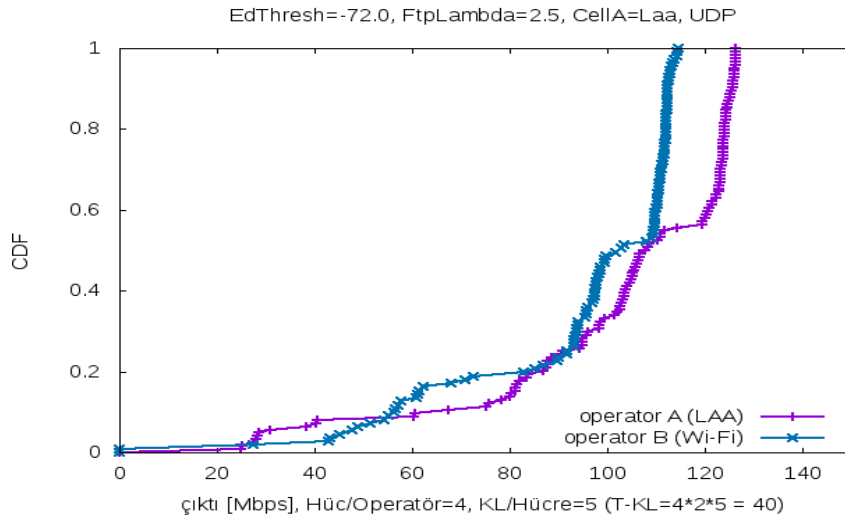


Şekil 5.4. Wi-Fi ve LTE-LAA gecikme süresi (ms) HCmbp'ye dayalı performansı

Tartışılacak olan ikinci ölçüt verimdir. Şekil 5.5.'te çekişme penceresinin büyütülmesi ve küçültülmesi için HARQ-LBT kullanıldığında Wi-Fi veriminin oldukça bozulduğu görülmektedir. Diğer taraftan, Şekil 5.6.'da gösterildiği gibi, HARQ-LBT mekanizması HC_{mbp} mekanizmasıyla değiştirildiğinde, Wi-Fi veriminin iyileştirilmesini ve Wi-Fi ve LTE-LAA teknolojilerinin arasında daha iyi bir “birlikte-varoluş” sağlayacaktır.



Şekil 5.5. Wi-Fi ve LTE-LAA veri çıkışı HARQ-LBT'ye dayalı performansı



Şekil 5.6. Wi-Fi ve LTE-LAA veri çıkışı HCmbp'ye dayalı performansı

Sonuçlara dayanarak HC_{mpb} mekanizması, aynı iletim kanalını paylaştığında Wi-Fi ve LTE-LAA teknolojileri arasında daha iyi “birlikte-varoluşum” sağlamaktadır. Yukarıda tartışılan simülasyon sonuçlarına göre, her iki teknolojinin gecikme süresi ve verimi, özellikle Wi-Fi tarafı için daha fazla belirginlik kazanmaktadır.

5.5. Sonuç ve Öneri

Küresel trafiğin 2016-2021 yılları arasında yedi kat artması beklenmektedir. Mobil veri trafiği, artan mobil cihaz sayısı ve veri açlığı olan mobil uygulamaların patlaması nedeniyle küresel trafik 2016'dan 2021 yılına kadar %47 artacaktır [42]. Hücrel operatörler tarafından kullanıcılara devamlı kaliteli servisler sürdürmenin yegâne yolu lisansız bantta LTE-LAA teknolojinin kullanılmasıdır. Lisanslı ve lisanssız bantlar arasındaki taşıyıcı agregasyona göre LTE-LAA, 5GHz lisanssız banttaki mobil kullanıcılara hücrel hizmetler sunulabilir. Diğer taraftan, LTE-LAA, Wi-Fi gibi diğer bazı teknolojiler tarafından işgal edilmiş olan 5GHz lisanssız bant genişliğinde çalıştığında, bu iki teknoloji arasında “birlikte-varoluş”un sorunu ortaya çıkacaktır. LTE-LAA ve Wi-Fi “birlikte-varoluş” performansı, kanal erişimini etkileyen faktörlere karşı oldukça hassastır (BEB ve HARQ geri bildirim). Bu tez çalışmasında, LTE-LAA ve Wi-Fi “birlikte-varoluş”undaki uygunluğu artırmak için ortak bir HARQ ve kanal izleme (HC_{mbp}) tabanlı mekanizmayı önerdik. LTE-LAA ve Wi-Fi ağları arasındaki uygunluğu artırmak için LBT erişim protokolü ve geri-bas algoritması ile ilişkili parametrelerin etkisini gösteren testler yaptık. Simülasyon sonuçları, HC_{mbp} ile çarpışma olasılığı ve ölçeklendirilmiş çekişme penceresini, LTE-LAA ve Wi-Fi “birlikte-varoluş” senaryosunda etkili olduğunu ve mevcut LBT mekanizmasına kıyasla “birlikte-varoluş” performansını artırabileceğini göstermektedir. Yani her iki operatör kullanıcılar için özellikle Wi-Fi kullanıcılar için hem gecikme süresinde hem verimde iyileştirmeyi daha fazla göstermektedir. Kullanıcıların kanala erişim bekleme süresinin azaltmasını ve verim (throughput) artırmasını belirgin bir şekilde simülasyon sonuçlarında bulunmaktadır.

Önerilen mekanizma kullanıcı hareketliliğini/mobilete desteklememektedir. Bu çalışmanın gelecekteki çalışmalarda kullanıcı hareketliliğini içermesi beklenmektedir. Değerlendirilecek diğer husus, operatörler baz istasyon (eNB ve AP) sayısını ve kullanıcı sayısını arttırmaktır.

KAYNAKLAR

- [1] <https://spectrum.ieee.org/telecom/wireless/a-surge-in-small-cell-sites.>, Erişim Tarihi: 22.08.2018.
- [2] Lopez-Benitez, Alhulayil, Coexistence Mechanisms for LTE and Wi-Fi Networks over Unlicensed Frequency Bands, IEEE, pp. 1-6, 2018.
- [3] <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-net-working-index-vni/mobile-white-paper-c11-520862.html.>, Erişim Tarihi: 05.01.2019.
- [4] http://www.3gpp.org/news-events/3gpp-news/1789-laa_update., Erişim Tarihi: 03. 12. 2018.
- [5] Qualcomm, LTE in Unlicensed Spectrum: Harmonious Coexistence with Wi-Fi, Qualcomm, San Diego, 2014.
- [6] A. Babaei, J. Andreoli-Fang ve a. B. Hamzeh, On the Impact of LTE-U on Wi-Fi Performance, IEEE, pp. 1-5, 2015.
- [7] M. a. Sauter, From GSM to LTE- Advanced Pro and 5G, West Sussex: Wiley, 2017.
- [8] 3GPP, Status report for WI: Licensed-Assisted Access to Unlicensed Spectrum, 3GPP, Spain , 2016.
- [9] P. a. S. Dahlman, 4G, LTE-Advanced Pro and the Road to 5G, London: Elsevier, 2016.
- [10] D. a. Harold, Absolute Beginner's Guide to Wi-Fi Wireless Networking, Indiana: QUE, 2004.
- [11] S. a. Rackley, Wireless Networking Technology, UK: Newnes, 2007.
- [12] K. a. H. Matyjas, Spectrum Sharing in Wireless Networks, Florida: CRC Press, 2016.
- [13] <https://www.hindawi.com/journals/misy/2016/8967281/.>, Erişim Tarihi: 03.11.2018.

- [14] W. a. Coleman, Certified Wireless Network Administrator-fourth edition, Indiana: Sybex, 2014.
- [15] K. a. H. Matyjas, Spectrum sharing in wireless networks, Florida: CRC press, 2016.
- [16] <http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/98-lte/>, Erişim Tarihi: 18.07.2018.
- [17] <http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/97-lte-advanced/>, Erişim Tarihi: 15.08.2018.
- [18] M. a. Sauter, From GSM to LTE- Advanced Pro and 5G, West Sussex: Wiley, 2017.
- [19] <http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/97-lte-advanced/>, Erişim Tarihi: 20.07.2018.
- [20] C. a. Christopher, An Introduction to LTE: LTE, LTE-Advanced, SAE, VoLTE and 4G Mobile Communications 2nd Edition, West Sussex: Wiley, 2014.
- [21] <http://www.techplayon.com/2411-2/>, Erişim Tarihi: 15.06.2018.
- [22] <https://www.radio-electronics.com/info/cellulartelecomms/lte-long-term-evolution/physical-logical-transport-channels.php>, Erişim Tarihi: 15.07.2018.
- [23] <http://www.rfwireless-world.com/Tutorials/LTE-logical-transport-physical-channels.html>, Erişim Tarihi: 11.06.2018.
- [24] C. L. P. a. J. Yi, Radio Protocols for LTE and LTE- Advanced, Singapor: Wiley, 2012.
- [25] S. a. Martin, From GSM to LTE-Advanced pro and 5G Third edition, New jersey: Wiley, 2017.
- [26] A. C. C. V. P. S. C. T. a. D. Abinader, Enabling the Coexistence of LTE and Wi-Fi in Unlicensed Bands, IEEE, cilt 52, no. 11, pp. 54-61, 2014.
- [27] K. T. L. a. F. Sadek, Extending LTE to Unlicensed Band – Merit and Coexistence, IEEE, pp. 1-6, 2015.
- [28] <https://www.radio-electronics.com/info/cellulartelecomms/lte-longterm-evolution/4g-lte-advanced-carrier-channel-aggregation.php>, Erişim Tarihi: 23.10.2018.
- [29] R. Zhang, M. Wang, L. X. Z. Z. Cai, X. Shen ve X. a. Liang-Liang, LTE-unlicensed: the future of spectrum aggregation for cellular networks, IEEE, cilt 22, no. 3, pp. 150-159, 2015.

- [30] <http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/101-carrier-aggregation-explained.>, Erişim Tarihi: 24.10.2018.
- [31] <https://www.netmanias.com/en/post/blog/6551/lte-lte-a-eicic/interference-coordination-in-lte-lte-a-2-eicic-enhanced-icic.>, Erişim Tarihi: 24.10.2018.
- [32] <https://www.radio-electronics.com/info/cellular-telecomms/lte-long-term-evolution/4g-lte-advanced-comp-coordinated-multipoint.php.>, Erişim Tarihi: 13.11.2018.
- [33] <http://www.telecomhall.com/what-is-retransmission-arq-and-harq.aspx.>, Erişim Tarihi: 15.9.2018.
- [34] M. Paolini, LTE unlicensed and Wi-Fi: moving beyond coexistence, Senza Fili, London, 2015.
- [35] <https://www.networkcomputing.com/wireless-infrastructure/lte-u-vs-wifi-debate/1619382711.>, Erişim Tarihi: 01.11.2018.
- [36] A. V. a. D. Cavalcante, Performance Evaluation of LTE and Wi-Fi Coexistence in Unlicensed Bands, IEEE, cilt 1, no. 2, pp. 1-6, 2013.
- [37] LTE-Forum, Coexistence Study for LTE-U SDL V1.0 (2015 -02), LTE-Forum, Stockholm, 2015.
- [38] B. e. al, On the Impact of LTE-U on Wi-Fi Performance, IEEE, cilt 1, no. 0, pp. 1-5, 2014.
- [39] S. K. a. S. Jian, Coexistence of Wi-Fi and LAA-LTE: Experimental evaluation, analysis and insights, IEEE, cilt 1, no. 1, pp. 1-7, 2015.
- [40] <https://vdocuments.site/download/submission-doc-ieee-80219-140082r0-november-2014-alireza-babaei-cablelabsslide.>, Erişim Tarihi: 13.08.2018.
- [41] A. A. ., C. a. V. Chaves, Enabling the coexistence of LTE and Wi-Fi in unlicensed bands, IEEE, cilt 52, no. 11, pp. 54-61, 2014.
- [42] <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/serviceprovider/visual-net-working-index-vni/mobile-white-paper-c11-520862.html.>, Erişim Tarihi: 23.07.2018.
- [43] Q.-D. T. D. L. a. T. Ho, Long term evolution in unlicensed bands, Cham, Switzerland: Springer, 2016.
- [44] C. H. L. a. R. Huang, Recent Advances of LTE/WiFi Coexistence in Unlicensed Spectrum, IEEE, cilt 32, no. 2, pp. 107-113, 2018.
- [45] <https://www.iotforall.com/unlicensed-lte-lte-u-vs-laa-vs-lwa-vs-multefire/..>, Erişim Tarihi: 24.07.2018.

- [46] R. e. al, Recent Advances of LTE/WiFi Coexistence in Unlicensed Spectrum, IEEE, cilt 32, no. 2, pp. 107-113, 2018.
- [47] <https://www.iotforall.com/unlicensed-lte-lte-u-vs-laa-vs-lwa-vs-multefire/>., Erişim Tarihi: 28.07.2018.
- [48] Qualcomm, Progress on LAA and its relationship to LTE-U and MulteFire, Qualcomm, 2016.
- [49] <https://www.qualcomm.com/documents/progress-laa-and-its-relationship-lte-u-and-multefire>., Erişim Tarihi: 23.05.2018.
- [50] R. Karaki, J.-F. Cheng, E. Obregon ve A. K. H. F. S. K. H. D. a. O. Mukherjee, Uplink Performance of Enhanced Licensed Assisted, IEEE, cilt 1, no. 17, pp. 1-6, 2017.
- [51] <https://www.multefire.org/2017/01/17/multefire-alliance-completes-release-1-0-specification/>., Erişim Tarihi: 25.07.2018.
- [52] <https://searchnetworking.techtarget.com/answer/Whats-the-difference-between-licensed-and-unlicensed-wireless>., Erişim Tarihi: 22.05.2018.
- [53] U. a. Okechukwu, Radio Frequency and Wireless Communications, https://www.researchgate.net/publication/228041875_Radio_Frequency_and_Wireless_Communications., Erişim Tarihi: 26.05.2018.
- [54] btk, Telekomünikasyon Otoriteleri, <https://www.btk.gov.tr/telekomunikasyon-otoriteleri>., Erişim Tarihi: 22.01.2019.
- [55] R. a. Steve, Wireless Networking Technology, UK: Newnes, 2007.
- [56] M. a. H. Kumar, Spectrum sharing in wireless networks, Florida: CRC Press, 2016.
- [57] <https://www.radio-electronics.com/info/wireless/wi-fi/80211-channels-number-frequencies-bandwidth.php>., Erişim Tarihi: 27.07.2018.
- [58] ETSI, Broadband Radio Access Networks (BRAN); 5 GHz high performance RLAN; http://www.etsi.org/deliver/etsi_en/301800_301899/301893/01.07.0220/en_301893v010702a.pdf., Erişim Tarihi: 05.08.2018.
- [59] ETSI, Short Range Devices, ETSI, <https://www.etsi.org/technologies-clusters/technologies/radio/short-range-devices>., Erişim Tarihi: 12.06.2018.
- [60] <https://metis.fi/en/2017/08/dfs-en/>., Erişim Tarihi: 15.06.2018.

- [61] ETSI, Broadband Radio Access Networks (BRAN), 5 GHz high performance RLAN;http://www.etsi.org/deliver/etsi_en/301800_301899/301893/01.07.02_20/en_301893v010702a.pdf., Erişim Tarihi: 11.07.2018.
- [62] 3GPP, Study on Licensed-Assisted Access to Unlicensed Spectrum; Global Initiative , 2015.
- [63] S. K. T. T. K. L. H. F. a. M. Ahmed, Extending LTE to unlicensed band - Merit and coexistence, IEEE, pp. 1-6, 2015.
- [64] <http://www.3gpp.org/release-13>., Erişim Tarihi: 22.11.2018.
- [65] L. N. e. al, Unified access in licensed and unlicensed bands in LTE-A Pro and 5G, Samsung, Texas, 2017.
- [66] <https://www.nsnam.org/>., Erişim Tarihi 05.08.2018.
- [67] 3GPP, 3GPP TR 36.889, Study on Licensed-Assisted Access to Unlicensed Spectrum, 3GPP, 2015.

ÖZGEÇMİŞ

Maqsood Sulaimani, Afganistan'ın Parwan şehrinde doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini, Afganistan'ın Mazar-e-sharif şehrinde tamamladı. Liseden 2006 yılında mezun olduktan sonra Kabul üniversitesi ICTI fakültesinin ICT bölümünde eğitimine başladı ve 2010 yılında mezun oldu. 2011 ila 2015 yılları arasında AWCC Telekom şirketinde RF mühendisi olarak çalıştı. 2016 yılında Türkiye'de Sakarya üniversitesi Bilgisayar ve Bilişim Mühendisliği bölümünde başladığı yüksek lisansa halen devam etmektedir.