

T.C.
KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

WİFİ 6 TEKNOLOJİSİNİN İNCELENMESİ VE YAPAY ZEKAYA DAYALI
YENİ BİR ZAMANLAMA ALGORİTMASI GELİŞTİRİLMESİ

İbrahim MASRİ

EYLÜL 2020

Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalında İbrahim MASRİ tarafından hazırlanan **WİFİ 6 TEKNOLOJİSİNİN İNCELENMESİ VE YAPAY ZEKAYA DAYALI YENİ BİR ZAMANLAMA ALGORİTMASI GELİŞTİRİLMESİ** adlı Yüksek Lisans Tezinin Anabilim Dalı standartlarına uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Atilla ERGÜZEN
Anabilim Dalı Başkanı

Bu tezi okuduğumu ve tezin **Yüksek Lisans Tezi** olarak bütün gereklilikleri yerine getirdiğini onaylarım.

Dr. Öğr. Üyesi Erdal ERDAL
Danışman

Jüri Üyeleri

Başkan: Doç. Dr. Atilla ERGÜZEN _____

Üye (Danışman): Dr. Öğr. Üyesi. Erdal ERDAL _____

Üye: Dr. Öğr. Üyesi. Abdül Kadir GÖRÜR _____

29/09/2020

Bu tez ile Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onaylamıştır.

Prof. Dr. Recep ÇALIN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

*Sergili Babama
ve Sergili Anneme*



ÖZET

WİFİ 6 TEKNOLOJİSİNİN İNCELENMESİ VE YAPAY ZEKAYA DAYALI YENİ BİR ZAMANLAMA ALGORİTMASI GELİŞTİRİLMESİ

MASRİ, İbrahim

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans tezi

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Erdal ERDAL

Eylül 2020, 86 Sayfa

Kablosuz mobil iletişim, son birkaç yıldır kullanıcı sayısında, veri hızı gereksinimlerinde ve kapsama alanında muazzam bir artışa tanık olmuştur. Veri hızı ve sistem verimine olan talep arttıkça, araştırmacıların ve sistem tasarımcılarının talebi makul karmaşıklık ve maliyetle karşılamak için verimli yöntemler geliştirmeleri gerekmektedir. Bu tezde, makine öğreniminde Doğrusal Regresyon (Linear Regression - LR) kullanarak Uydu-yer Bağında (Downlink - DL) kanal tahmini ve geri bildirim ek yükünü azaltmak için basit ve verimli bir yaklaşım önerilmiştir. Spesifik olarak, Yönlendiricindeki antenlerin indekslerini iki gruba ayırılmıştır. Bir regresyon modelini eğitmek için ilk olarak bazı iyi tahmin edilmiş kanal örneklerini kullanılmıştır ve burada bir sete karşılık gelen Kanal Durum Bilgisi (Channel State Information - CSI) girdi olarak kullanılırken diğeri çıktı olarak kullanılmaktadır. Çevrimiçi kanal tahmin aşamasında, yalnızca bir kümedeki antenlerin CSI'sinin tahmin edilmesi gerekmektedir ve diğerk kümedeki antenlerin

CSI'sı, tahmin edilen CSI'nın eğitilmiş regresyon modeline girilmesiyle tahmin edilebilmektedir. 802.11ax, Ortogonal Frekans Bölmesi gerekmektedir Çoklama Erişimi'yi (Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access - OFDMA) Kablosuz internet (WiFi) ile tanıştırlmaktadır. Böylelikle, kullanıcıların/kullanıcı gruplarının frekans alanında çoğullaşmasını sağlamaktadır. WiFi ağları genellikle frekans seçici bir kanal oluşturan çok yollu bir ortamda çalışmaktadır. Bu nedenle, bir kullanıcı/kullanıcı grubunun kapasitesi farklı alt taşıyıcılara göre değişmektedir. İyi bir zamanlama ve kaynak tahsisi şeması, kullanıcıları ve kullanıcı gruplarını CSI ve diğer sistem hususlarına göre alt taşıyıcılara tahsis ederek toplam oranı en üst düzeye çıkarabilmektedir. Sayısal sonuçlar, önerilen yaklaşımın hem DL pilotunun hem de Yer-uydu bağı (UL) geri bildiriminin ek yükünü önemli ölçüde azaltabildiğini ve böylece mevcut şemalara kıyasla DL elde edilebilmektedir oranını önemli ölçüde geliştirebileceğini gösterilmektedir. Sonuç tablosunda not edildiği bir sonuç olarak, ortalama toplam oran %25 ve %35 arasındadır ve bu oran kablosuz ağda daha hızlı veri derecelendirmesi almak için harika olmuştur.

Anahtar Kelimeler: Akademik programlar, algoritmalar, kablosuz ağlar, yapay zekâ, 802.11ax standart

ABSTRACT

EXAMINING WI-FI 6 TECHNOLOGY AND DEVELOPING A NEW SCHEDULING ALGORITHM BASED ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE

MASRI, IBRAHIM

Kırıkkale University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Computer Engineering, M.Sc. Thesis

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Erdal ERDAL

September 2020, 86 Pages

Wireless mobile communication has witnessed tremendous growth in the number of users, data rate requirements, and coverage over the last several years. As the demand for data rate and system throughput increases, researchers and system designers need to develop efficient methods to meet the demand at reasonable complexity and cost. In this thesis, we propose a simple and efficient approach to reduce the overhead of downlink (DL) channel estimation and feedback using Linear Regression (LR) in machine learning. Specifically, we divide the indexes of the antennas at the router into two sets. We first use some well-estimated channel samples to train a regression model, where the Channel State Information (CSI) corresponding to one set is used as input while the other is output. In the online channel estimation phase, only the CSI of the antennas in one set needs to be estimated and the CSI of the antennas in the other set can be predicted by inputting the estimated CSI into the trained regression model. 802.11ax introduces Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access (OFDMA) to wireless network (Wi-Fi). It

thus enables multiplexing users/user groups in the frequency domain. Wi-Fi networks usually operate in a multipath environment which generates a frequency selective channel. Hence, the capacity of a user/user group changes over different subcarriers. A good scheduling and resource allocation scheme can maximize the sum rate by allocating users and user groups on subcarriers based on their CSI and other system considerations. Numerical results show the proposed approach can reduce the overhead of both DL pilot and Uplink (UL) feedback considerably and thus can improve the downlink achievable rate significantly compared with the existing schemes. As a result, that we noted in the result table, the average sum rate is between 25% and 35%, that is great in the wireless network to get faster data rating.

Key Words: Academic programs, algorithms, wireless network, artificial intelligence, 802.11ax standard

TEŞEKKÜR

Tezimin hazırlanması esnasında hiçbir yardımını esirgemeyen ve büyük destek olan, bilimsel imkanlarını sonuna kadar bizlerin hizmetine sunan, tez yöneticisi değerli danışmanım, Sayın Dr. Öğr. Üyesi. Erdal ERDAL'a, tez çalışmalarım esnasında, bilimsel konularda daima yardımını gördüğüm hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Atilla ERGÜZEN'e teşekkür ederim.

Ayrıca hayatım boyunca yanımda olan ve beni her anlamda destekleyen babama, anneme ve kardeşlerime çok teşekkür ederim. Bu süreçte sabırla yanımda olan ve desteklerini esirgemeyen arkadaşım Ahmed ALDAHROUJ'a, Yaman'a ve bütün arkadaşlarıma çok teşekkür ederim. Tezin bitmesi için bana çok yardım eden arkadaşım Banu Zümray SERT'e de çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vi
ŞEKİLLERs DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
SIMGE VE KISALTMALAR DIZINI	xii
1. GİRİŞ	1
1.1. İnternetin Önemi.....	1
1.2. WiFi'nin Tarihi.....	2
1.3. Çoklu Giriş ve Çoklu Çıkış (Multiple Input and Multiple Output - MIMO) Kavramı	5
1.4. 802.11ax Kavramı	10
1.5. WiFi Zamanlama Yöntemi	12
1.6. Zamanlama ve Kaynak Tahsisi Problemi (Scheduling and Resource Allocation Problem - SRAP).....	15
1.7. LR Modeli	16
1.7.1. LR Eğitimi	17
1.8. Mevcut WiFi Zorlukları	18
1.9. Çalışmanın Amacı	23
2. LİTERATÜR İNCELENMESİ	24
2.1. Hücresel ağ Zamanlamasına göre.....	24
2.2. WiFi Zamanlamasına Göre.....	26
2.2.1. Paket Zamanlaması.....	26

2.2.2. Güç Zamanlaması	28
2.3. 802.11ax Zamanlamasına Göre	28
2.4. Makine Öğrenimi ile WiFi Zamanlamasına Göre	30
3. Temel 802.11ax Teknolojilerini Anlama	31
3.1. MU Kavramı.....	31
3.2. Alt Taşıyıcılar (Subcarriers).....	32
3.3. RU Kavramı.....	34
3.4. MU-MIMO Genel Anlamı	36
4. 802.11ax (WiFi 6) Standardı.....	39
4.1. 802.11ax'ın Önemi	40
4.2. 802.11ax Hızı Nereden Gelmiştir?	42
4.3. IEEE 802.11ax Tüpleri	43
4.3.1. Kaynak Tahsisinin Üç Boyutu.....	44
4.3.2. Esnek Düşük Güçlü Cihaz Zamanlaması	46
4.3.3. OFDMA ve Kaynak Birimi Tahsisi	47
4.3.4. 1024 QAM Kavramı.....	49
4.3.5. Mekânsal Yeniden Kullanım (Spatial Reuse - SR) ve OBSS Operasyonu.....	50
4.3.6. Aralıktaki Oran	55
4.3.7. Özet.....	55
5. Materyal ve Yöntemler	56
5.1. Veri Seti.....	56
5.2. CSI Tahminleri ve Görüşleri	57
5.2.1. Çevrimdışı Regresyon Modeli Eğitimi.....	57
5.2.2. Çevrimiçi CSI Hesaplaması	59

5.2.3. Çevrimiçi CSI Tahmini	60
5.3. MU-MIMO'nun Kullanıcı Gruplaması.....	60
5.4. 802.11ax Zamanlama Algoritması	61
5.4.1. RU'ların Soyutlanması.....	62
5.4.2. Zamanlama ve Kaynak Tahsisi	62
5.4.3. Optimizasyon Problemin Algoritması.....	64
5.5. Önerilen Algoritma.....	67
5.6. Simülasyon Sonuçları.....	69
6. SONUÇLAR.....	72
KAYNAKLAR.....	79

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1. İnsanların yaşamındaki önemli etkenler [1].....	1
Şekil 1.2. SU-MIMO	7
Şekil 1.3. MU-MIMO.....	7
Şekil 1.4. CSI MU-MIMO'da.....	8
Şekil 1.5. LR örneği	17
Şekil 2.1. LTE ve WiFi'nin bir bölgede bir arada bulunması [31].....	25
Şekil 2.2. Tek AP kablosuz ağının kuyruk modeli [23].....	26
Şekil 2.3. M-anten AP ve K tek antenli kullanıcı istasyonları ile MU-MIMO DL sistemi [39]	28
Şekil 3.1. OFDMA örneği [69]	32
Şekil 3.2. OFDM ve OFDMA alt taşıyıcıları [69]	33
Şekil 3.3. OFDMA kaynak birimleri- 20 MHz kanalı [69].....	34
Şekil 4.1. Mobil yük boşaltma trafiği eğilimi (Cisco Görsel Ağ İndeksi) [12].....	41
Şekil 4.2. OFDM (11ac MU-MIMO) [12]	45
Şekil 4.3. OFDMA (11ax MU-MIMO) [12]	45
Şekil 4.4. OBSS - Çakışan temel hizmet seti [69]	51
Şekil 4.5. BSS renklendirme [69].....	52
Şekil 5.1. SIEVE arama ağacı [7]	61
Şekil 5.2. 20MHz HE PPDU'nun RU'ları.....	62
Şekil 5.3. Bant genişliğinin geçerli bir bölümü.....	63
Şekil 5.4. Özyinelemeli zamanlama algoritmasının sözde kodu [10]	66
Şekil 5.5. Kullanıcı seçim algoritmasının sözde kodu [7].....	67
Şekil 5.6. CSI tahmin yöntemi	68
Şekil 5.7. 40MHz, 4 RUs (106).....	69

Şekil 5.8. 20MHz, 9 RUs (26).....	70
Şekil 5.9. 20MHz, 3 RUs (106, 52, 52).....	71
Şekil 6.1. Senaryo 1'in sonucu	73
Şekil 6.2. Senaryo 2'in sonucu	74
Şekil 6.3. Senaryo 3'in sonucu	75
Şekil 6.4. Senaryo 4'in sonucu	76



ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 1.1. WiFi standartları arasındaki en büyük farkları	4
Çizelge 3.1. Kaynak birimleri ve geniş kanallar	35
Çizelge 3.2. MU-OFDMA ve MU-MIMO Karşılaştırması	38
Çizelge 5.1. Geçerli bir kullanıcı zamanlaması.....	63
Çizelge 6.1. Simülasyon sonuçları	77

SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ

LR	Linear Regression
DL	Downlink
CSI	Channel State Information
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access
QoS	Quality of Service
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
LAN	Local Area Network
WLAN	Wireless LAN
TCP	Transmission Control Protocol
UDP	User Datagram Protocol
MIMO	Multiple-Input and Multiple-Output
UE	Used Equipment
BS	Base Station
MU-MIMO	Multi-user MIMO
SU-MIMO	Single-user MIMO
AP	Access Point
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
FDM	Frequency Division Multiplexing
FFT	Fast Fourier Transform
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform
TDMA	Time Division Multiple Access
CSMA	Carrier-Sense Multiple Access
FDMA	Frequency Division Multiple Access
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum
MU	Multiuser
RU	Resource Unit

STA	Station
LTE	Long-Term Evolution
IoT	Internet of Things
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
RSSI	Received Signal Strength Indication
MAC	Medium Access Control
WIPS	Wireless Intrusion Protection Switching
RTS	Request-to-Send
CTS	Clear-to-Send
PHY	Physical Layer
SRAP	Scheduling and Resource Allocation Problem
ML	Machine Learning
VoWiFi	Voice over Wi-Fi
IT	Information Technology
HD	High-Definition
CSAT	Carrier-Sensing Adaptive Transmission
UL	Uplink
OSMR	One-Sender-Multiple-Receiver
CST	Carrier Sense Threshold
NOMA	Nonorthogonal Multiple Access
SVM	Support Vector Machines
DBN	Deep Belief Network
SVR	Support Vector Regression
ICI	Intercarrier Interference
MCS	Modulation And Coding Scheme
TXOP	Transmission Opportunity
TXBF	Transmit Beamforming
HE	High Efficiency
KPI	Key Performance Indicators
QoE	Quality of Experience
AR	Augmented Reality
VR	Virtual Reality
MR	Mixed Reality

Ts	Time Symbol
GI	Guard Intervals
BSS	Basic Service Set
OBSS	Overlapping Basic Service Set
RF	Radio Frequency
CCI	Co-Channel Interference
DCF	Distributed Coordination Function
EDCA	Enhanced Distributed Channel Access
MU-PPDU	Multuser Physical layer Protocol Data Unit
RB	Resource Block
TWT	Target Wake Time
PS	Power Save
SS	Spatial Stream
ACK	Acknowledgment
MRC	Maximum Ratio Combining
SR	Spatial Reuse
CSMA/CA	Carrier Sense with Multiple Access Collision Avoidance
SD	Signal Detect
dB	Decibel
CCA	Clear Channel Assessment
CS	Carrier Sens
PD	Packet Detection
CSIT	Channel State Information at the Transmitter
ZFBF	Zero-Forcing Beamforming
SRA	Schedule and Resource Allocation
SISO	Single Input Single Output
NLOS	Non-Line-Of-Sight

1. GİRİŞ

1.1. İnternetin Önemi

“Direct Line” tarafından “Opinium Research online” tarafından yapılan bir ankete göre İnternet, onsuz yaşayamayacağımız bir şey haline gelmiştir. Bazı insanlardan onsuz yaşayamayacakları şeyleri düzenlemeleri istendiğinde, bunlardan bazıları aile, yemek, TV, arabalar ve daha fazlasıydı. Elbette WiFi bunlardan biriydi. Sonuç şekil 1.1'de gösterildiği gibi, internetin artık yemekten veya aileden daha önemli olduğunu görülmektedir, günümüzde artık kural "WiFi yok, etkinlikler yok" [1,2].



Şekil 1.1. İnsanların yaşamındaki önemli etkenler [1]

İnterneti akıllı telefonlar (cep telefonları), tabletler veya dizüstü bilgisayarlar gibi taşınabilir cihazlarda kullanılmıştır. Bizim için daha rahat hale getirmek için Ethernet gibi kablolu bağlantıları kullanmak yerine WiFi kullanılmıştır. Aslında internete bağlı ismi yönlendirici (Router) olan bir cihazla bağlantı kurulmaktadır.

WiFi, normal olarak 2,4 GHz ve 5 GHz olmak üzere belirli frekanslarda veri iletmek için radyo dalgalarını kullanılmıştır. Kablosuz cihazların üzerinde çalışabileceği ‘frekans aralığı’ adı verilen bir dizi kanal, yükün yayılmasına yardımcı olur ve böylece her cihaz sinyallerini kalabalık ağlarda görmemektedir veya diğer trafik tarafından kesintiye uğratılmamaktadır [3].

WiFi, üniversitelerde, evlerde, stadyumlarda, metrolarda, toplantılar yaparken ve daha birçok yerde hayatımızın her yerinde olmuştur. Daha önce bahsettiğimiz gibi, yönlendiriciye bağlanarak internete bağlanılabilmektedir [4]. Böylece, yönlendiricinin hızlı çalışmasını sağlamak, verimliliğini ve Hizmet kalitesini (Quality of Service - QoS) iyileştirmek için iyi bir zamanlama algoritmasına ihtiyaç duyulmaktadır [5].

1.2. WiFi'nin Tarihi

Yirminci yüzyılda, kablosuz teknolojilerdeki gelişmeler iletişim uydularına, cep telefonlarına ve mobil verilere yansımıştır. Günümüzde artık her türlü bilgi dünyanın hemen her köşesine gönderilebilmektedir. Son zamanlarda WiFi, hücresel teknoloji, mobil uygulamalar ve Nesnelerin İnterneti (Internet of Things - IoT) üzerinde ilgi yoğunlaşmıştır.

1997 yılında Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü (Institute of Electrical and Electronics Engineers - IEEE) ilk Kablosuz Yerel alan ağı (Wireless Local Area Network - WLAN) standardını oluşturdu. 802.11 adı verilmiştir. Ne yazık ki 802.11, çoğu uygulama için çok yavaş olan 2 Mbps'lik maksimum ağ bant genişliğini desteklemektedir. Bu nedenle tarih boyunca farklı sürümler kablosuz ağları ortaya çıkmıştır ve bunlar için farklı teknolojiler kullanılmıştır.

Geçmişten günümüze ana hatları verilen en son kabul edilen teknolojilere kısa bir genel bakış sağlanacaktır [3]:

- WiFi 1: 1999'da piyasaya sürülen 802.11b'dir ve 11 Mbps'ye kadar teorik hızı desteklemektedir. Daha gerçekçi bir 5,9 Mbps İletim Kontrol Protokolü (Transmission Control Protocol - TCP) ve 7.1 Mbps kullanıcı Datagram Protokolü (User Datagram Protocol - UDP) bant genişliği beklenmesi gerekmektedir. 802.11b, orijinal 802.11 standartlarıyla aynı düzensiz radyo sinyali frekansını (2,4 GHz) kullanmaktadır. Bu nedenle mikrodalga fırınlar, kablosuz telefonlar ve aynı 2,4 GHz aralığını kullanan diğer cihazlarla çatışmaya neden olabilmektedir.
- WiFi 2: 1999'da piyasaya sürülen 802.11a, 54 Mbps'ye kadar bant genişliğini ve 5 GHz civarında düzenlenen bir frekans spektrumundaki sinyalleri desteklemektedir. Daha yüksek frekans, 802.11a sinyallerinin duvarları ve diğer engelleri geçmesinin daha zor olduğu anlamına gelmektedir.
- WiFi 3: 2003 yılında piyasaya sürülen 802.11g'dir. 802.11g, 802.11a ve 802.11b'nin en iyi özelliklerini birleştirmeye çalışmaktadır. 802.11g, 54 Mbps'ye kadar bant genişliğini desteklemektedir ve daha fazla aralık için 2,4 GHz frekansı kullanılmaktadır. Günümüzde kullanılan tüm kablosuz cihazlar ve ağ ekipmanları tarafından desteklenen en ucuz seçenek olmaktadır.
- WiFi 5: 2014'te piyasaya sürülen 802.11ac'dir. 802.11ac, hem 2,4 GHz hem de 5 GHz WiFi bantlarında eşzamanlı bağlantıları destekleyen çift bantlı kablosuz teknolojiyi kullanmaktadır. 802.11ac, 5 GHz bandında 1300 Mbps'ye ve 2.4 GHz bandında 450 Mbps'ye kadar bant genişliği sunmaktadır. Çoğu evlerin kablosuz yönlendiricisi bu standarda uygun bulunmuştur. 802.11ac, en yüksek maksimum hız ve en iyi sinyal aralığıdır, ancak uygulaması en pahalı olanıdır; performans iyileştirmeleri yalnızca yüksek bant genişliğine sahip uygulamalarda fark edilmektedir.

- 802.11ad: Aralık 2012'de onaylanan 802.11ad, bu standart son derece hızlıdır. Ancak, istemci cihaz Erişim Noktasından (Access Point - AP) 3 metre uzakta olması gerekmektedir.
- 802.11ah: 802.11ah, Mayıs 2017'de onaylanmıştır. Bu standart, daha düşük enerji tüketimini hedeflemektedir ve tipik 2,4 GHz veya 5 GHz ağların erişiminin ötesine geçebilen genişletilmiş WiFi ağları oluşturmaktadır.
- 802.11aj: 802.11aj, bu standart Çin'de geçerlidir ve temelde 802.11ad'nin dünyanın belirli bölgelerinde kullanılmak üzere yeniden markalanmasıdır. Amaç, 802.11ad ile geriye dönük uyumluluğun sürdürülmesidir.
- WiFi 6: WiFi 6, 802.11ax olarak da bilinen yeni bir sürümdür. 2019'da standardize edilmiştir. Yaklaşık yüzde 30'luk bir hız artışı ve gecikme de önemli ölçüde azaltılacaktır. En önemlisi de aynı anda her cihaza daha fazla veri sunabilmesidir. Sergiler, basın toplantıları, stadyumlar ve benzeri pek çok cihazın olduğu yerlerde verimli bir şekilde kullanılabilir. Gelecekte veri ve cihazların artması nedeniyle daha güçlü ağlara ihtiyaç duyulması beklenmektedir.

Çizelge 1.1'de gösterilen WiFi standartları arasındaki en büyük farktır. Diğer teknolojiler 802.11ax, 802.11ay ve 802.11az hala araştırma süresindedir [3].

Çizelge 1.1. WiFi standartları arasındaki en büyük farkları

Standart	Yıl	Veri Hızı	Frekans Bandı	Kanal Bant Genişliği	Modülasyon Sinyali Kodlama	Spektrum protokolü	Anten Yapılan dırması
802.11a	1999	54 Mbps	5 GHz	20 MHz	64 QAM	OFDM	1X1 SISO
802.11b	1999	11 Mbps	2.4 GHz	20 MHz	11 CCK	DSSS	1X1 SISO
802.11g	2003	54 Mbps	2.4 GHz	20 MHz	64 QAM	DSSS, OFDM	1X1 SISO
802.11n	2009	65 Mbps to 600	2.4 or 5 GHz	20,40 MHz	64 QAM	OFDM	4X4 MIMO

		Mbps					
802.11ac	2012	78 Mbps to 3.2 Gbps	5 GHz	40,80,160 MHz	256 QAM	SU-OFDM	8X8 MIMO, MU-MIMO
80.11ad	2014	6.76 Gbps	60 GHz	2160 MHz	64 QAM	SU-OFDM	1X1 SISO
802.11ax			2.4 or 5 GHz	20, 40, 80, 80 + 80, 160 MHz	BPSK, QPSK, 16, 64, 256, 1024 QAM	MU-MIMO, OFDMA	8X8 MIMO

1.3. Çoklu Giriş ve Çoklu Çıkış (Multiple Input and Multiple Output - MIMO)

Kavramı

Yaygın bir yaklaşım, bant genişliğini artırmak ve sistemin bant genişliği kullanımını iyileştirerek geniş bantlı bir frekans seçici kanala yol açmaktadır. Bununla birlikte, çok yollu yayılma, artan bant genişliğinden elde edilebilecek kazanımların sınırlı olmasına yol açmaktadır. Yayılma ortamının uzamsal boyutunu kullanma ihtiyacı hem vericide hem de alıcıda çok sayıda anten kullanan sistemlerle sonuçlanmıştır ve çokluma ve çeşitlilik kazanımları sağlanmıştır. Bunlar genellikle MIMO sistemleri olarak adlandırılmaktadır ve teorik olarak kanal kapasitesi ile anten sayısı arasında doğrusal bir ilişki sergilediği saptanmıştır [6].

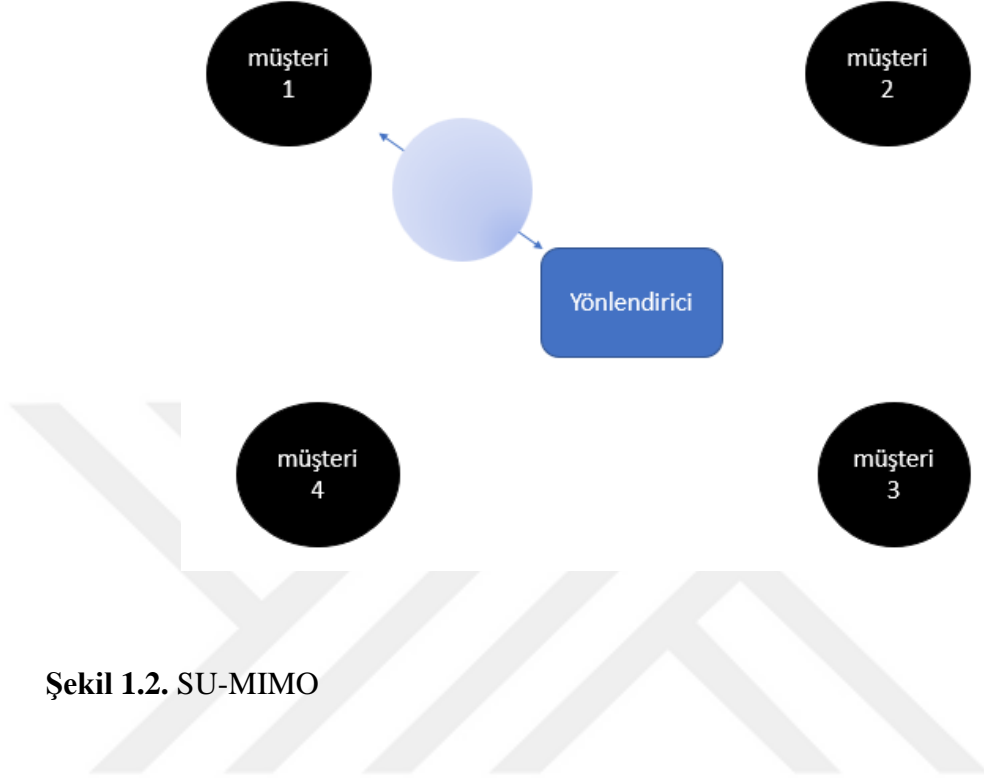
Zamanla değişen kablosuz kanal özelliklerinin doğru bilgisi, mobil terminal tarafından kat edilen çok kısa bir uzaysal mesafe üzerinde kanal gücünün birkaç büyüklük derecesine göre değişebilen mevcut ve gelecekteki kablosuz iletişim sistemleri için oldukça önem taşımaktadır. Örneğin, CSI kablosuz sistemlerde MIMO tekniklerini kullanılırken tam potansiyelinin sağlanabilmesi için oldukça önemlidir. Verici ayrıca bağlantı adaptasyonu için CSI gerektirmekte (örneğin, modülasyon şeması adaptasyonu ve güç tahsisi, programlama, ön eşitleme, uyarlamalı iletim anteni seçimi ve ön kodlama). Hatalı CSI, genellikle güç israfı,

yüksek bit/sembol hata oranları ve optimal olmayan verimlilik gibi problemlere neden olabilmektedir. Bu uyarlanabilir aktarım yöntemlerini verimli bir şekilde kullanmak için, mevcut ve gelecekteki kanal koşulları hakkında yeterli bilgi gerekmektedir. Bu nedenle radyo kanalı tahmini, bu iletim şemalarının potansiyelinin gerçekleştirilmesi için önemli bir teknik olmaktadır [6].

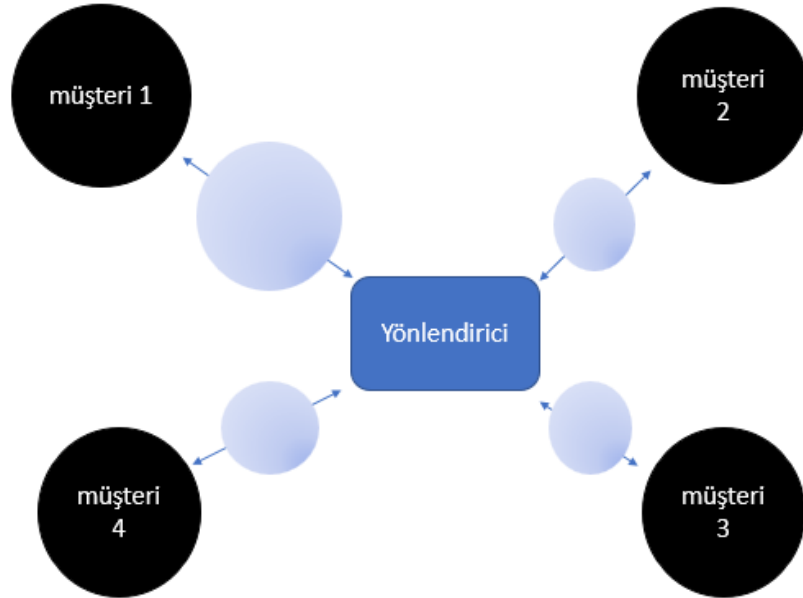
MIMO temel olarak, sistem kapasitesini, verimini veya kapsama alanını artırmak için kullanılan birden fazla anten elemanına sahip bir sistemi temsil etmektedir. Işın oluşturma teknikleri, yayılan enerjiyi diğer Kullanılmış Ekipmana'lere (Used Equipment - UE) olan çatışmayı azaltan ve böylece kapsamı geliştiren hedef UE doğru yoğunlaştırmak için kullanılmaktadır. Baz İstasyonu (Base Station - BS) iletiminin mobil veya sabit kullanıcılar tarafından nasıl kullanıldığına göre iki ana MIMO türü bulunmaktadır. Bunlar Tek Kullanıcı-MIMO (Single User MIMO - SU-MIMO) ve çok kullanıcı-MIMO'dur (Multi User MIMO - MU-MIMO). Her iki tür de DL yönünde, yani BS'dan veya AP'dan kullanıcılar tarafından kullanılabilir. [3].

SU-MIMO, 802.11n standartlarıyla birlikte gelen isteğe bağlı bir teknoloji olmuştur. SU-MIMO, aynı anda yalnızca bir cihaz arasında gönderilmesi veya alınması gereken birden fazla veri akışını çalıştırmaktadır. Bu teknoloji, MIMO teknolojisini desteklemek için hem verici hem de alıcı WiFi radyolarının yanı sıra, Şekil 1.2'de gösterdiği gibi birden fazla antene sahip olmayı gerektirmektedir. MU-MIMO yalnızca 802.11ac standartlarının 2. dalgasında kullanıma sunulmuştur. Bu teknoloji, Wi-Fi'nin, Şekil 1.3'te gördüğü gibi eski sürüme (SU-MIMO) kıyasla tek bir cihaz yerine, bu çoklu akışları aynı anda farklı WiFi cihazlarına iletmesini sağlamaktadır. MU'nun diğer bir yararı, MIMO veri akışlarından birini alan WiFi cihazlarının birden fazla antene sahip olmasının gerekmemesidir, bu nedenle tek antenli cihazlar

bile bunu destekleyebilmektedir. Ancak, WiFi cihazlarının alınması, MU-MIMO teknolojisini desteklemesi gerekmektedir [6].

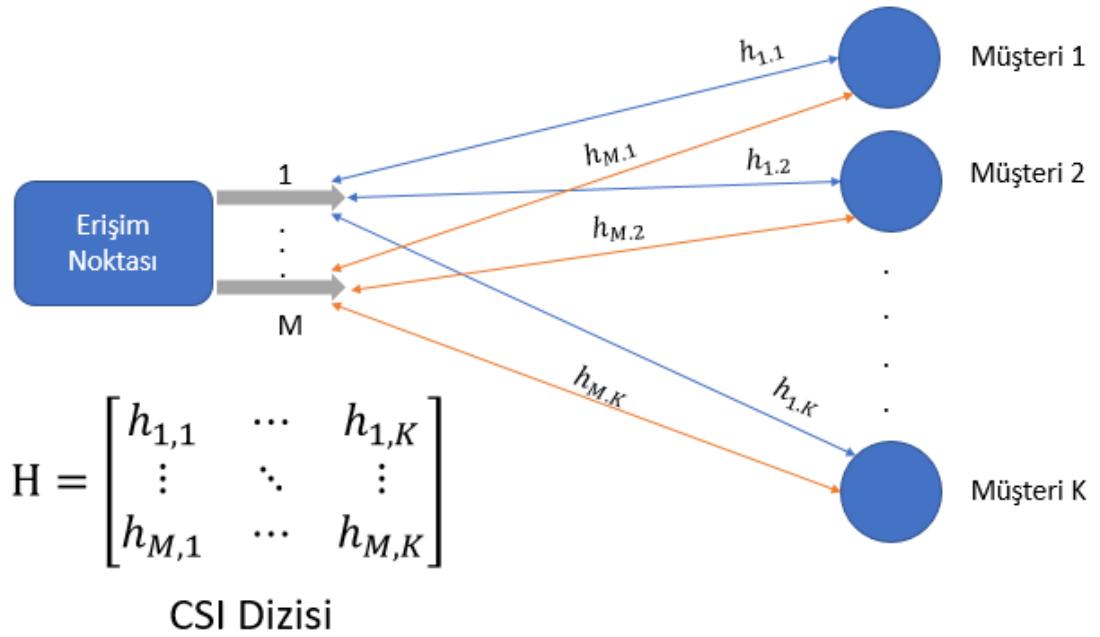


Şekil 1.2. SU-MIMO



Şekil 1.3. MU-MIMO

Diğer bir şekilde, MU-MIMO, bir erişim AP'nin, kendisiyle donatılmış birden çok anten sayesinde birden çok kullanıcıya aynı anda birden çok kullanıcıya paket gönderebildiği ışın biçimi kablosuz kapasitesini artırmaktadır. Bu teknikteki önemli soru 'Gerçek zamanlı programlama sürecinde onları işlemek için kullanıcı grubunu nasıl seçmesi gerekmektedir?' Başka bir deyişle buna hüzmleme grubunu seçme denilebilmektedir. Hatalı bir hüzmleme (Beamforming) grubu seçme işlemi, veri hızlarının düşmesine ve kapasiteyi artırmak yerine azalmasına neden olabilmektedir. Daha iyi hüzmleme grubu elde etmek için, kullanıcıların antenleri ile AP antenleri arasındaki bağlantıların durumu hakkındaki verileri içeren CSI Dizisinin hesaplanması gerekmektedir [7]. CSI Şekil 1.4'te gösterilmektedir.



Şekil 1.4. CSI MU-MIMO'da

MIMO kullanıcı Zamanlaması için verimli algoritmalar geliştirmek amacıyla, aşağıdaki iki kavramı değerlendirmek gerekmektedir [6]:

- Ortogonal Frekans Bölmeli Çokluma (Orthogonal Frequency Division Multiplexing - OFDM): Çoklu taşıyıcı modülasyonu olarak da adlandırılmaktadır. Her bir kanaldaki bitlerin bir kısmını göndererek farklı frekanslarda birden çok taşıyıcı sinyal kullanılmaktadır. Bu, Frekans Bölmeli Çoğullamaya (Frequency Division Multiplexing - FDM) benzer. Bununla birlikte, OFDM durumunda, birçok alt taşıyıcı tek bir veri kaynağına tahsis edilmiştir. Hızlı Fourier Dönüşümü (Fast Fourier Transform - FFT) ve Ters Hızlı Fourier Dönüşümü (Inverse Fast Fourier Transform - IFFT) özelliklerinden yararlanarak OFDM'yi uygulaması gerekmektedir. OFDM, diklik olarak bilinen bir ilkeye dayanmaktadır. Eğer iki alt taşıyıcı tam olarak bu sağ boşluğa yerleştirilirse, sinyaller üst üste gelse bile her bir alt taşıyıcı sinyali alıcıdan alınabilmektedir.
- OFDMA: Çoklu erişim stratejileri şunları kullanarak bir kablosuz kanalı paylaşır: Planlanmış süreler (Zaman Bölmeli Çoklu Erişim (Time Division Multiple Access - TDMA)), rastgele erişim süreleri (Taşıyıcı Çoklu Erişim Algılama (Carrier Sense Multiple Access - CSMA)), planlanmış frekans kullanımı (Frekans Bölmeli Çoklu Erişim (Frequency Division Multiple Access - FDMA)), sinyallerin kodlanmış yayılması (Doğrudan Sıralı Yayılma Spektrumu (Direct Sequence Spread Spectrum - DSSS)), ve/veya sinyallerin kodlanmış frekans atlaması (Frekans Atlamalı Yayılma Spektrumu (Frequency Hopping Spread Spectrum - FHSS)). Farklı kullanıcıların alt taşıyıcıların bir alt kümesini farklı zamanlarda kullanmasına izin verilerek FDMA ve TDMA'nın bir kombinasyonu kullanılmaktadır.

IEEE 802.11ax olarak adlandırılan son nesil WiFi'ye kullanılan teknik OFDMA'dır. Bu nedenle 802.11ax, OFDMA'yı WiFi'ye ilk olarak girmeyi düşünmektedir. Frekans etki alanında Çok Kullanıcılı (Multiuser - MU) kullanmamızı sağlamaktadır [8,9].

IEEE 802.11ax'ta, alt taşıyıcılar programlama için Kaynak Birimlerine (Resource Unit - RU) bölünmektedir. Bu nedenle, bant genişliği, tüm alt kümelerin RU olarak adlandırılan alt taşıyıcıların alt kümelerini içermektedir [10]. Öte yandan, RU'nun bir İstasyona (Station - STA) atanmış bir tonlar grubu olduğunu söylenebilmektedir. RU'nun boyutu, IEEE 802.11ax'e göre belirli sayıda tona sahiptir. Mevcut RU'ların seti kanal genişliğine bağlıdır [11]. Daha fazla bilgi için, bunu daha sonra tezde açıklanacaktır.

1.4. 802.11ax Kavramı

802.11ax, WiFi'nin Altıncı Neslidir. Kablosuz, daha fazla cihaz, bağlantı ve bant genişliği gerektiren uygulama tarafından yönlendirilerek gelişmektedir. Gelecekteki ağlar için daha fazla kablosuz kapasiteye ve güvenilirliğe ihtiyaç duyulacaktır. Altıncı nesil WiFi burada devreye girmektedir.

Ortaya çıkan IEEE 802.11ax standardı, kesintisiz inovasyon yolculuğunun en son adımıdır. Yeni ve mevcut ağların yeni nesil uygulamalara güç sağlamasına olanak tanıyan esneklik ve ölçeklenebilirlik eklerken 802.11ac'in güçlü yönleri temel alınmaktadır. IEEE 802.11ax, gigabit kablosuz özgürlüğünü ve yüksek hızını lisanslı radyoda Uzun Süreli Evrim'de (Long-Term Evolution - LTE) bulduğu öngörülebilirlikle birleştirmektedir.

IEEE 802.11ax, kuruluşların ve hizmet sağlayıcıların aynı WLAN altyapısı üzerinde yeni ve gelişmekte olan uygulamaları desteklemelerine olanak tanırken, eski uygulamalara daha yüksek kalitede hizmet sunmaktadır. Bu senaryo, yeni iş modelleri ve artan WiFi kullanımı için zemin hazırlamaktadır.

IEEE 802.11ax, erişim noktalarının yoğun ortamlarda daha fazla müşteriye desteklemek ve tipik kablosuz LAN ağları için daha iyi bir deneyim sağlamasına izin vermektedir. Ayrıca 4K video, Ultra HD, kablosuz ofis ve IoT gibi gelişmiş uygulamalar için daha öngörülebilir performansla güç vermektedir. Esnek uyanma zamanı programlama, istemci cihazlarının 802.11ac ile olduğundan çok daha uzun süre uyumasına ve daha az çekişmeyle uyanmasına olanak vererek akıllı telefonların, IoT'nin ve diğer cihazların pil ömrünü uzatmaktadır [12].

IEEE 802.11ax, üç farklı boyutu zorlayarak bu avantajları elde etmektedir:

- Yüzde 35'ten fazla hız artışı sağlayan 1024 Karesel Genlik Modülasyonu (Quadrature Amplitude Modulation - QAM) kullanan daha yoğun modülasyon
- Ek yükü ve gecikmeyi azaltmak için OFDMA tabanlı zamanlama
- Önemli ölçüde daha düşük Alınan Sinyal Gücü Göstergesinde (Received Signal Strength Indication - RSSI) daha iyi çalışma için sağlam, yüksek verimli sinyalizasyondur.

IEEE 802.11ax OFDMA teknolojisi, birinci dalga 802.11ax AP'ın bile sekiz uzamsal akışı desteklemesine ve satıcı uygulamasına bağlı olarak fiziksel katmanda 4800 Mbps'ye kadar sunmasına izin vermektedir. Tüm istemciler, daha iyi bir genel kullanıcı deneyimi için Orta Derece Erişim Kontrolü (Medium Access Control - MAC) katmanında daha yüksek etkili verim elde edilmektedir.

IEEE 802.11ax, hemen 802.11ax'a tam olarak yükseltimese bile mevcut 802.11a/g/n/ac dağıtımlarını geliştirecektir. OFDMA tabanlı kanal erişimi, geleneksel CSMA ile tamamen geriye dönük olarak uyumludur ve artık birçok şirket bunu Cisco® gibi erişim noktalarında uygulayacaktır. 802.11a/g/n/ac izleme ve

kablosuz izinsiz giriş önleme sistemleri (Kablosuz İzinsiz Giriş Koruması Anahtarlama (Wireless Intrusion Protection Switching - WIPS)), yeni 802.11ax paket biçiminde gönderilse bile işaret ve sonda isteği/yanıt çerçeveleri gibi çoğu yönetim çerçevesinin kodunu çözmeye devam edebilmektedir.

IEEE 802.11ax, 802.11a/n/ac cihazlarıyla verimli bir şekilde bir arada bulunarak maksimum uyumluluk için tasarlanmıştır. Yeni başlangıç eki (HE-SIG-A/B), çarpışmaları önlemeye yardımcı olmak için eski tek kullanıcı modu kullanıcıları ile çok kullanıcılı Gönderme İsteği/Göndermek için Temizleme (Request-to-Send - RTS/ Clear-to-Send - CTS) prosedürlerine yönelik geleneksel 802.11a/g/n/ac girişini ve uzantıları izlenmektedir.

Ortaya çıkan 802.11ax standardı, kablosuz teknolojide ileriye doğru atılmış önemli bir adımdır ve zaman ilerledikçe kurumsal ve hizmet sağlayıcı kuruluşlar için gerçek faydaları ortaya çıkarılmaktadır.

1.5. WiFi Zamanlama Yöntemi

WiFi 'de sağlanan geliştirmeye göre farklı araştırma çalışmalarını kısaca tanıtılacaktır [13]:

- WiFi'nin Fiziksel Katman (Physical Layer - PHY) verimini geliştirin: Son on yılda, WiFi protokolleri esas olarak PHY katmanının (802.11n, 802.11ac) performansını artırmıştır. Daha geniş bant genişliği kullanımı sayesinde, daha yüksek modülasyon hızı, akıllı anten tekniklerinin (hüzmeleme ve MIMO) tanıtılması, daha fazla anten kullanımı ve daha güçlü donanım, 54Mbps'den 7Gbps'ye muazzam PHY katmanı verim artışı sağlanmaktadır.

- WiFi'nin MAC katmanı verimini geliştirin: Çoğu WiFi ağı tarafından kullanılan MAC protokolü, dağıtılmış bir MAC protokolü, Dağıtılmış Koordinasyon Fonksiyonudur (Distributed Coordination Function - DCF). Dağıtılmış bir MAC protokolü, düşük karmaşıklık, ölçeklenebilirlik ve dinamik trafik yüklerine karşı sağlamlık gibi birçok avantaja sahiptir. Ancak, çekişme seviyeleri arttıkça kanal verimliliği azalmaktadır. WiFi ağlarının sayısındaki artış göz önüne alındığında, yüksek çekişme seviyelerinde MAC katmanı verimini iyileştirmeye çalışan algoritmalar önerilmiştir.
- Hizmet gereksinimlerinin çeşitliliğini karşılamak için araştırmacılar tarafından, temel ölçeklenebilirliğinden ödün vermeden WiFi ağ kontrol edilebilirliğini geliştirmeye büyük önem verilmektedir. Bir kuruluş ağındaki AP'lerin yönetimini merkezileştiren WiFi denetleyicileri, bu tür çabaların en basit örneği olabilmektedir. Radyo kaynak yönetimi, kablosuz politika yönetimi ve kimlik doğrulama hizmetleri gibi işlevler merkezi denetleyiciye taşınmaktadır. Bununla birlikte, WiFi denetleyicileri yeniden yapılabiliğe izin verirken, bunu yalnızca kimlik doğrulama ayarları ve kanal atamaları gibi makro düzeydeki "kontrol düzlemi" parametreleri için yaparlar ve medya erişim denetimi gibi mikro düzey "veri düzlemi" işlevlerini kontrol edilmemektedir.
- WiFi'nin makro düzeyde kontrol edilebilirliğini artırın: Bazı protokoller ve algoritmalar, MAC'ın mikro düzeyde kontrol edilebilirliğini sağlamaktadır. Mikro düzeyde kontrol edilebilirliğin faydalarından bazıları tanıtılacaktır:
 1. Tahmin edilebilirlik: Kanal erişimi iyi kontrol edildiğinde, doğru performans öngörülebilirliği mümkündür. Tahmin edilebilirlik, ağ seçimi, ağ düzenlemesi ve öngörülebilir hizmet gerektiren uygulamalar için yararlıdır.

2. Farklılaştırma: Müşterilere QoS sağlanırken hizmet farklılaştırması önemlidir. Ağda neyin aktarıldığını kontrol ederek, ayrıntılı bir hizmet farklılaştırması sağlanabilmektedir.
3. Verimlilik: WiFi ağları, yüksek yoğunluklu dağıtımlarda ve ciddi çarpışmalar nedeniyle gizli terminal senaryolarında zayıf kanal verimliliğine sahiptir. Şu anda kanala kimin erişeceğini kontrol ederek, çarpışmalardan kaçınarak daha yüksek verimlilik elde edilebilmektedir.

Farklı geliştirmelerin yanı sıra, bu protokoller ve algoritmalar aynı zamanda WiFi altyapısındaki değişikliklerin farklı karmaşıklığını da gerektirmektedir. Bazı algoritmalar yalnızca AP'lerde değişiklik yapılmasını gerektirmektedir. Bazı algoritmalar, AP'lerde ve STA'larda değişiklik yapılmasını gerektirmektedir. AP'ler ve STA'lardaki gelişmeye ek olarak, bazı algoritmalar merkezi bir denetleyici gerektirmektedir. Hatta bazı algoritmalar için ekstra zaman senkronizasyonu gerektirmektedir.

Çok sayıda WiFi cihazı nedeniyle, tüm cihazları yeni protokollere güncelleme/değiştirme maliyeti çok yüksek olabilmektedir. Bu, özellikle eski WiFi altyapısına önemli ölçüde yatırım yapan işletmeler için bir endişe kaynağıdır. Bu nedenle, değişikliklerin karmaşıklığı, yeni protokoller ve algoritmalar benimsenirken de önemli bir husustur.

Günümüzde çoğu WiFi dağıtımı tarafından, IEEE 802.11 standardının DCF modu kullanılmaktadır. DCF çalışma modeli basit ve ölçeklenebilirdir, kanalı dinlemesi ve tamamen yerel olarak mevcut bilgilerle çekişme kararları vermesi için katılımcı bir düğüm gerektirmektedir. Çekişme algoritması ise, yerel bilgilere göre uyarlamalı olarak ayarlanan maksimum çekişme penceresi dahil olmak üzere bir dizi parametre

tarafından kontrol edilmektedir. Yaklaşım basit ve ölçeklenebilir olsa da DCF'nin amacı ağda kaba düzeyde adalet ve verimlilik elde etmektir. Daha ince düzeydeki hedefler DCF'nin kapsamı dışındadır [6].

IEEE 802.11 PCF modu ise AP tarafından merkezi zamanlamaya dayanmaktadır. Teorik olarak, AP'deki programlama algoritması keyfi olarak tanımlanabilmektedir. PCF ile ilgili sorunlar iki yönlüdür: i) özellikle dinamik yük koşulları altında önemli genel giderlere neden olan bir yoklama süreci kullanılmaktadır, ii) standart, hücreler arası çarpışmaları önlemek için AP'lerin birbirleriyle nasıl koordinasyon içinde olması gerektiği belirtilmemektedir [13].

1.6. Zamanlama ve Kaynak Tahsisi Problemi (Scheduling and Resource Allocation Problem - SRAP)

Kablosuz sistemlerde, spektrum ve iletim gücü gibi kaynaklar sınırlıdır. Bu nedenle kaynakların yönetimi ve tahsisi her zaman kritik bir konudur. Son yıllarda bu konu, LTE, MIMO, MU-MIMO, OFDM ve OFDMA gibi yeni tekniklerle daha karmaşık hale gelmektedir. Burada alt taşıyıcılar ve RU olarak adlandırılan küçük kanallarımız bulunmaktadır ve amaç bu alt taşıyıcıların boyutunu ve konumlarını tespit etmek, sonra kullanıcıları/kullanıcı grubunu bu alt taşıyıcılara ayırmanın en iyi yolu çıkarmaktır. Bu nedenle, literatürde bu sorunu çözmek için çok sayıda çalışma bulunmaktadır ve her standardın koşullarından dolayı, zamanlama algoritmasını hepsine uyacak şekilde uygulanamamaktadır. Örneğin, LTE Zamanlama algoritmasında, kullanıcı birden çok alt kanal atayabilmesi ve alt kanalların konumları esnek, RU'ların konumu sınırlıdır ve bir kullanıcıya 802.11ax algoritmasında yalnızca tek bir RU atanabilmektedir [14,15].

1.7. LR Modeli

Günümüzde makine öğrenimi (Machine Learning - ML), verileri analiz etme ve hızlı ve doğru bir şekilde karar verme kabiliyeti nedeniyle hem endüstride hem de akademide büyük ilgi görmektedir ve yaşamın çeşitli alanlarında büyük önem taşımaktadır [16]. Bu nedenle, WiFi'de kullanıcı zamanlaması için en uygun algoritmayı bulmak için, ML ile çalışmayı düşünmesi gerekmektedir; burada ML, kablosuz iletişimdeki bazı sorunları çözmek için büyük bir fayda sağlamıştır, bunu literatür bölümünde gösterilecektir [17].

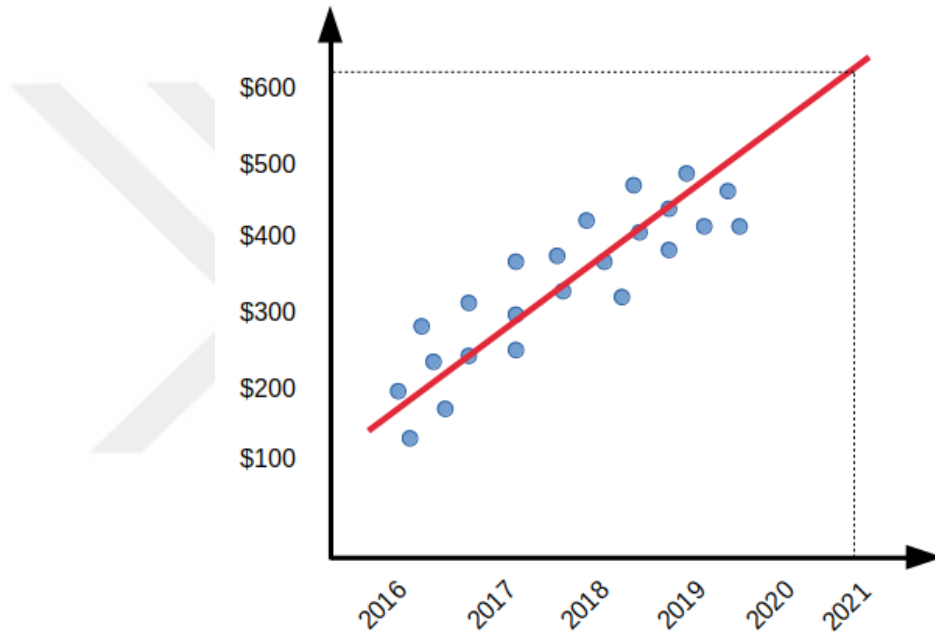
ML 1950'de başlamaktadır ve bir bilgisayarın verileri önceden işleyerek giriş verilerinden nasıl öğrenebileceği ve bir eğitim seti olarak kullanmak için ondan özellikler alabileceği anlamına gelmektedir. Dolayısıyla, ML süreci girdi verilerini (veri seti) içermektedir ve ardından özellikleri ondan çıkarmaktadır ve ardından tahmin modelimizi veya sınıflandırma modelimizi oluşturulmaktadır. Birden fazla makine öğrenimi türü bulunmaktadır. Denetimli makine öğrenimi: burada tahmin ve sınıflandırma problemlerinde kullanılan girdi verileri ve çıktı verileri bulunmaktadır. Denetimsiz makine öğrenimi: burada sadece veri girişi yapılmaktadır ve kümelemede kullanılmaktadır [18].

Regresyon modelinde, giriş verileri olarak aralarında ilişki olan çok sayıda veriye bulunmaktadır, girdi verilerini işledikten ve modeli aldıktan sonra, modele yeni veri girdileri uygularsak ihtiyacımız olan çıktı regresyon yapılabilmektedir [17].

Regresyon analizi, verilen bir veya daha fazla bağımsız değişken (x) için bir bağımlı değişken (y) arasındaki ilişkiyi tahmin ettiği bir dizi istatistiksel süreçtir. ML bağlamında, denetimli öğrenmenin bir alt alanıdır [18]. Her biri bağımsız ve bağımlı

değişkenler arasında farklı bir matematiksel ilişkiyi tanımlayan birkaç regresyon türü bulunmaktadır.

LR, bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişki düz bir çizgi olarak oldukça doğru bir şekilde modellenbildiği zaman kullanılmaktadır. Dolayısıyla, LR, sayısal girdileri sayısal çıktılarla eşleştirmemekte. Şekil 1.5'te gördüğü gibi veri noktalarına bir çizgi sığdırmasını izin veren bir ML algoritması olarak düşünülebilmektedir.



Şekil 1.5. LR örneği

1.7.1. LR Eğitimi

Bir grafikteki herhangi bir düz çizgi eşitlik 1.1'de formülü izlemektedir:

$$f(X) = M.X + B \quad (1.1)$$

M, çizginin eğimi olduğunda, B, çizginin dikey hareketine izin veren y kesme noktasıdır ve X, fonksiyonun girdi değeridir [18].

LR denklemi eşitlik 1.2’de tanımlanmaktadır:

$$Y = [\emptyset] X + \alpha \quad (1.2)$$

LR’in normal denklemi eşitlik 1.3’te tanımlanmaktadır:

$$\emptyset = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (1.3)$$

1.8. Mevcut WiFi Zorlukları

Orijinal 802.11 kablosuz ağ standardının yirmi yıldan uzun bir süre önce ticari olarak piyasaya sürülmesinden bu yana WiFi, teorik olarak art arda daha yüksek en yüksek hızlara ulaşan her yeni protokolle geliştirilmiştir.

Bununla birlikte, gerçek dünyada sorun, WiFi'nin ne kadar hızlı gelişebileceği değil, WiFi ağının artan müşteri cihazlarının yanı sıra çeşitli ağ gereksinimlerine sahip sayısız kullanıcıyı karşılayacak kapasiteye sahip olup olmadığıdır. Bir WiFi ağının, bağlı cihazların ve hizmetlerin yüksek hacmi ve çeşitliliğine yönelik artan talebi karşılayacak şekilde tasarlanması ve kullanıcı deneyimine göre ölçülmesi gerekmektedir.

Kaliteli bir WiFi deneyimi sunmak, genellikle değişen standartlar ve gelişen teknolojiler arasında karmaşık ve sürekli bir yolculuk gibi görünebilmektedir ve bir sonraki standardın en iyi olacağına dair sürekli söz verilebilmektedir.

1999'da kablosuz, 802.11a ve 802.11b onaylarıyla ticari olarak olması güzel olarak tanıtılmıştır. O zamanlar en yaygın kullanılan standart olan 802.11b, çok düşük hızlara sahipti, yalnızca 11 Mbps'ye kadardı. (O sırada kurulu çoğu Ethernet kablolu ağından çok daha düşüktür). Ancak WiFi mobil cihaz yoktu ve çok az dizüstü bilgisayar bulunmaktaydı. Bu yüzden, 11 Mbps fazlasıyla yeterli olmuştur.

2003 yılına gelindiğinde, WiFi özellikli mobil cihazlar piyasaya sürülmüştür ve taşınabilir dizüstü bilgisayarlar hem iş hem de kişisel kullanım için daha standart/kullanışlı hale gelmiştir. 802.11g standardı daha sonra onaylanmıştır ve 54 Mbps'ye kadar hız sağlanmıştır.

2007'de Apple tarafından ilk iPhone tanıtılmıştır ve akıllı telefon modern bir gerçeklik haline gelmektedir. 2009'da izlenen 802.11n standardı, 100 Mbps kullanılabilir iş hacmi sağlamaktadır. 802.11n standardı ayrıca 600 Mbps'ye kadar daha hızlı teorik veri hızları getirmektedir ve hem 2,4 hem de 5 GHz cihazları desteklemektedir.

Günümüzde mobil cihazlar, daha pahalı dizüstü bilgisayarların yerini alacak kadar sağlamdır, bu nedenle WiFi'nin yetişmesi gerekmektedir. 2013'te tanıtılan 802.11ac, bizi gigabit WiFi çağına getirmektedir. 802.11ac, 433 ile 2167 Mbps arasında en yüksek veri hızını sağlamaktadır.

WiFi'nin temelini oluşturan temel teknolojilerdeki yeni gelişmeler ile, şimdi bir başka dönüm noktasına ulaşmayı amaçlayan 802.11ax standardına entegre

edilmektedir: 10 Gbps veya orijinal WiFi standardının performansının tam 5.000 ila 10.000 katı! Bununla birlikte, 802.11ax sadece hıza değil, verimliliğe de odaklanmaktadır.

802.11n ve 802.11ac standartları tarafından, daha yüksek veri hızlarına ulaşılmasına yardımcı olan PHY ve MAC katman geliştirmeleri dahil olmak üzere bazı harika yeni teknolojiler tanıtılmıştır. Esasen, daha büyük yönetmeler ve daha hızlı arabalar inřa edilmiştir, ancak birkaç zorluğa yol açmıştır. Yeni nesil WiFi sistemlerinin karşılaştığı sorunlar, artan WiFi istemcisi yoğunluğu ve WiFi üzerinden Ses (Voice Over WiFi - VoWiFi) gibi çok sayıda küçük veri çerçevesine sahip aę trafiği nedeniyle sistem verimliliğinde dūřuřu içermektedir.

WiFi kullanan cihaz sayısının artmasıyla birlikte ve IoT'inin ortaya çıkmasıyla birlikte, WiFi ağlarının günümüzün kablosuz ortamlarını, artan veri trafiğini, farklı QoS gereksinimleri olan uygulamaları ve hizmetleri ve çeşitli bir karşımı daha iyi yönetmesi gerekmektedir.

Bir sonraki WiFi standardı olan 802.11ax hızla yaklaşmaktadır ve bu sadece daha hızlı WiFi hızlarıyla ilgili değildir. 802.11ax, önceki 802.11 geliştirmelerine kıyasla bir performans iyileştirmesi değişikliği getirecektir. 802.11ax değişikliğinin *Yüksek Verimlilik* başlığı bile birçok iyileştirmeye işaret etmektedir. Önceki 802.11 değişiklikleri *Yüksek Verimlilik* olarak tanımlanmıştır.

802.11ax standardındaki değişiklikler, kapasiteyi önemli ölçüde artıran, daha iyi kapsama alanı sağlayan ve hatta tıkanıklığı azaltan ve genel olarak çok daha iyi bir kullanıcı deneyimi sağlayan teknolojiden yararlanarak WiFi ağlarının çalışma şeklini iyileştirecektir. Bu gerçek dünya için WiFi'dir.

802.11ax standardı ve teknik özellikleri, orijinal olarak yoğun kullanım senaryoları için WiFi'yi iyileştirmek üzere tasarlanmıştır; ancak, tüm kablosuz ortamlar 802.11ax geliştirmelerinden yararlanabilmektedir. 802.11ax sayesinde, düzinelerce aygıtın her bir AP radyosu ile eşzamanlı olarak iletişim kurması sağlanmaktadır. Kanıtlanmış WiFi tekniklerini ve hücresele dünyadan gelen yenilikleri kullanan 802.11ax standardı, çoğunlukla spektral verimliliği artırarak kapasiteyi dört kata kadar artırmak için tasarlanmıştır. Bu, işletmeler, okullar, perakende işletmeleri, sıcak noktalar, havaalanları ve hatta ev dahil olmak üzere çeşitli ortamlarda hem 2,4 GHz hem de 5 GHz bantlarında avantajlar sağlanacaktır.

Erken 802.11ax standart geliştirmesi için birincil WiFi kullanım durumu, büyük halka açık alanlar gibi yüksek yoğunluklu ağ ortamları içindedir. Ancak, yüksek yoğunluk, bir stadyumda veya büyük bir salonda yüzlerce veya binlerce WiFi bağlantılı cihaz anlamına gelmemektedir. Kurumsal WiFi ağındaki tüm kullanıcılar için kabul edilebilir bir hizmet seviyesi garanti etmeniz gerek olursa, yirmi veya daha fazla cihaz yüksek yoğunluktadır.

Günümüzün kurumları, kurumlara ait kablosuz cihazlar, çalışan cihazları, misafir cihazları, kablosuz güvenlik kameraları, çevre sensörleri ve daha fazlasıyla uğraşmak zorunda kalmaktadır. Bilgi teknolojisi (Information Technology - IT) neredeyse her şeye kablosuz erişim sağlama potansiyeline sahip olduğundan, bu zorluklar daha da karmaşık hale gelecektir. Özel bir evde bile, bir ailenin sesle etkinleştirilen akıllı hoparlörler, dizüstü bilgisayarlar, tabletler, akıllı telefonlar vb. dahil olmak üzere çok sayıda WiFi cihazı bulunmaktadır. Tüm bu bağlı cihazlarla, eviniz hızla bir WiFi etkinlik kovani haline gelebilmektedir.

İstemci cihazlarının muazzam büyümesine ek olarak, sürekli artan video akışı hacmi, yeni WiFi teknolojileri için başka bir önemli kullanım durumudur. Ericsson

Mobilite Raporu, dünya çapındaki mobil video trafiğinin (şu anda ayda 14 eksabayt) 2023'e kadar yılda yaklaşık yüzde 50 artacağını (ayda 110 eksabayta) ve tüm mobil veri trafiğinin yüzde 75'ini oluşturacağını tahmin etmektedir. Rapor, mobil kullanıcıların mobil trafiğinin yaklaşık yüzde 65 ila 95'i mümkün olduğunda WiFi'ye aktaracağını göstermektedir. Hücresel ağlara uygun bir kullanıcı alternatifi olarak kalmak için, WiFi standartlarının hızla gelişen 5G hücresel standardı ile paralelliğin sürdürülmesi gerekmektedir. Ayrıca, video trafiğinin öncelikle yalnızca kablosuz DL trafiği olarak görüldüğü yerlerde, sosyal ağ akışı artık muazzam UL trafik yükleri oluşturmaktadır.

Videonun büyük veri nesneleriyle uğraşmaya ek olarak, video akışı zaman sınırlıdır, bu yüzden gecikmenin düşük tutulması gerekmektedir. Yaygın radyo koşullarıyla ilgili sorunların gerektirdiği ağ tıkanıklığı veya yeniden iletimler nedeniyle iletimdeki gecikmeler, korkunç tamponlanma mesajına veya daha kötüsüne neden olabilmektedir. Adil olmak gerekirse, çoğu yüksek çözünürlüklü (High-Definition - HD) video trafiği yalnızca 2 ila 20 Mbps gerektirir, çünkü video iletim sırasında yüksek oranda sıkıştırılabilmektedir. 4K video elbette daha büyük bir zorluktur: Ultra HD Blu-Ray, yaklaşık 82-128 Mbps'de çalışır, ancak yine de düşük kaliteli 802.11ac tarafından sağlanan bol bant genişliği dahilindedir. Her WiFi kanalında anında sunulan performans gigabitleri ve HD videonun daha yaygın hale gelmesiyle (hatta çoğu organizasyonla ortamda gerekli), en büyük zorluk WLAN'ın büyümesiyle başa çıkmak olacaktır. Kullanıcıların, cihazların ve uygulamaların sayısı, toplam talebi karşılamak için olabildiğince fazla verim ve verimlilik ihtiyacını artıracaktır.

1.9. Çalışmanın Amacı

Bu çalışmada, 802.11ax için yapay zekaya dayalı bir DL yeni bir kaynak tahsisi ve zamanlama algoritması geliştirilmiştir. Amacımız, genellikle birbiriyle çelişen verimlilik (paket yanıt süresi veya çıktı ile ölçülür) ve adalet performansını artırmaktır. Bu hedefe ulaşmak için önerilen çözüm, bir AP'nin her bir etkin WLAN istemcisine hizmet vermek için zaman pencerelerini otomatik olarak ayarlamasını sağlayarak her iki performans ölçüsünü toplamak ve dengelemektir. MATLAB ve NS-3 ağ simülatörü kullanılmıştır. Makine öğrenimi yeteneği, kalabalık sistemlerde daha verimli ve etkili bir algoritma elde etmek için verileri hızlı bir şekilde analiz etmek ve uygun kararlar vermek için kullanılacaktır.

2. LİTERATÜR İNCELENMESİ

WiFi, cihazları yerel alan ağlarına bağlayan bir kablosuz iletişim teknolojisidir. Yüksek veri hızı erişilebilirliği, ucuz dağıtım yeteneği ve neredeyse evrensel kullanılabilirliği nedeniyle, WiFi, çeşitli hizmetler sağlamak için farklı ortamlarda yaygın olarak benimsenmiştir. WiFi'nin her yerde bulunan uygulamalarını desteklemek için hem MAC hem de PHY katmanlarında farklı WiFi yeteneklerini geliştirmek için çeşitli protokoller ve algoritmalar önerilmiştir. Bu bölümde akıllı anten teknolojileri ve WiFi ağları için kontrol edilebilirliğin artırılması ile ilgili protokol ve algoritmaları tanılamaktadır ve bunları tezin önerilen algoritması ile karşılaştırılmaktadır.

Kablosuz ağdaki kritik konulardan biri, daha etkili bir iş hacmi elde etmek ve herhangi bir kablosuz ağın performansını değerlendirmek için işlem hızı ve adilliğin geleneksel ölçütler olduğu kullanıcılar arasında mükemmel adalet elde etmek için yönetim ve kaynak tahsisidir. Bu nedenle, kablosuz ağın performansını iyileştirmek için bu konuda birçok çalışma bulunmaktadır [19-23].

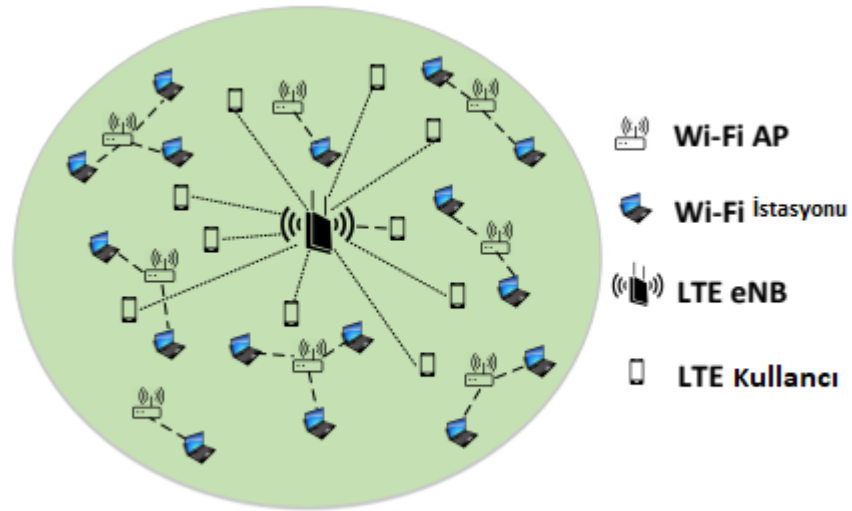
Yeni kablosuz Zamanlama teknikleri üzerine önceki çalışmaların perspektifinden esas alarak birden çok kategoriye ayrılabilir ve literatürdeki eksiklikleri tanımlayan birkaç temel gözlem listelenmiştir:

2.1. Hücresel ağ Zamanlamasına göre

Hücresel ağlar, daha verimli ve yüksek veri hızı uygulamalarına daha fazla hitap edebilmek için sürekli olarak gelişmektedir. Zamanlamaya göre bu konuda ulaşılan

ana teknik LTE'ydi. Gelişmiş-LTE/LTE'deki paket Zamanlama algoritması ile önceki çalışmalarda iyi sonuçlar elde edilmiştir [24-32]. [29]'da yapılan çalışmada, paket önceliğine bağlı bir algoritma yapılarak QoS'ni iyileştirecek olan yüksek paket kaybını azaltmak ve iyileştirmekle ilgiliydi. [30]'da ise, LTE'yi içeren ve bunu LTE doğrudan *araçtan araca* (LTE-V2V) iletişimiyle karşılaştıran yeni IEEE 802.11p tekniğini incelenmiştir.

[31]'de ise çalışma, Şekil 2.1'de gördüğümüz gibi lisanssız bir spektrumda LTE ve Wi-Fi'nin bir arada varlığını etkileyen Taşıyıcı Algılayan Uyarlanabilir İletim (Carrier Sensing Adaptive Transmission - CSAT) hakkında olmuştur. LTE ve WiFi arasındaki temel sorun, radyo kaynağının birden fazla kanal ve çok sayıda alt kanal arasında paylaşılmasıdır. Bu nedenle çözüm, radyo kaynaklarını gerçek zamanlı olarak tahsis etmek için optimum bir zamanlama algoritması gerçekleştirmiştir. Bu çalışma, kanal ve alt kanal seviyelerinde radyo kaynaklarının en uygun şekilde tahsis edilmesiyle her LTE kullanıcısının UL ve DL hızı gereksinimlerini karşılayarak gerçekleştirilmiştir.



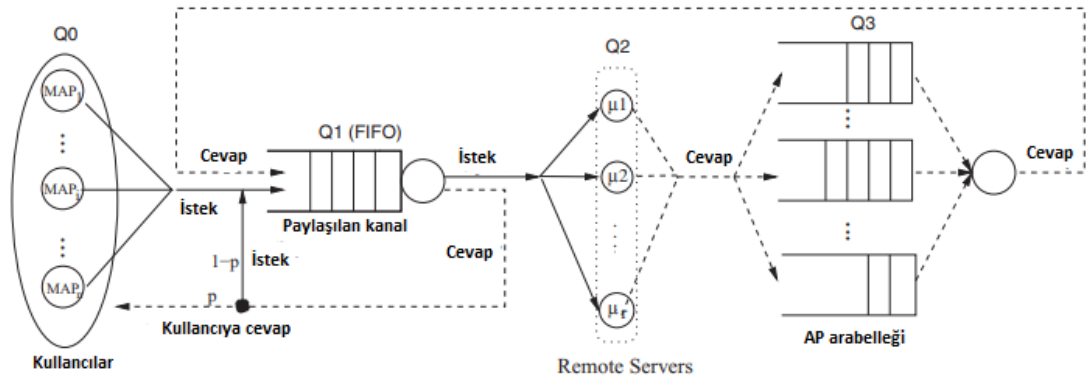
Şekil 2.1. LTE ve Wi-Fi'nin bir bölgede bir arada bulunması [31].

2.2. WiFi Zamanlamasına Göre

Bu konunun önemi nedeniyle, WiFi zamanlaması önceki çalışmalarda iyi çalışılmıştır. WiFi 'deki Zamanlama algoritmasının performansını ölçmekle ilgili bir sorunumuz bulunmaktadır ve burada verimlilik ve adalet, herhangi bir WiFi zamanlama algoritmasının performansını ölçmenin ana ölçüsüdür. Daha fazla WiFi performansı elde etmek için, genellikle birbiriyle çelişen yüksek verimlilik ve yüksek adalet elde edilmesi gerekmektedir. Başka bir deyişle, daha fazla verimlilik, daha az adalet sağlamaktadır ve bunun tersi de geçerli gerekmektedir [33,34].

2.2.1. Paket Zamanlaması

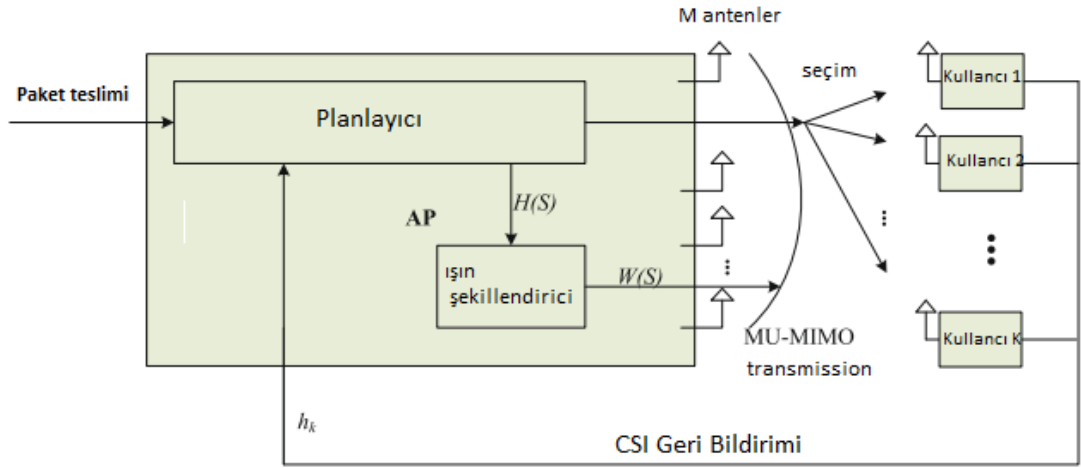
[23]'te, kalabalık bir 802.11 WLAN'da DAT adı verilen yeni bir paket zamanlama algoritmasına bulunmaktadır. Bu çalışmada, AP'ler her bir etkin WLAN istemcisine hizmet vermek için zaman pencerelerini otomatik olarak ayarlaması sağlanmaktadır, dolayısıyla Şekil 2.2'de bulduğumuz gibi adalet ve verimlilik arasındaki ağırlığı dinamik olarak değiştirilmiştir.



Şekil 2.2. Tek AP kablosuz ağının kuyruk modeli [23].

[35]'da ise, kablosuz örgü ağlarda programlama algoritmaları için bir araştırmaydı. Burada [36] 'de, farklı ağlarda paket zamanlamasına ilişkin bir anket bulunmaktadır. Bir 802.11n WiFi yönlendiricide çalıştırılan yüksek hızlı kanal oranından tam olarak yararlanarak RAS algoritmasını tasarlamaktadır [37].

Yukarıda WiFi verimliliğini artırmak için bahsedildiği gibi, amaç, aynı anda birden fazla müşteriye nasıl hizmet verebilmektedir. İlk olarak, AP'da birden fazla anten kullanarak bir göndericiden birden çok alıcıya paket göndermeyi sağlayan bir teknik yapmayı düşünülmüştür. Dolayısıyla, [38] 'daki çalışma Tek Gönderen Çoklu Alıcı (One Sender Multiple Receiver - OSMR) iletim tekniği hakkında olmuştur. Bundan sonra dikkat, iki türü olan MIMO tekniği adı verilen yeni bir tekniğe gidilmektedir: MU-MIMO iletimi ve SU-MIMO iletimi. [39] 'de, kanal ipucu tabanlı sorgulama ve aktif CSI geri bildirimini kullanarak yeni bir kullanıcı programlama algoritması içeren *802.11ac+* adlı yeni bir MU-MIMO MAC protokolü önerilmiştir. Algoritma, AP'lerin Şekil 2.3'te gösterildiği gibi tüm kullanıcılardan CSI'yı almaması için CSI geri bildirim aşamasında en iyi kullanıcı setini belirlemektedir, böylece daha fazla verimlilik elde etmektedir. [7] 'de, en iyi grubu arayan SIEVE adlı yeni bir MU-MIMO MAC sunulmaktadır. [5]'te, en büyük kare toplam kuyruğa sahip olan alt kümeleri seçilmektedir, ardından alt küme içinde *Max-Weight* kullanarak bir kullanıcı seçilmektedir, CSI kullanmak verim açısından optimal olmaktadır.



Şekil 2.3. M-anten AP ve K tek antenli kullanıcı istasyonları ile MU-MIMO DL sistemi [39]

2.2.2. Güç Zamanlaması

İstemcilerin daha az enerji tüketimi elde etmek için mümkün olduğunca güç tasarrufu modunda kalabilecekleri AP zamanlamasını ayarlayarak AP ve istemcilerin güç tasarrufunu geliştirmeleri gerekmektedir. WiFi ağında enerji tasarrufunun önemi nedeniyle, AP'deki güç tasarrufu zamanlaması literatürde iyi çalışılmıştır [40-44]. Bu tez, güç tasarrufu modunun etkinleştirilmediği 802.11ax AP'de zamanlama ve kaynak tahsisini hedeflemektedir.

2.3. 802.11ax Zamanlamasına Göre

802.11ax, WiFi'de OFDMA ve MU-MIMO kullanan yeni bir tekniktir, bu nedenle en önceki çalışma fiziksel katman ve güç tasarrufu gelişmeleri arasındaki farkı [8], anketlerle [45], temel zorlukları keşfederek [46], Performans analizi yaparak [47], QoS değerlendirmesi [48] ve 802.11ax kullanarak IoT'nin karşılaştığı bazı sorunları çözümüyle vurgulamaktadır [49].

Önceki çalışmada da araştırmacılar, kullanıcı toplam oranını maksimize etmek gibi farklı hedeflere yönelik bazı programlama algoritmalarını QoS verimini en üst düzeye çıkararak [50,51], ve gecikmeyi gerçek zamanlı olarak bir milisaniyeden daha kısa tutmaya çalışarak [52]'de geliştirmişlerdi. Bazı zamanlama algoritmaları, ortalama alınan sinyal gücüne dayalı olarak [59]'daki gibi farklı teknikler kullanılarak geliştirilmiştir. Bu algoritma, Taşıyıcı Algılama Eşiğini (Carrier Sense Threshold - CST), kablosuz dağıtılmış bilgi işlem sistemine dayalı olan [47] ve çok kullanıcılı iletme dayalı olan [53] IEEE 802.11e Gelişmiş Dağıtılmış Kanal Erişimi (Enhanced Distributed Channel Access - EDCA) uyarlamasını kullanarak dinamik olarak ayarlar. [54] 'de AP, UL OFDMA çerçevesinden çok sayıda CSI değerini tahmin edilebilmektedir ve toplayabilmektedir [55] ve video akışını zamanlamalar bulunmaktadır [56].

Bazı önceki çalışmalar, 'Lagrange' ikili ayrıştırma yöntemi gibi birçok yöntemle DL'daki kaynak tahsisi ve zamanlama algoritmalarının optimizasyonu ile ilgiliydi [57], TCP Goodput'u optimize etme [58], ve Ortogonal Olmayan Çoklu Erişim (Nonorthogonal Multiple Access - NOMA) sistemleri kullanması gibidir [59].

Bazı çalışmalar, gecikmeyi en aza indirerek UL'daki zamanlamayı iyileştirmek üzerinde olmuştur [60] ve TCP trafiği için zamanlama stratejilerinin geliştirilmesi [69]. Ancak [14], orijinal stokastik fayda maksimizasyonu problemini çözerken, ve verim maksimize etmektedir [15], [61] 'de UL Çok Kullanıcılı OFDMA'nın performans analizi yapılmıştır ve zamanlama stratejileri ve verimlilik optimizasyonu [62] 'de açıklanmıştır.

2.4. Makine Öğrenimi ile WiFi Zamanlamasına Göre

[63]'te, kanal tahminini atlamak ve bağlantıları verimli bir şekilde yalnızca vericilerin ve alıcıların coğrafi konumlarına göre zamanlamak için bir derin öğrenme yaklaşımı uygulanmıştır ve böylece maliyetli kanal tahmin aşamasını ortadan kaldırılmıştır. [64]'te Destek Vektör Makineleri (Support Vector Machines - SVM) ve Derin İnanç Ağları (Deep Belief Network - DBN) optimal bir zamanlama ve güç kontrol algoritması yapmak için uygulanmıştır.

[18] 'de, BS antenlerin indekslerini iki sete bölerek DL kanal tahmini ve geri beslemenin ek yükünü azaltmak için LR ve Destek Vektör Regresyonunu (Support Vector Regression - SVR) kullanılmıştır. Daha sonra, ikinci kümedeki CSI'nın tahmini, birinci kümede hesaplanan CSI'yu oluşturmaktadır. Bu tezde onu kullanarak algoritmalarımızı geliştirilmiştir.

[65] 'de derin öğrenme, OFDM sistemlerinde kanal tahmini ve sinyal tespiti için uygulanmıştır. [66] OFDMA'da kaynak tahsisi için genetik algoritma ve LTE MIMO-OFDMA Hücresel sisteminde kaynak tahsisi analizinde genetik algoritma kullanılmıştır [67].

Önceki çalışmadaki bir başka yön ise merkezi bir mantıksal kontrol mimarisi üzerinden çevrimiçi öğrenmeye dayalı bir yaklaşımla iş hacmini ve adaleti iyileştirmektir. [68]'de, bağlantı adaptasyonu ile optimum akıllı MU-MIMO kullanıcı seçimini elde etmek için periyodik aralıklarla dinamik olarak en uygun konfigürasyonları seçmek için bir takviye öğrenme stratejisi uygulanmaktadır.

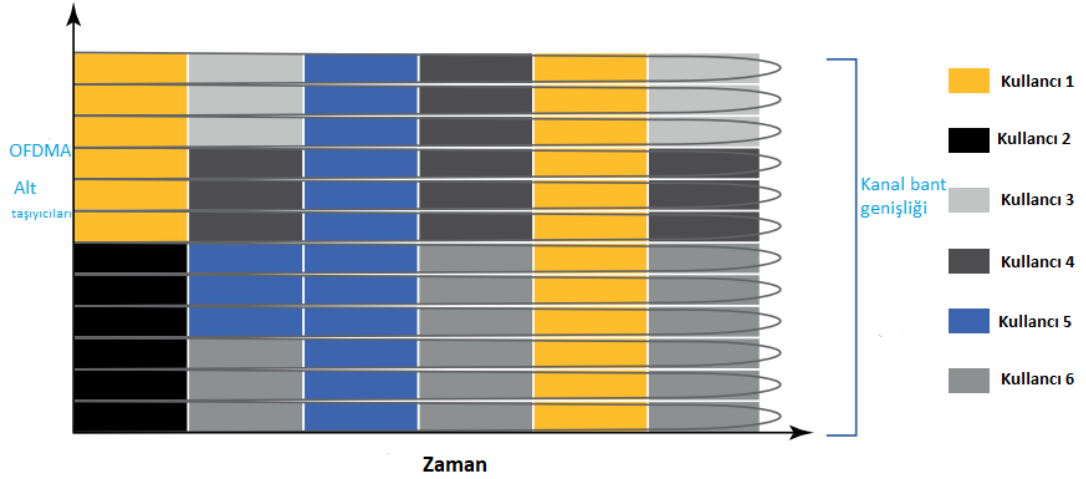
3. TEMEL 802.11AX TEKNOLOJİLERİNİ ANLAMA

3.1. MU Kavramı

MU, 802.11ax'taki çoklu teknolojiler için geçerlidir, bu nedenle çok kullanıcı teriminin belirli bir teknolojiye atıfta bulunmadığını anlamak önemlidir. MU, desteklenen teknolojiye bağlı olarak bir AP ile birden fazla WiFi istemcisi arasındaki aktarımların aynı anda gerçekleşebileceği anlamına gelmektedir [6]. 802.11ax, MU-OFDMA ve MU-MIMO teknolojilerinin kullanımını tanımlamaktadır.

OFDMA, 802.11ax'ın tartışmasız en önemli yeni özelliğidir ve farklı bant genişliğine sahip birden çok kullanıcıya aynı anda hizmet verilmesine izin verir. OFDMA, şu anda 802.11a/g/n/ac radyolarda tek kullanıcı iletimler için kullanılan OFDM dijital modülasyon teknolojisinin çok kullanıcı bir sürümüdür. Geriye dönük uyumluluk için 802.11ax telsizleri ayrıca OFDM'yi de desteklemektedir [7].

OFDMA, bir WiFi kanalını RU'lar olarak adlandırılan daha küçük frekans tahsislerine bölmektedir ve böylece bir AP'nin belirli RU'lara atanmış birden fazla bireysel istemciyle iletişimi (UL ve DL) senkronize etmesi sağlanmaktadır. Kanalın alt bölümlere ayrılmasıyla, küçük kareler (video akışı gibi), Şekil 3.1'da gösterildiği gibi aynı anda birden çok kullanıcıya paralel olarak iletilebilmektedir. Eşzamanlı iletim ile, MAC alt katmanındaki aşırı ek yükü ve orta çekişme ek yükünü azaltılmaktadır. AP, tüm kanalı tek bir kullanıcıya tahsis edebilmesi veya istemci trafiği ihtiyaçlarına dayalı olarak birden fazla kullanıcıya aynı anda hizmet vermek için onu bölümleyebilmektedir [11].



Şekil 3.1. OFDMA örneği [69]

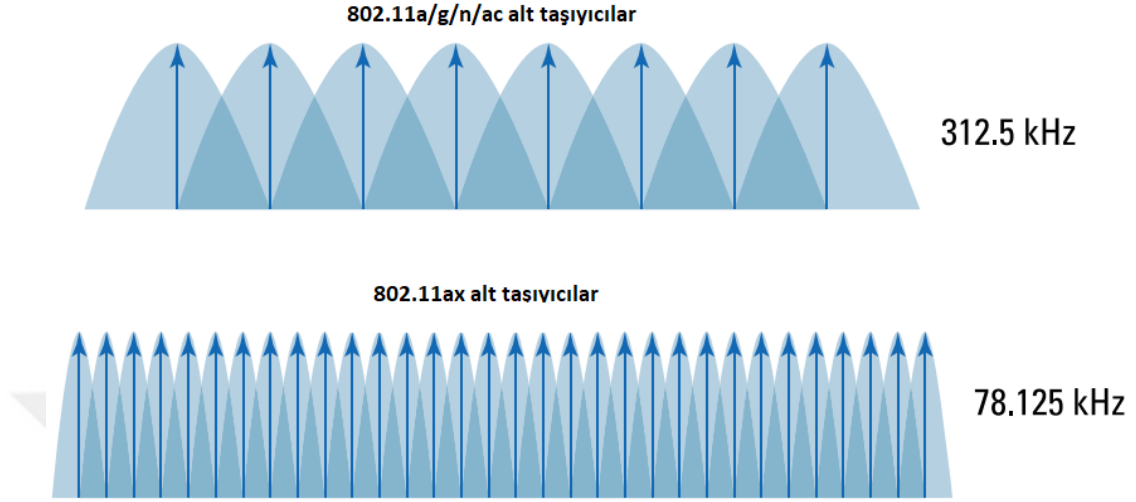
OFDMA, çoğu ağ uygulaması için idealdir ve daha iyi frekans yeniden kullanımı, azaltılmış gecikme ve artan verimlilik ile sonuçlanmaktadır.

3.2. Alt Taşıyıcılar (Subcarriers)

OFDM, bir kanalı IFFT olarak bilinen matematiksel bir işlem aracılığıyla alt taşıyıcılara bölmektedir. Alt taşıyıcıların aralığı ortogonaldir, bu nedenle aralarında koruma bantları olmamasına rağmen birbirlerine müdahale etmemektedir. Bu, bitişik alt taşıyıcı frekanslarında sinyal sıfırları yaratır ve Taşıyıcılar Arası Girişimi (Intercarrier Interference - ICI) önlemektedir [69].

Bir OFDM 20 MHz 802.11n/ac kanalı, 64 312.5 kHz alt taşıyıcıdan oluşmaktadır. 802.11ax, 3.2 mikro saniye olan eski sembol süresinin dört katı olan 12.8 mikro saniye daha uzun bir OFDM sembol süresi sunmaktadır. Daha uzun sembol süresinin bir sonucu olarak, alt taşıyıcı boyutu ve aralığı Şekil 3.2'de gösterildiği gibi 312.5 kHz 'den 78.125 kHz'e düşmektedir. Daha dar alt taşıyıcı aralığı, daha iyi

eşitleme ve gelişmiş kanal sağlamaktadır. 78,125 kHz aralık nedeniyle, bir OFDMA 20 MHz kanalı toplam 256 alt taşıyıcıdan oluşmaktadır [12].



Şekil 3.2. OFDM ve OFDMA alt taşıyıcıları [69]

802.11ax için üç tür alt taşıyıcı bulunmaktadır [14-15]:

- Veri alt taşıyıcıları: Bu alt taşıyıcılar, 802.11ac ile aynı Modülasyon ve Kodlama Şemalarını (Modulation and Coding Scheme - MCS) ve ayrıca 1024-QAM eklenmesiyle iki yeni MCS'yi kullanacaktır.
- Pilot alt taşıyıcılar: Bu alt taşıyıcılar, verici ve alıcı arasında senkronizasyon için kullanılmaktadır ve herhangi bir modüle edilmiş veri taşımamaktadır.
- Kullanılmayan alt taşıyıcılar: Kalan kullanılmayan alt taşıyıcılar, çoğunlukla bitişik kanallardan veya alt kanallardan gelen parazitlere karşı koruyucu taşıyıcılar veya boş alt taşıyıcılar olarak kullanılmaktadır.

3.3. RU Kavramı

Bir 802.11n/ac AP, bir OFDM kanalı üzerindeki 802.11n/ac istemcilere ilettiğinde, kanalın tüm frekans alanı her bağımsız DL iletimi için kullanılmaktadır. 20 MHz OFDM kanalı kullanıldığında, her bir bağımsız iletim için tüm alt taşıyıcılar kullanılmaktadır. Diğer bir deyişle, AP ile tek bir OFDM istemcisi arasındaki iletişim için 20 MHz kanalının tamamı gerekmiştir. Aynı durum, tek bir 802.11n/ac istemcisinden 802.11n/ac AP'ye herhangi bir UL iletimi için de geçerlidir. AP'ye istemci aktarımı için 20 MHz OFDM kanalının tamamı gereklidir [50].

Şekil 3.3'te gösterildiği gibi, bir OFDMA kanalı toplam 256 alt taşıyıcıdan oluşmaktadır. Bu alt taşıyıcılar, RU'lar olarak bilinen daha küçük alt kanallar halinde gruplandırılabilir. 20 MHz'lik bir kanalı alt bölümlere ayırırken, bir 802.11ax AP, kabaca sırasıyla 2 MHz, 4 MHz, 8 MHz ve 20 MHz kanallarına eşit olan 26, 52, 106 ve 242 alt taşıyıcı RU'ları belirleyebilmektedir [51].



Şekil 3.3. OFDMA kaynak birimleri- 20 MHz kanalı [69]

802.11ax AP, 20 MHz'lik bir kanalda kaç adet RU'nun kullanılacağını ve farklı kombinasyonların kullanılabilmesini belirtmektedir. AP, tüm kanalı bir seferde yalnızca bir istemciye tahsis edilebilmektedir veya kanalı aynı anda birden çok istemciye hizmet verecek şekilde bölümleyebilmektedir. Örneğin, bir 802.11ax AP, 8 MHz alt kanalı kullanan bir 802.11ax istemcisi ve 4 MHz alt kanalı kullanan diğer üç 802.11ax istemcisi ile aynı anda iletişim kurabilmektedir (UP veya DL) [69].

20 MHz kanallarına ek olarak, 40, 80 ve hatta 160 MHz kanalları da Çizelge 3.1'de gösterildiği gibi çeşitli RU kombinasyonlarına bölünebilmektedir. Örneğin, 80 MHz'lik bir kanal, yalnızca 26 alt taşıyıcı RU kullanılarak alt bölümlere ayrılmışsa, 37 802.11ax istemcisi, OFDMA yeteneklerini kullanarak teorik olarak eşzamanlı olarak iletişim kurabilmektedir [57].

Çizelge 3.1. Kaynak birimleri ve geniş kanallar

Kaynak Birimleri (RUs)	20 MHz kanal	40 MHz kanal	80 MHz kanal	160 MHz kanal	80 + 80 MHz kanal
996 (2x) alt taşıyıcılar	n/a	n/a	n/a	1 kullanıcı	1 kullanıcı
996 alt taşıyıcılar	n/a	n/a	1 kullanıcı	2 kullanıcılar	2 kullanıcılar
484 alt taşıyıcılar	n/a	1 kullanıcı	2 kullanıcılar	4 kullanıcılar	4 kullanıcılar
242 alt taşıyıcılar	1 kullanıcı	2 kullanıcılar	4 kullanıcılar	8 kullanıcılar	8 kullanıcılar
106 alt taşıyıcılar	2 kullanıcılar	4 kullanıcılar	8 kullanıcılar	16 kullanıcılar	16 kullanıcılar
52 alt taşıyıcılar	4 kullanıcılar	8 kullanıcılar	16 kullanıcılar	32 kullanıcılar	32 kullanıcılar
26 alt taşıyıcılar	9 kullanıcılar	18 kullanıcılar	37 kullanıcılar	74 kullanıcılar	74 kullanıcılar

Gerçek dünyadaki 802.11ax dağıtımlarının çoğu tarafından, iletim fırsatı başına çok kullanıcı OFDMA iletimlerine (Transmission Opportunity - TXOP) katılan maksimum dokuz istemciyle büyük olasılıkla 20 MHz kanal kullanılacaktır.

Unutulmaması gerekmektedir ki, OFDMA'nın tüm amacı daha küçük alt kanallardan yararlanmaktır [61].

802.11ax AP'lerin, DL'ı birden çok 802.11ax istemcisine aktarabildiği gibi, birden çok 802.11ax istemcisinden eşzamanlı UL aktarımlarını senkronize edebileceği unutulmaması gerekmektedir. Senkronize UL iletimi, WiFi iletişimlerinde daha önce hiç görülmemiş bir özelliktir. Her iki durumda da çok kullanıcıli iletişim için gerekli çerçeve değişimlerini sağlamak için tetikleme çerçevelerine ihtiyaç bulunmaktadır. Örneğin, RU'ları 802.11ax istemcilerine tahsis etmek için bir tetikleyici çerçeve kullanılmaktadır. Tetikleme çerçeveleri ayrıca, 802.11ax istemcilerini arabelleğe alınmış veriler hakkında ve OFDMA iletimleri için amaçlanan verilerin QoS kategorisi hakkında sorgulamak için de kullanılmaktadır. 802.11ax istemcileri, AP'nin senkronize edilmiş UL iletimleri için RU'ları tahsis etmesine yardımcı olan arabellek durum raporlarıyla yanıt vermektedir [51].

Orta çekişme kuralları hala geçerlidir. AP, eski 802.11 istasyonlarına karşı bir TXOP için hala rekabet etmek zorundadır. AP bir TXOP'ye sahip olduğunda, AP, 20 MHz'lik bir kanal içinde DL veya UL aktarımları için dokuz adete kadar 802.11ax istemci istasyonunu kontrol eder, kullanılan RU sayısı TXOP başına değişebilmektedir [58].

3.4. MU-MIMO Genel Anlamı

802.11ac'de sunulan, MU-MIMO teknolojisi, teorik olarak, daha fazla verimlilik sağlamak için birden fazla uzamsal akış kullanarak, aynı anda ve aynı kanal üzerinde birden çok çerçevenin farklı alıcılara iletilmesine izin vermektedir. MU-MIMO ile, benzersiz modüle edilmiş veri akışlarını aynı anda birden çok istemciye

ileterek uzamsal çeşitlilik sağlanmaktadır. 802.11ac yalnızca tanımlı DL MU-MIMO ve aşağıdaki nedenlerden dolayı yaygın olarak uygulanmamaktadır [69]:

- Mevcut pazarda MU-MIMO özellikli 802.11ac istemcisi çok azdır ve bu teknoloji kuruluşa nadiren kullanılmaktadır. Birçok istemci cihazı tek antendir ve birçok çift anten istemcisi, parazite karşı koruma sağlamak için DL MU-MIMO için tekli akış moduna geçirmektedir.
- MU-MIMO, uzaysal çeşitlilik için istemcilerin yanı sıra AP arasında oldukça büyük fiziksel mesafeye ihtiyaç duymaktadır, bu da kullanılabilirliğini sınırlayabilmektedir. Kurumsal WiFi dağıtımlarının çoğu, MU-MIMO'ya elverişli olmayan yüksek yoğunlukta kullanıcı içermektedir.
- MU-MIMO, sondaj çerçeveleri gerektiren Hüzmelemeyi iletmeyi (Transmit Beamforming - TXBF) gerektirmektedir. Sondaj çerçeveleri, özellikle veri çerçevelerinin büyük kısmı küçük olduğunda aşırı ek yük getirmektedir ve performans kazanımlarını olumsuz etkileyebilmektedir.

Bu sorunları gidermek için, 802.11ax taslak değişikliğinde önerilen bazı önemli MU-MIMO geliştirmeleri bulunmaktadır; bunlar, ek yükü azaltmak ve UL yanıt süresini artırmak için çok sayıda kullanıcı arasında sondaj çerçevelerini, veri çerçevelerini ve diğer çerçeveleri gruplandırmaktır. Tetikleme çerçeveleri ayrıca 802.11ax istemcilerinin UL MU-MIMO iletişimlerine katılmaları için sinyal vermek için de kullanılacaktır [6].

802.11ac MU-MIMO ile 802.11ax MU-MIMO arasındaki temel fark, aynı anda bir AP ile kaç MU-MIMO istemcisinin bağlanmasıdır. 802.11ac, yalnızca dört istemciden oluşan bir MU-MIMO grubuyla sınırlıdır. 802.11ax, hem DL'da hem de UL'da 8x8x8 MU-MIMO'yu destekleyecek şekilde tasarlanmıştır; bu, aynı anda sekiz kullanıcıya kadar hizmet vermesine ve önemli ölçüde daha yüksek veri çıkışı

sağlamasına olanak tanımaktadır. UL MU-MIMO desteğinin ilk nesil 802.11ax istemci radyolarında mevcut olmamaktadır [18].

MU-MIMO (DL veya UL) için minimum RU boyutu 106 alt taşıyıcı veya daha büyüktür. 802.11ax, hem MU-OFDMA hem de MU-MIMO'nun eşzamanlı kullanımına izin vermektedir, ancak bunun geniş çapta uygulanması beklenmemektedir. Tablo 3.2'de, MU-OFDMA ve MU-MIMO'yu karşılaştırılmaktadır [55].

Çizelge 3.2. MU-OFDMA ve MU-MIMO Karşılaştırması

MU-OFDMA	MU-MIMO
Verimliliği arttırmak	Artan kapasite
Azaltılmış gecikme	Kullanıcı başına daha yüksek veri hızları
Düşük bant genişliği için en iyisi	Yüksek bant genişliği uygulamaları için en iyisi
Küçük paketlerle en iyisi	Büyük paketlerle en iyisi

OFDMA ile, bir kanalı alt bölümlere ayırarak çok kullanıcıli erişim sağlanmaktadır. MU-MIMO ile, farklı uzamsal akışları kullanarak çok kullanıcıli erişim sağlanmaktadır.

4. 802.11AX (WIFI 6) STANDARDI

802.11ax, günümüzün en büyük WiFi zorluklarını ele alan bir sonraki hızla meydana gelen IEEE standardı olmuştur: yüksek yoğunluk ve performans. Çeşitli ortamlarda hem 2,4 GHz hem de 5 GHz bantlarından faydalanmak için kapasiteyi dört kata kadar artırarak ve spektral verimliliği geliştirerek bu zorlukları gidermektedir [69].

IEEE 802.11ax, 802.11ac için evrimsel bir iyileştirmedir. Yüksek verimli (High Efficiency - HE) kablosuz olarak da bilinen 802.11ax'ın hedeflerinden biri, mevcut WiFi ağlarında daha yüksek verimlilik seviyeleri sağlamaktır [12]:

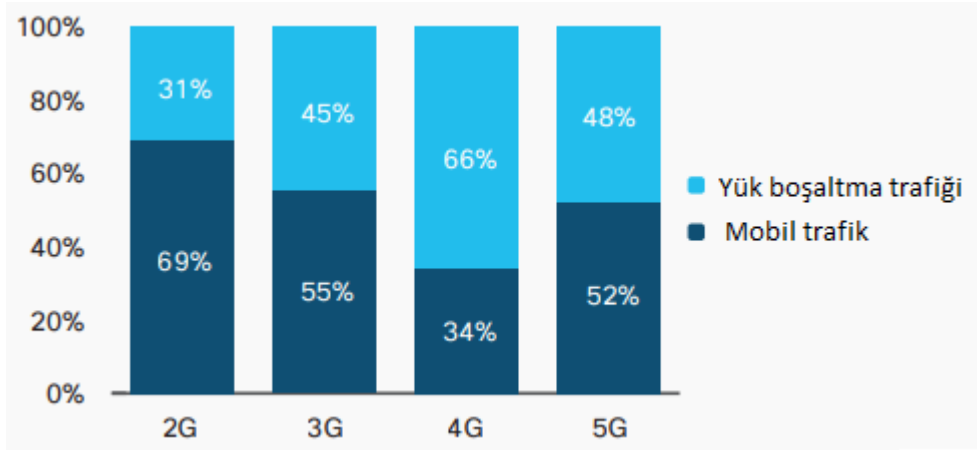
- Tipik WiFi ortamlarında yüksek veri hızlarını daha tutarlı bir şekilde sağlamakta bulunmaktadır
- Deneyim kalitesini (Quality of Experience - QoE) iyileştiren Temel Performans Göstergelerine (Key Performance Indicators - KPI) odaklanması gerekmektedir.

802.11ax sayesinde, yeni bir kanal paylaşım özelliği aracılığıyla istemci yoğunluğunu daha verimli bir şekilde ele alacak, enerjiyi korumak için AP'ler ve istemciler arasında uzlaşılın uyanma zamanı zamanlamasını kullanarak pil ömrünü iyileştirilecek ve 802.11ac'den en az dört kat daha fazla iş hacmiyle verimlilik iyileştirmeleri sağlanacaktır [8].

4.1. 802.11ax'ın Önemi

Önceki 802.11 tabanlı ağların incelenmesinde, her neslin kurumsal ağların genişletilmesini ve yoğunlaştırılmasını desteklemek için kullanıcılara artan verim ve kapsam sağladığını gösterilmektedir. Bununla birlikte, gelecekteki kablosuz ağlar düşünüldüğünde, gelecek neslin yalnızca bu devam eden genişlemeyi desteklemekle kalmayıp, aynı zamanda mevcut ağlara daha yüksek düzeyde hizmet sunması gerektiği de gösterilmektedir. Özellikle, 4K/8K videoyu desteklemeye yönelik artan bir ihtiyaç bulunmaktadır. Artırılmış ve sanal gerçeklik (Augmented Reality - AR / Virtual Reality - VR), ve kurumsal müşterilerimiz için IoT, hizmet sağlayıcı müşterilerimiz için ses gibi mobil çekirdek yeteneklerinin güvenilir bir uzantısına ek olarak, bunların tümü önceki WiFi nesillerinde elde edilenden daha yüksek derecede belirleyici davranış gerekmektedir [12,70].

Tarihsel olarak, her nesil hücresel (2G, 3G ve 4G), üstün hızları ve ekonomisi nedeniyle işletmeler de dahil olmak üzere WiFi'ye giderek daha fazla trafik yükledi. Gelecek için, en yeni hücresel teknolojinin (5G) bile, en iyi 802.11ax ve hücresel ile sağlanan, Şekil 4.1'de gösterildiği gibi, taşıyıcı sınıfı ses ve video hizmetlerini destekleyen önemli WiFi kapasitesi gerektireceği açık bulunmaktadır.



Şekil 4.1. Mobil yük boşaltma trafiği eğilimi (Cisco Görsel Ağ İndeksi) [12]

Önemli bir trend olan IoT, işletmeler için önemli bir zorluk oluşturmaktadır: Bunlardan biri de yüzlerce veya binlerce elektronik cihazın operasyonel ve mühendislik ihtiyaçlarıyla uyumlu kurumsal IT ağına nasıl güvenli ve kolay bir şekilde bağlanabilmektedir. Dizüstü bilgisayarlar gibi kullanıcı cihazlarının aksine, IoT cihazlarının ya belirleyici kablosuz hizmete ihtiyacı bulunmaktadır veya düşük güçlü hizmettir. Geleneksel olarak, bu ihtiyaçlar hizmet sağlayıcıya gibi özgü teknolojiyle karşılanmaktadır, ancak kurumsal WiFi, önemli ölçek ekonomileri ve IT tarafından yönetim kolaylığı nedeniyle iç mekân IoT platformu olarak giderek daha fazla tercih edilmektedir. Bu IoT operasyonel ihtiyaçlarını karşılamak için, 802.11ax ve düşük güç ve determinizm gibi IoT yeteneklerinin bu adaptasyonu hızlandırması beklenmektedir [45-46].

Gelecekte, kullanıcıların AR, VR veya Karma Gerçeklik (Mixed Reality - MR) teknolojisi aracılığıyla iş arkadaşlarına, iş ortaklarına ve müşterilere sanal olarak bağlandıkları bir işletme hayal edilebilmektedir (Zaten 2019’da yayımlanan Korona virüs sürecinde de olmaktadır) [47].

4.2. 802.11ax Hızı Nereden Gelmiştir?

En yüksek kablosuz hız, dört faktörün ürünüdür: kanal bant genişliği, takımyıldız yoğunluğu, uzamsal akış sayısı ve sembol başına ek yük. IEEE 802.11ax, 1024 QAM ekleyerek takımyıldız yoğunluğunu artırmaktadır, ancak esnek PHY zamanlama parametreleriyle sembol başına ek yükü daha önemli ölçüde iyileştirmektedir.

Birincisi, 256 QAM'den 1024 QAM'a geçiş, tepe hızlarını $10/8 = 1,25$ kat artırmaktadır. Birbirine daha yakın olan takımyıldız noktaları gürültüye karşı daha hassastır, bu nedenle 1024 QAM en çok daha kısa bir aralıkta yardımcı olur. 256 QAM daha güvenilirdir, ancak 1024 QAM, 256 QAM'den daha fazla spektrum veya daha fazla anten gerektirmemektedir. Mevcut fiziksel sistemler ile kolaylıkla uygulanabilmektedir [49].

İkincisi, 3,2 μ s sabit sembol süresinden (Time Symbol - T_s) ve sadece 400 veya 800 ns'lik iki Koruma Aralığından (Guard Intervals - GI) daha uzun bir T_s 'ye (12,8 μ s) ve üç koruma aralığı seçeneğine (0,8, 1,6 veya 3,2 μ s) hem daha yüksek hıza hem de gerektiğinde daha fazla güvenilirliğe izin verilmektedir. Matematiksel olarak, $GI + T_s$ oranı, 11ac için $3,2 \mu$ s / ($3,2 \mu$ s + 400 ns) veya yüzde 88,9'a kadar olan en yüksek zaman alanı verimliliğini belirler ve 802.11ax ile ise 12,8'e kadar ulaşılabilir. $(12,8 + 0,8) =$ Yüzde 5,9'luk en yüksek verim kazancı için yüzde 94 verimlilik ve yine de çok daha fazla çok yönlü sağlamlıktadır. Ayrıca 802.11ax ton planı, 80 MHz üzerinde 13.6 μ s ($T_s +$ minimum GI) başına 980 veri tonu (OFDMA alt taşıyıcıları) ile daha yoğundur, oysa aynı 80 MHz 802.11ac'de 234 veri tonu (OFDM alt taşıyıcıları) 3.6 μ s başına denk gelmektedir. Bu artan ton yoğunluğu, aynı spektrumdaki 802.11ac'ye göre yüzde 10'luk ek bir tepe çıkış kazancı ile sonuçlanmaktadır. Çünkü: $(980 / 13.6) / (234 / 3.6) = 1.1$ [12].

O zaman hız, uzamsal akışların sayısı ile doğru orantılıdır. Daha uzamsal akışlar, verici ve alıcıda daha fazla anten, RF konektörü ve RF zinciri gerekmektedir. Antenler 1/3 dalga boyunda (5,25 GHz'de 3/4 inç) veya daha fazla aralıklı olması gerekmektedir ve ek RF zincirleri ek güç tüketmektedir. Özellikle fiziksel ayırma gereksinimi, mobil cihazların büyük bir çoğunluğunu anten sayısını bir veya ikiyle sınırlandırmaya yönlendirmektedir. Bu eğilimin, yakında çıkacak 802.11ax uyumlu mobil cihazlar için değişmeden kalması beklenmektedir. Ancak, erişim noktaları için bu fiziksel kaynak kısıtlamaları o kadar katı değildir. Bu nedenle birinci dalga 802.11ax erişim noktalarının, günümüzde 802.11ac ürünlerinde sağlanan maksimum sayının iki katı olan 8 adede kadar uzamsal akışı desteklemesini beklenmektedir [59].

4.3. IEEE 802.11ax Tüpleri

1024 QAM kullanarak tek bir uzamsal akış içinde gigabit veri hızları sağlamak, düşük yoğunluklu kurumsal ortamlarda düzenli olarak elde edilen en yüksek teorik çıktı sunmaktadır. Ancak, istemci yoğunluğu (ve bunun sonucunda ortaya çıkan AP yoğunluğu) arttığında, kanal çekişmesi veya yayın süresi kullanımı aynı Temel Hizmet Seti (Basic Service Set - BSS) ve AP'da veya istemcilerden istemci kullanımından dolayı arttığında veya komşu veya çakışan bir BSS'deki (Overlapping-BSS - OBSS) erişim noktaları arttığında bu çıktılara ulaşma olasılığı azalmaktadır. Bu son bozulmaya genellikle, Radyo Frekansı (Radio Frequency - RF) yayılımının ideale yakın olduğu konferans odaları ve halka açık etkin noktalar gibi açık alan mekanlarında özellikle sorunlu olan Ortak Kanal Girişimi (Co-Channel Interference - CCI) olarak bahsedilmektedir [69].

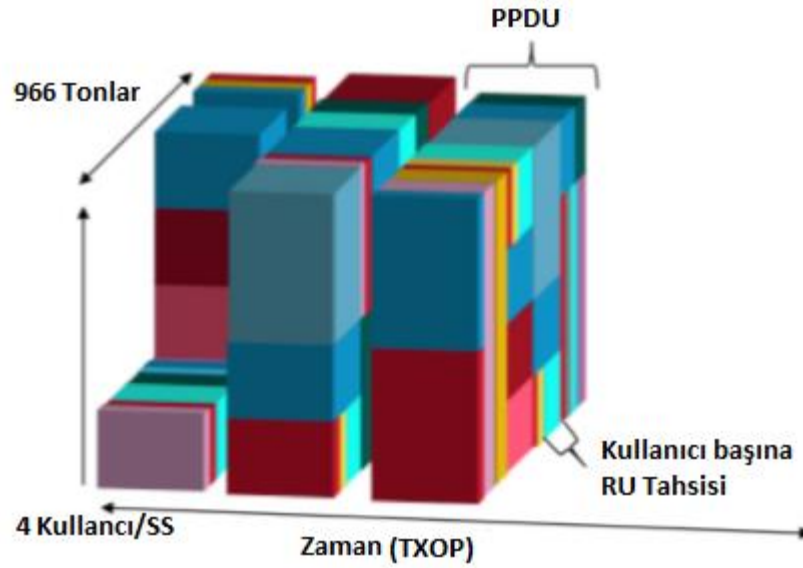
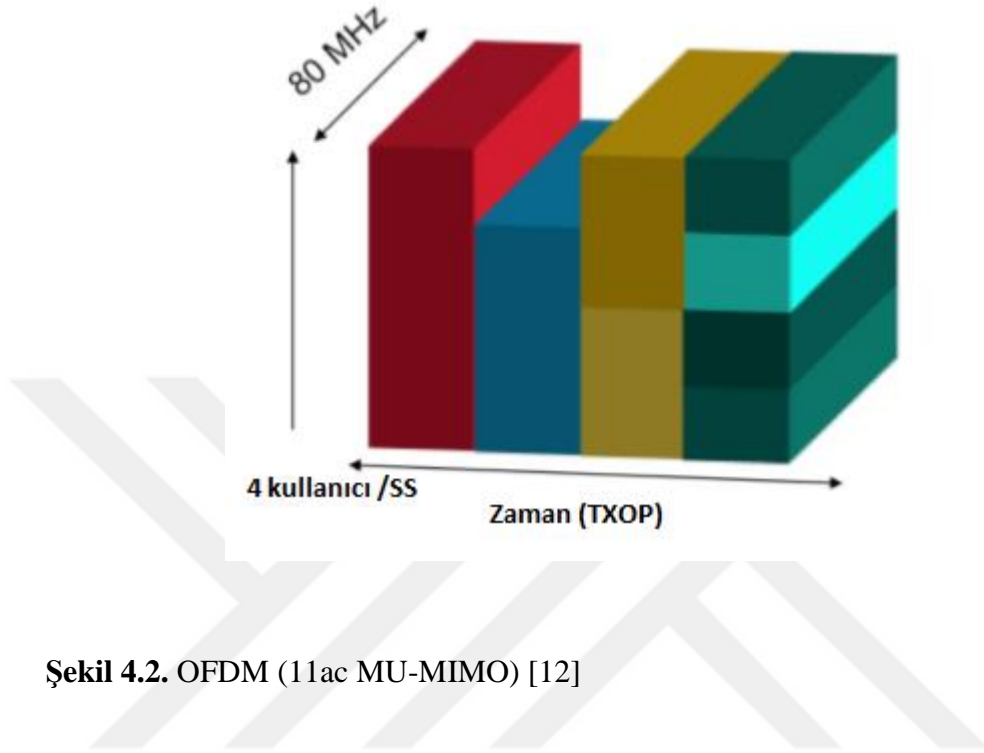
Bu iyi bilinen fenomenlerle mücadele etmek için 802.11ax, WiFi'nin lisanssız spektrumda sağlamlığını koruduğu için hücresele/LTE radyo ağlarına benzer ancak onlardan farklı yeni bir kanal erişim mekanizması olan OFDMA'yı sunmaktadır. İlk olarak, OFDMA, ilgili tek bir iletim fırsatı TXOP dahilinde hem DL hem de UL'deki birden çok istemciye çekişmesiz iletimi garanti etmektedir. İkinci olarak, UL OFDMA'ya çok kullanıcıli Gelişmiş Dağıtılmış Kanal Erişiminin (Enhanced Distributed Channel Access - EDCA) eklenmesiyle, AP'ın, 11ax ve 802.11ac istemcileri arasında bile istemcilerin göreceli kanal erişim önceliklerini etkilemesine izin verilir. Her iki şema da sadece daha verimli ve çekişme nedeniyle paket kaybına ve seğirmesine daha az eğilimli olmakla kalmamaktadır, aynı zamanda AP'ın hem UL hem de DL aktarımları üzerinde tam kontrol sahibi olmasına izin verdikleri için daha fazla determinizme de izin verilmektedir [8].

4.3.1. Kaynak Tahsisinin Üç Boyutu

802.11ac'de, birden çok kullanıcı alan ve zamana göre ayrılmaktadır. Zaman alanında iletim fırsatları, EDCA kullanılarak dağıtılmış bir şekilde müşterilere ve AP'a benzer şekilde tahsis edilmektedir. Uzamsal alanda, DL MU-MIMO teknikleri, verici antenlerin sayısı ile sınırlı izolasyon ve eş zamanlı yayın yetenekleri için kullanılmaktadır. Her iki teknik de Çok Kullanıcıli fiziksel Katman Protokol Veri Birimi (Multiuser Physical layer Protocol Data Unit - MU-PPDU) temelinde uygulanılmaktadır [13].

802.11ax'ta, 802.11ac ile aynı alan ve zaman ayrımını miras alınmaktadır, ancak üçüncü çok kullanıcıli boyut eklenmektedir. 802.11ac ile WiFi kanalı (20, 40, 80 veya 160 MHz), paraziti azaltmak için daha küçük OFDM alt kanallarından oluşan bir koleksiyona bölünmüştür, Şekil 4.1'de OFDM'i gösterildi. Herhangi bir zamanda, her bir PPDU tek bir kullanıcıya tüm bu alt taşıyıcılar tahsis edilmektedir. Bununla birlikte, OFDMA ile bireysel alt taşıyıcı grupları, istemcilere PPDU başına

bir kaynak birimi olarak ayrı ayrı tahsis edilmektedir [6]. Şekil 4.2’de OFDMA’ı gösterilmektedir.



Bu üçüncü boyutun (OFDMA), daha önce tartışıldığı gibi, çarpışmaların ve çekişmelerin azaltılması yoluyla determinizm ve artan verimlilik gibi birçok avantajı bulunmaktadır. Ama aynı zamanda QoS sunma şeklinde devrim yaratmaktadır. Önceden, 802.11ac ile bir AP bir istemciye belirli bir verimi sağlamak, ancak diğerine daha fazla verim sağlamak isterse yapabileceği en iyi şey zaman etki alanındaki doğru sayıda DL PDU'larını Zamanlamaktı (örneğin, kuyruklama ve şekillendirme ile teknikler) ve müşterinin UL-PDU'lar için yeterli sayıda TXOP tahsis edebileceğini *umulmaktadır*. Bu verimsizlik ve öngörülemezlik, iş hacmi, gecikme ve titreme gibi diğer KPI'lar hakkında herhangi bir güvence sağlamayı zorlaştırmaktadır [18].

OFDMA ile artık hem daha granüller bir DL kaynak birimi zaman + frekansa hem de ilk kez UL'deki kaynak birimlerini açık bir şekilde tahsis etmenin bir yoluna sahibi olabilmektedir. Bu çift yönlü kaynak-birim tahsis etme yeteneği LTE Kaynak Bloğuna (Resource Block - RB) benzer ve 5G terminolojisinde sanal bir kaynak veya *dilim* oluşumuna izin vermektedir. Tahmin edilebileceği gibi, bu 802.11ax dilim bant genişliği, gecikme ve titreşim gibi çeşitli özneliklere sahip olabilmektedir ve daha önce 802.11ac ile mevcut olandan daha ince taneli QoS'ye izin vermektedir [55].

4.3.2. Esnek Düşük Güçlü Cihaz Zamanlaması

Hedef Uyanma Süresi (Target Wake Time - TWT), orijinal olarak 802.11ah-2016 değişikliğinde tanımlanan bir güç tasarrufu mekanizmasıdır. TWT, güç tasarrufu modundaki istemciler için planlanmış bir hedef uyanma süresi belirlemek için AP ile WiFi istemcileri arasındaki beklenen trafik etkinliğine dayalı, üzerinde anlaşılabilir bir anlaşmadır. Güç Tasarrufu (Power Save - PS) avantajlarına ek olarak, görüşülen TWT'ler, bir AP'nin, istemci istasyonlarını farklı zamanlarda çalışacak şekilde

planlayarak ve böylece müşteriler arasındaki çekişmeyi en aza indirerek müşteri etkinliğini yönetmesine izin vermektedir [69].

TWT, PS modundaki bir istemcinin uyanık kalması için gereken süreyi azaltmaktadır. Bu, müşterinin daha uzun süre uyumasını sağlamaktadır ve enerji tüketimini azaltmaktadır. Uyuyan istemci cihazlarının mikro saniye aralıklarla uyanmasını gerektiren eski istemci güç tasarrufu mekanizmalarının aksine TWT teorik olarak istemci cihazlarının saatlerce uyumasına izin verebilmektedir. Bu nedenle TWT, pil ömrünü korumaya ihtiyaç duyan mobil cihazlar ve IoT cihazları için ideal bir PS yöntemidir [8].

IoT cihaz üreticilerinin, Bluetooth Mesh, *Thread* ve *Zigbee* gibi diğer iletişim teknolojilerinin aksine, IoT cihazlarında 802.11ax telsizlerinden yararlanıp yararlanmayacağı henüz belli olmamaktadır. TWT kurulum çerçeveleri, planlanmış bir TWT'yi görüşmek için AP ile istemci arasında kullanılmaktadır. Her 802.11ax istemcisi için, farklı uygulama trafiği türleri için 8 adede kadar ayrı müzakere edilmiş zamanlanmış uyandırma anlaşması olabilmektedir. 802.11ax ayrıca TWT işlevselliğini anlaşmalı olmayan bir TWT özelliğini içerecek şekilde genişletmiştir. Bir AP, uyandırma programları oluşturabilmesi ve TWT değerlerini 802.11ax istemcilerine yayın TWT prosedürü aracılığıyla teslim edebilmektedir [9].

4.3.3. OFDMA ve Kaynak Birimi Tahsisi

Aynı PPDU'daki her bir istemciye veya STA bir kaynak birimi, bir dizi bitişik OFDMA alt taşıyıcı "*tonlar*" tahsis etme yeteneği, 802.11 ailesi içindeki 802.11ax'a özgüdür. En küçük kaynak birimi 26 ton (2 MHz) ve en büyüğü 2 x 996 ton (160 MHz) ile toplam (ortalama) performansı ve en yüksek verimi dengelemek için büyük ölçüde esneklik bulunmaktadır. Aynı zamanda 802.11ax, çok kullanıcı

MIMO'yu desteklemektedir ve her STA'ya 1 ila 8 Uzamsal Akış (Spatial Stream - SS) atayabilmektedir.

Genel DL OFDMA işlemi aşağıdaki gibidir [12]:

- AP, bu TXOP'ta kaç STA'ya ve her bir kaynak biriminin boyutuna karar vermektedir ve bunu PPDU'nun önsözündeki bir alanda belirtmektedir.
- AP, DL verilerini, tahsis edilen kaynak birimindeki (MU-PPDU) birden çok STA'ya iletmektedir.
- AP, tüm STA'lardan 'MU-BAR' blok onayı istenmektedir.
- STA'lar blok kabul (Acknowledgment - ACK)'larını AP'na 'M-BA' geri göndermektedir.

Genel UL OFDMA işlemi aşağıdaki gibidir [12]:

- AP, hangi STA'ların veri için sorulması gerektiğine ve her birine kaç kaynak biriminin tahsis edileceğine karar vermektedir.
- AP, bir tetikleyici (HE Tetikleyici) ile STA'dan veri ister veya sorgulamaktadır.
- STA'lar verilerle yanıt vermektedir (UL MU-PPDU).
- AP bir ACK (M-BA) ile yanıt vermektedir.

802.11ac'den farklı olarak, 802.11ax AP, PPDU bazında DL ve UL kaynak birimi tahsisinin kontrolündedir ve bu, bir AP zamanlaması biçimi olarak görülebilmektedir (frekans ve uzamsal alanlarda). 802.11ax resmi olarak lisanslı spektrumlu LTE'ye benzer zaman tabanlı zamanlamayı belirtmese de hücrel olarak benzer sonuçlar elde etmek için gelişmiş kuyrukluma veya QoS tekniklerinin

kullanıldığı düşünölebilmektedir, çünkü temel çerçeve, saf bir 802.11ax ağı mükemmel spektrum ve girişim yönetimi yetenekleri zaten mevcuttur [10].

Artırılmış ve sanal gerçeklik ve IoT gibi görev açısından kritik ve gecikmeye duyarlı uygulamalar için, AP zamanlama yeteneği, daha yüksek verimli iş hacmi ve determinizmin istenen özelliklerini elde etmek için kritik öneme sahiptir. Benzer şekilde, STA iyi bir deneyim elde etmek için AP'ın direktiflerini desteklemesi gerekmektedir. Bu alan, satıcıların ayırt etmesi beklenen ve özellikle AP ile STA arasındaki birlikte çalışabilirliğin en yüksek performansa ulaşmada anahtar rol oynayacağı bir alandır [14].

Aktarım hızında, örneğin, yalnızca 4 STA ile 802.11ax DL verimi (büyük 1500B paketlerle), 802.11ac'den yalnızca yüzde 10 daha yüksektir, ancak UL verimi, 802.11ac'in 2,2 katıdır (veya yüzde 120 kazanç). Genel olarak, her bir TXOP veya kanal erişiminde ne kadar çok istemci ve AP hizmet vermektense, AP, özellikle ses, video veya TCP ACK'ları gibi küçük paketlerde ulaştığı 802,11ac'den daha fazla verimlilik sağlanmaktadır [15].

4.3.4. 1024 QAM Kavramı

1024 QAM'in 802.11ax'a girişı, iki yeni MCS 10 ve 11 oluşturmak için 3/4 ve 5/6 kodlama hızlarıyla eşleştirilerek sağlanmıştır. 802.11ac 256 QAM üzerinden ham hız kazancı yüzde 10/8 veya 25 olup, 802.11ax'ı tek bir antenle gigabit hızları sağlayabilen ilk ticari kablosuz teknoloji haline getirmektedir. [69].

1024 QAM'in genel hücre çıkışı üzerindeki etkisinin daha küçük, daha yoğun hücreler için (<2500 ft²), daha büyük hücrelere (> 5000 ft) göre daha büyük olması beklenirken, 4,8 Gbps'lik en yüksek hızlar, kapsamlı işletme gibi yeni özellikleri

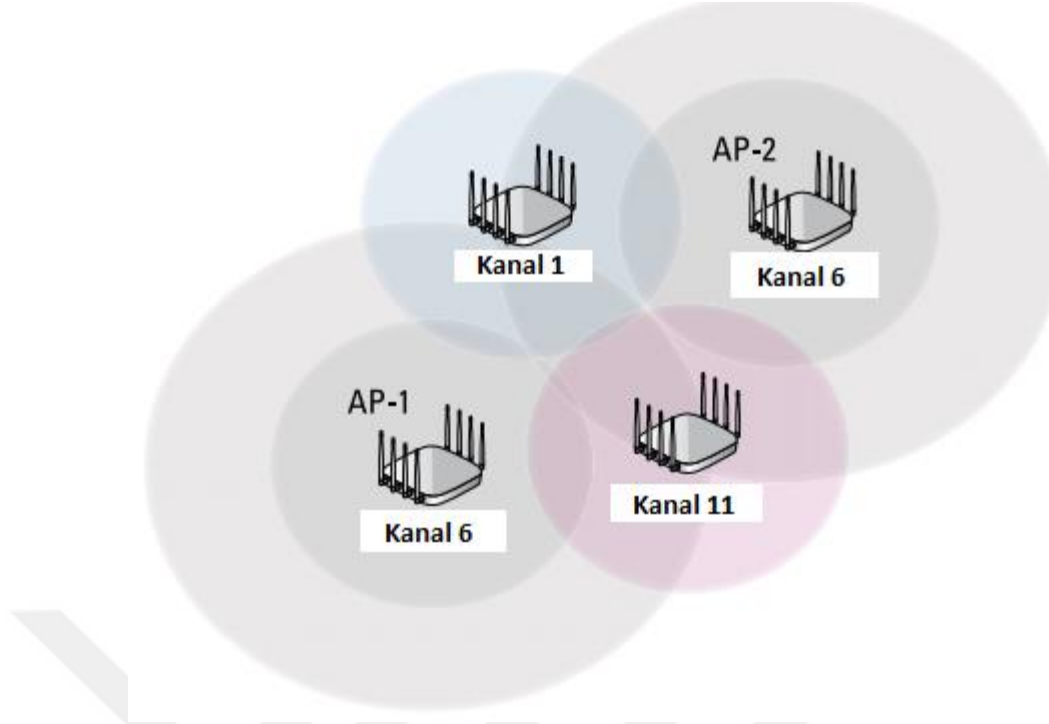
etkinleştirecektir. Kablosuz kulaklıkları kullanarak sanal gerçekliği sınıflandırma, çok uygun bir sonuçtur [12].

Bu yüksek hızın maliyeti yüzde 50 daha dar takımyıldız noktalarıdır ve bu da yaklaşık 6 dB daha yüksek SNR gereksinimi ile sonuçlanmaktadır. Bununla birlikte, 802.11ac'den farklı olarak 802.11ax, 8 x Tx ve 8 x Rx antenlerini destekleyecek şekilde tasarlanmıştır ve bu açığı kapatmak için daha fazla iletim huzmesi biçimlendirmesi ve Maksimum Oran Birleştirme (MRC) kazançları sağlamaktadır.

4.3.5. Mekânsal Yeniden Kullanım (Spatial Reuse - SR) ve OBSS Operasyonu

WiFi, herhangi bir zamanda bir frekans alanında veya kanalda yalnızca bir telsizin iletebileceği yarı çift yönlü bir ortam olan RF iletişimini kullanmaktadır. Herkes sırayla gelmesi gerekmektedir çünkü herkes aynı anda *konusursa*, hiç kimse dinlemediği için hiçbir veri iletilmemektedir [9].

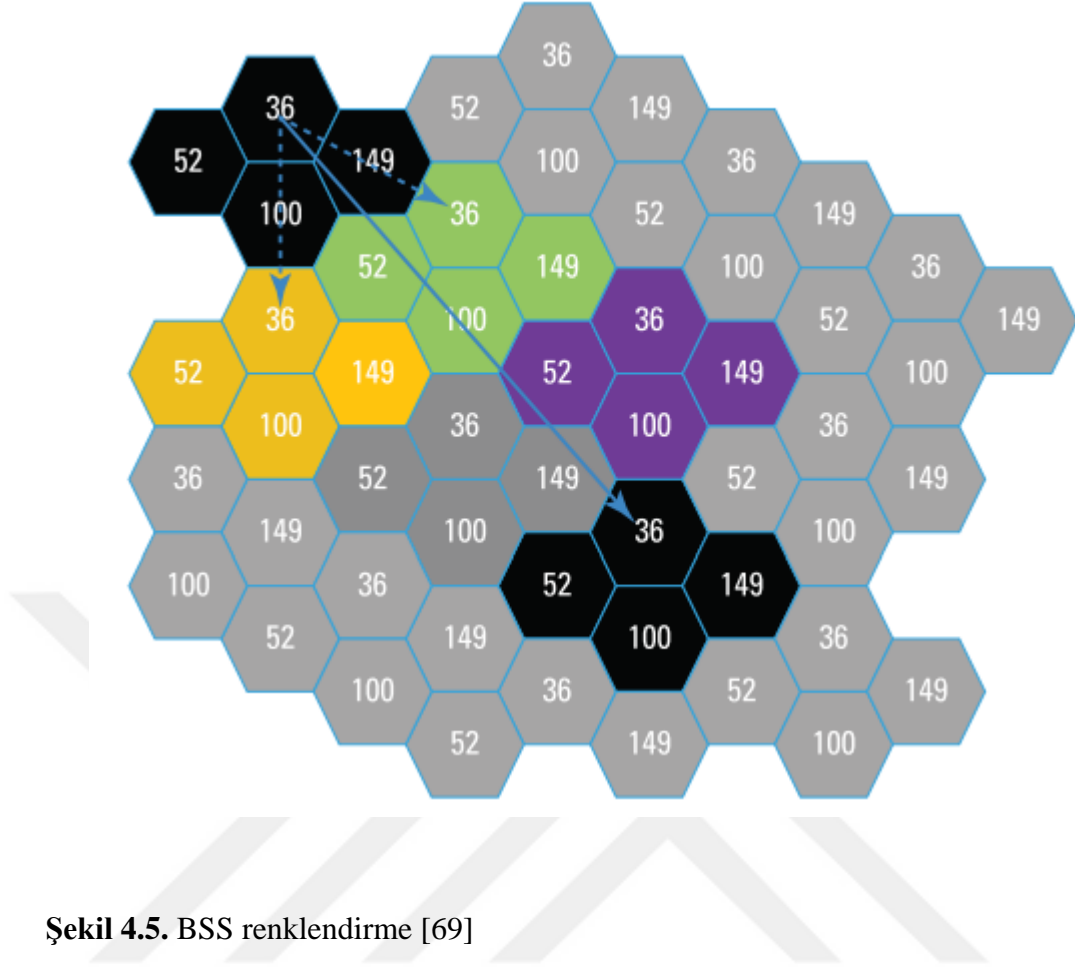
Çoklu Erişim Çarpışmasından Kaçınma ile Taşıyıcı Algılama (Carrier Sense with Multiple Access Collision Avoidance - CSMA/CA), herhangi bir zamanda aynı kanalda yalnızca bir telsizin iletim yapabilmesini sağlamak için WiFi ağlarında kullanılan yöntemdir. Bir 802.11 radyo, dört desibel (Decibel - dB) veya daha büyük bir Sinyal Algılama (Signal Detect - SD) eşiğinde diğer herhangi bir 802.11 PHY başlangıç eki iletimlerini duyarsa iletimleri erteleyecektir. CSMA/CA, mevcut bant genişliğinin çoğunu kullanmaktadır. Bu soruna çekişme ek yükü denilmektedir. Çok fazla AP ve istemcinin aynı kanalda birbirini duyması durumunda ortaya çıkan gereksiz orta çekişme ek yüküne, Şekil 4.4'te gösterilen, genellikle CCI olarak da adlandırılan, OBSS denilmektedir [6].



Şekil 4.4. OBSS - Çakışan temel hizmet seti [69]

Örneğin, kanal 6'daki AP-1 yakındaki bir AP'nin AP-2 başlangıç ekini duymaktaysa, ayrıca kanal 6'da da iletim yapmaktaysa, AP-1 erteleyecektir ve aynı anda iletim yapamamaktadır. Örneğin, kanal 6'daki AP-1 yakındaki bir AP'nin AP-2 başlangıç ekini duymaktaysa, ayrıca kanal 6'da da iletim yapmaktaysa, AP-1 erteleyecektir ve aynı anda iletim yapamamaktadır. Tüm bu ertelemeler orta çekişme ek yükü yaratmaktadır ve değerli yayın süresini tüketir çünkü aynı kanalda OBSS tarzında birbirini duyabilen iki temel hizmet setiniz bulunmaktadır [12].

802.11ax ayrıca, genellikle BSS renklendirme olarak adlandırılan, mekânsal yeniden kullanımı geliştirerek OBSS sorununu ele almakla görevlendirilmiştir. BSS renklendirme, her BSS'ye 802.11ax çerçevesinin PHY başlığına eklenen 0 ile 7 arasında bir sayı olan farklı bir "renk" atayarak OBSS'den kaynaklanan orta çekişme ek yükünü bir ortamda ele almak için orijinal olarak 802.11ah'da tanımlanan bir mekanizmadır. Şekil 4.5'te gösterilmektedir.



Şekil 4.5. BSS renklendirme [69]

BSS renklendirme, bir 802.11ax çerçeve iletiminin PHY başlığında bir renk biti algılamaktadır. Bu, eski 802.11a/b/g/n istemcilerinin farklı bir PHY başlık biçimi kullanılmışları için renk bitlerini yorumlayamayacağı anlamına gelmektedir.

Bir 802.11ax radyo ortamı dinlerken ve başka bir 802.11ax radyo tarafından gönderilen bir 802.11ax çerçevesinin PHY başlığını duyduğunda, dinleyen radyo, ileten radyonun BSS renk bitini kontrol edecektir. Kanal erişimi algılanan renge bağlıdır [12]:

- Renk biti aynıysa, çerçeve bir BSS içi iletim olarak kabul edilmektedir ve dinleyen radyo erteleyecektir.

- Renk biti farklıysa, çerçeve bir OBSS'den gelen bir BSS iletimi olarak kabul edilmektedir ve dinleyen radyo ortamı yalnızca renk bitinin farklı olduğunu belirlemek için geçen süre boyunca meşgul olarak değerlendirmektedir.

802.11ax telsizleri, mekânsal yeniden kullanım verimliliğini ve performansını iyileştirmek için BSS'nin rengine göre taşıyıcı algılama işlemini ayarlayabilmektedir. Trafiğin oluşturulduğu BSS'ye bağlı olarak, istasyon iletmek veya ertelemek için farklı hassasiyet eşikleri kullanılabilir. Bu, daha yüksek genel performansla sonuçlanmaktadır. Uyarlanabilir Temiz Kanal Değerlendirmesi (Clear Channel Assessment - CCA) kullanılarak, bir 802.11ax telsiz, BSS içi çerçeveler için daha düşük bir eşik korurken, BSS arası çerçeveler için SD eşiklerini yükseltebilmektedir. Böylece BSS renklendirmesi, mevcut düşük SD eşiklerinin belirtisi olan kanal çekişme problemini potansiyel olarak azaltabilmektedir [8].

802.11 CSMA tabanlı ağlar dahil herhangi bir kablosuz sistemde, aynı RF kanalını aynı fiziksel alanda paylaşmak her zaman zor olmuştur. 802.11 bunu alternatiflerden daha sağlam ve nazik bir şekilde yapsa da STAs ve erişim noktaları kendi QoE en üst düzeye çıkarmak için yine de bağımsız olarak hareket etmektedir. Örneğin, bazı istemciler, ilişkili erişim noktalarının yakınlığı göz önüne alındığında çok fazla güç kullanabilmektedir, gereksiz parazit yaratabilir veya parazit nedeniyle çok az güç kullanabilmektedir ve AP'a ulaşmayabilmektedir [9].

Kritik olarak, bir STA'nın kanalı (iletmek için serbest) olduğunu RSSI veya bizim Taşıyıcı Algılama (Carrier Sens - CS) dediğimiz şey, asgari performans beklentilerine dayalı olarak tarihsel olarak muhafazakâr olmuştur ve pratikte performansı iyileştirmek için bireysel satıcılar tarafından desteklenmiştir. Bununla birlikte, 802.11ax, dört kavramı resmileştirerek optimum performans iyileştirmelerini sağlamak için bu davranışı standartlaştırır [12]:

- OBSS, STA'nın ilişkili olduğu bir BSS (yani AP ve bunun ilişkili STA'lar) ile STA'nın ilişkili olmadığı komşu bir BSS arasındaki örtüşme veya girişimdir.
- BSS Color, aynı RF kanalındaki BSS'leri (yani erişim noktaları ve istemcileri) ayırt etme yöntemidir.
- OBSS Paket Algılama (Packet Detection - PD), diğer BSS'lerden (OBSS) gelen sinyalleri algılama yeteneğidir.
- CCA eşik kontrolü, bir cihazın CCA hassasiyetini ilişkili AP ve mevcut aktarım temelinde değiştirme yeteneğidir.

Bu kavramları bir araya getirdiğinde, işletmeler ve hizmet sağlayıcılar tarafından kullanılanlar gibi yönetilen ağlardaki müdahaleleri etkin bir şekilde yönetme yeteneğine sahip bulunmaktadır. Spesifik olarak, bu özellikle, istemcilerin ve erişim noktalarının, gerekli paket algılama veya 'meşgul' sinyal eşikleri ve iletim gücü TX seviyeleri üzerinde dolaylı olarak anlaşmalarına izin verilmektedir.

BSS renklemesinin çalışması aşağıdaki gibidir [8]:

- Her BSS farklı bir 'renk' kullanmaktadır (sinyal başlangıcında veya SIG'de 6 bit).
- Her STA, ilişkilendirme üzerine kendi BSS'sini öğrenmektedir ve bu nedenle diğer BSS'ler OBSS'lerdir.
- Aynı BSS rengine sahip sinyaller, erteleme için düşük bir RSSI eşiği kullanmaktadır ve böylece aynı BSS'deki çarpışmaları azaltılmaktadır.
- Farklı bir BSS rengine sahip sinyaller, erteleme için daha yüksek bir RSSI eşiği kullanmaktadır ve böylece daha fazla eşzamanlı iletim sağlanmaktadır.

4.3.6. Aralıktaki Oran

802.11ax, daha yüksek hızlar sunmanın yanı sıra, 802.11a/g/n/ac'den daha geniş aralık sunmaktadır. Özellikle, minimum kaynak birimi tahsisi yoluyla (26 tonlu, 2 MHz) daha düşük etkili veri hızları, 802.11ac'ye göre 8 dB'ye kadar bir bağlantı bütçesi artışı sağlamak için kullanılabilir [69].

4.3.7. Özet

IEEE 802.11ax, kablosuz LAN'lar için heyecan verici yeni bir adımdır.

Bu altıncı nesil WiFi, yalnızca daha yüksek etkili hızlar sağlamakla kalmayacak, aynı zamanda aşağıdakiler de dahil olmak üzere yeni iş modellerini ve kullanım durumlarını mümkündür:

- Tam hizmet sağlayıcı taşıyıcı aktarımı
- IT / IoT yakınsaması
- Kurumsal düzeyde 4K / 8K video veya artırılmış veya sanal gerçeklik gibi gerçek zamanlı uygulamalar

Diğer son WiFi ilerlemelerinde olduğu gibi, 802.11ax geriye dönük olarak uyumludur, mevcut teknolojileri geliştirir ve onları daha verimli hale getirmektedir. Bu senaryo, istemci tabanı 802.11ax'a doğru yakınlıkla, sürekli artan kazançlarla zarif bir kurulu temel geçişi mümkündür. 802.11ax, teknoloji için istemci yoğunluğu gelişmeye devam edilmekteyse bile, kullanılabilirliği olduğu anda değerlendirmeye değerdir. Bu arada, kablosuz LAN'lara uzun vadeli yatırım yapmak isteyen kurumsal ve hizmet sağlayıcı müşteriler tarafından, 802.11ac erişim noktaları kesinlikle dikkate alınması gerekmektedir.

5. MATERYAL VE YÖNTEMLER

5.1. Veri Seti

Altı aktivite için iyi tahmin edilmiş bir CSI (WiFi İzleri) edinmiştir ve şimdi bununla ilgili bazı bilgileri açıklanacaktır.

Bu veri kümesi, 6 günde toplanan verilerden oluşturulmuştur. İlk üç gün, 6 aktiviteyi (el sallama, oturma, düşme, alkışlama, zıplama ve yürüme) gerçekleştiren farklı katılımcılardan oluşmaktadır. Diğer üç gün ise 5 aktiviteyi (el sallama, oturma, düşme, alkışlama ve yürüme) tekrar eden iki katılımcıdan oluşur. Her aktivite 50'den fazla denemede (her biri 5 saniye) çekim anında yakalanmıştır. Faaliyetlerin sabit başlangıç ve bitiş noktalarının olmaması açısından denemeler sürekli. Bu, farklı başlangıç ve bitiş noktalarındaki etkinlikleri yakalayan daha değişken bir veri kümesi oluşturmak için yapılmıştır.

Veri seti bilgileri [71]:

- KATKIDA BULUNANLAR: Twente Üniversitesi, Elektrik Mühendisliği Fakültesi, Matematik ve Bilgisayar Bilimleri Fakültesi, Yaygın Sistemler Grubu.
- YAYINCI: Araştırma Verileri için 4TU.Centre (<https://data.4tu.nl/portal>).
- GEOLOCATION: Öğrenci konutları.

5.2. CSI Tahminleri ve Görüşleri

Aynı AP'na gerçek zamanlı olarak bağlanan cihazlara CSI'ya bağlı olarak CSI'yı tahmin etmek için bir tahmin modeli oluşturmamız gerekmektedir. Bu bölümde, önce ML tabanlı CSI edinme yaklaşımını açıklanacak ve ardından LR modelinin ayrıntılı eğitim sürecini sağlanacaktır.

Önerilen makine öğrenimi tabanlı CSI edinme yaklaşımı üç adıma bölünebilmektedir: Çevrimdışı regresyon modeli eğitimi, çevrimiçi CSI hesaplaması ve çevrimiçi CSI tahmini. Bu adımlar sırasıyla ilerde açıklanacaktır.

5.2.1. Çevrimdışı Regresyon Modeli Eğitimi

Eğitim Seti Edinimi: N kanal gerçekleştirilmeleri sırasında en küçük kare LS tahminine ve h_1^T, \dots, h_N^T olarak tahmin edilen kanala dayalı olarak BS'deki tüm antenlerden kullanıcıya inen bağlantı CSI'sını ardışık olarak tahmin etmek için nispeten uzun pilot dizisini ve büyük gücü kullanılmaktadır.

Uzun pilot dizisi ve büyük güç, büyük bir ek yük gibi görünse de eğitilmiş regresyon modelleri ve vericideki (Channel State Information at the Transmitter - CSIT) alım ek yükündeki CSI uzun bir süre için önemli ölçüde azaltabildiği için buna değer olarak düşünülmektedir.

Regresyon modellerini eğitmek için kullanılacak eğitim seti matrisi H olsun. Eşitlik 5.1'de gösterilmektedir:

$$H = [h_1^T, \dots, h_N^T]^T \quad (5.2.15.1)$$

Ardından AP'deki antenlerin listesini A ve B olmak üzere iki alt gruba ayrılmıştır. $U = \{1,2, \dots, M\}$, AP'deki tüm antenlerin indekslerini içeren küme olsun, burada $A \cup B = U$ ve $A \cap B = \emptyset$. Örneğin, $A = \{1,3,5, \dots\}$ ve $B = \{2,4,6, \dots\}$ olarak tanımlanabilmektedir. Ayrıca, $A(i) = U(A(i))$ ve $B(i) = U(B(i))$ tanımlarına da sahip bulunmaktadır.

Bundan sonra H matrisini $H_I = [H]^A$ ve $H_O = [H]^B$ olarak iki alt matrise bölmektedir. İki regresyon modeli tanımlanacaktır:

- M_i^{Re} : A 'daki antenlerin CSI'sı ile $B(i)$ th antenin CSI'sının gerçek kısmı arasındaki ilişkiyi ortaya koymaktadır.
- M_i^{Im} : A 'daki antenlerin CSI'sı ile $B(i)$ th antenin CSI'sının hayali kısmı arasındaki ilişkiyi ortaya koymaktadır.

Bazı ifadeleri açıklanacak:

- $[Re \{H_I\}, Im\{H_I\}]$: M_i^{Re} modeline girdi olarak
- $Re\{H_O(:, i)\}$: M_i^{Re} modeline çıktı olarak. H_O 'nun i th sütununun gerçek kısmı.
- $[Re \{H_I\}, Im\{H_I\}]$: M_i^{Im} modeline girdi olarak.
- $Im\{H_O(:, i)\}$: M_i^{Im} modeline çıktı olarak. H_O 'nun i th sütununun hayal kısmı.

LR modeli $\check{h}_{n,A} = [Re ([h_n]^A), Im ([h_n]^A)] \in R^{1 \times 2 |A|}$ olsun, $B(i)$ th antenin CSI'sının gerçek kısmının tahmin değerini alma denklemi eşitlik 5.2'de verilmektedir:

$$f(\check{h}_{n,A}) = \check{h}_{n,A} \alpha_i + \beta_i, \quad i = 1, \dots, |B| \quad (5.2)$$

LR'yi daha uygun bir şekilde eğitmek için, $H_I = [Re(H_I), Im(H_I), 1] \in R^{N \times (2|A|+1)}$ ve $K_i^{Re} = [\alpha_{i1}, \dots, \alpha_{i(2|A|)}, \beta] \in R^{N \times 1}$ olsun. Sonra son denklem eşitlik 5.3 göstermektedir:

$$f(H_I(n,:)) = H_I(n,:)K_i^{Re} \quad i = 1, \dots, |B| \quad (5.3)$$

Optimal $K_i^{Re,*}$ eşitlik 5.4'te verilmektedir:

$$K_i^{Re,*} = (H_I^T H_I)^{-1} H_I^T Re(H_O(:, i)) \quad (5.4)$$

Optimal $K_i^{Im,*}$ eşitlik 5.5'te verilmektedir:

$$K_i^{Im,*} = (H_I^T H_I)^{-1} H_I^T Im(H_O(:, i)) \quad (5.5)$$

5.2.2. Çevrimiçi CSI Hesaplaması

Kullanıcı, LS tahminini kullanarak A 'daki antenlere karşılık gelen CSI'yi eşitlik 5.6'da göstermektedir:

$$\check{h}_A = yX^H(X X^H)^{-1} \quad (5.6)$$

- \check{h}_A , kod kitabı yöntemine dayalı olarak AP'ye geri bildirimdir.
- \hat{h}_A , kullanıcının kanal vektör geri bildirimini olsun.
- Hesaplanan $|A|$ - boyut kanalı vektörü olsun.

5.2.3. Çevrimiçi CSI Tahmini

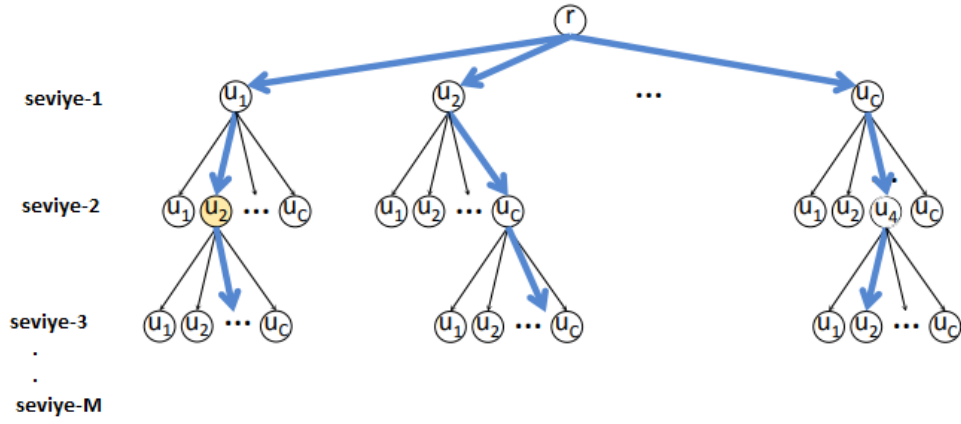
Yukarıda bahsettiğimiz gibi, \hat{h}_A , B 'deki antenlerin CSI'sını \hat{h}_B olarak tahmin etmek için eşitlik 5.7'de kullanılacaktır:

$$\begin{aligned} \hat{h}_B(i) = & M_i^{Re}([Re(\hat{h}_A), Im(\hat{h}_A)]) \\ & + j M_i^{Im}([Re(\hat{h}_A), Im(\hat{h}_A)]) \end{aligned} \quad (5.7)$$

5.3. MU-MIMO'nun Kullanıcı Gruplaması

Yukarıda detaylı olarak bahsettiğimiz gibi, hüzmleme gruplarının akıllıca seçilmesi toplam kapasiteyi artırmak yerine azaltabilmektedir. Burada, geniş arama alanıyla ilgili bir zorluk yaşanmaktadır. Bu nedenle, en iyi hüzmleme grubunu elde etmek için daha karmaşık algoritmalara sahip bulunmaktadır. SIEVE algoritmasını [7], bu algoritmanın en iyi hüzmleme grubunu aramaya sahip olduğu kullanıcı gruplama seçim yönteminde kullanılacaktır. Bu algoritmayı şu şekilde tanımlanabilmektedir:

SIEVE'in kullanıcı seçimi, dal ve sınır (branch-and-bound) genel algoritmasına bağlı olarak bir seferde küçük bir dizi iyi aday tutar ve ardından bu aday kümesini yinelemeli olarak iyileştirmektedir. Şekil 5.1'de, ağacın i seviyesindeki her bir tepe noktasının, i boyutuna sahip kullanıcıların bir alt kümesi olduğu problemi çözmek için algoritmanın numaralandırma ağacı gösterilmektedir. Alt küme, daldan köke kadar seçilen kullanıcıları içermektedir. Örneğin, Şekil 5.1'de, ikinci seviyedeki düz köşe, $\{u1, u2\}$ kombinasyonunu belirtir ve bu köşenin alt ağacı, $u1$ ve $u2$ 'yi içeren tüm kullanıcı kombinasyonlarını temsil etmektedir. Daha sonra her dallanma düzeyinde yalnızca *ilk* – K adaylarını tutar ve bu kötü kombinasyonları filtreler.



Şekil 5.1. SIEVE arama ağacı [7]

5.4. 802.11ax Zamanlama Algoritması

Yukarıda bahsedildiği gibi OFDMA kullanan 802.11ax standardı eski standartlara göre yüksek verimliliğe sahiptir. Spektrum bandı, kendisini destekleyen belirli bir boyuta sahip birden çok RU'ya bölünmüştür. Alt taşıyıcılardaki toplam oran aşağıdaki eşitlik 5.8'de verilmektedir:

$$R_{ZFBB}(s) = \sum_{k \in U_s} \log_2(1 + P_{k,s}) \quad (5.8)$$

U Bir dizi kullanıcının AP'ye bağlı olduğu durumda, U_s bir dizi kullanıcı AP'ye çerçeveler göndermeye ve $P_{k,s}$ gücü iletmeyekarar verdi. [10] 'da “kaidongw” ve “kpsounis” tarafından açıklanan özyinelemeli zamanlama algoritmasını kullanılacaktır.

5.4.1. RU'ların Soyutlanması

Yukarıda belirtildiği gibi, 26 alt taşıyıcıdan daha büyük her bir RU, iki küçük RU'ya bölünebilmektedir. Şekil 5.2'de gösterildiği gibi, tüm bant genişliği en fazla $L - 1$ kez bölünebilir ve burada L düzey sayıdır. Daha büyük bant genişliği daha fazla bölünebildiğinden, L tüm bant genişliği ile ilgilidir. 802.11ax, 20MHz, 40MHz, 80MHz ve 160MHz'yi desteklemektedir ve L , sırasıyla 4 ila 7 arasında değişmektedir.

Her bir RU, $RU(l, i)$ ile gösterilmektedir, burada l , orijinal RU'dan mevcut olana bölünme sayısıdır ve i , kendi seviyesindeki bir RU'nun indeksidir. $RU(0, 0)$ 'nın tüm bant genişliğini kaplayan RU'ya karşılık geldiğini unutmaması gerekmektedir. Tüm bant genişliği, l seviyesinde ($l \in \{0, 1, \dots, L - 1\}$), $0, 1, \dots, 2^l - 1$ olarak etiketlenen eşit büyüklükte 2^l RU'ya bölünebilmektedir. $L < L - 1$ Olan her RU $RU(l, i)$ iki RU'ya bölünebilmektedir $RU(l + 1, 2i)$ ve $RU(l + 1, 2i + 1)$. Bu gösterimi kullanarak, Şekil 5.2'de, bir 20MHz HE PDU'nun, RU'larını etiketlediğimiz bir örneği gösterilmektedir.

$l=3$	3,0	3,1	3,2	3,3	3,4	3,5	3,6	3,7
$l=2$	2,0		2,1		2,2		2,3	
$l=1$	1,0				1,1			
$l=0$	0,0							

Şekil 5.2. 20MHz HE PDU'nun RU'ları

5.4.2. Zamanlama ve Kaynak Tahsisi

Bir OFDMA iletiminde, tüm bant genişliği farklı seviyelerden RU'ların bir kombinasyonuna bölünebilmektedir. $P = \{p_j \dots\}$, Tüm bant genişliğinin geçerli bir

bölümü olsun, burada $p_j = RU(l_j, i_j)$, p 'deki j 'inci RU'dur ve P , tüm bölümlerin evrensel kümesi olsun. Örneğin, Şekil 5.3'te olası bir bölüm gösterilmektedir. Seviye 1'den 3'e kadar olan RU'lar, özellikle $p_0 = RU(2, 0)$, $p_1 = RU(3, 2)$, $p_2 = RU(3, 3)$ ve $p_3 = RU(1, 1)$ içermektedir.

2,0	3,2	3,3	1,1
-----	-----	-----	-----

Şekil 5.3. Bant genişliğinin geçerli bir bölümü

Bant genişliğinin geçerli bir bölümünü elde ettikten sonra, kullanıcıları RU'lara tahsis edilmesi gerekmektedir. $g = \{(p_j, u_j)\}$, $p_j = RU(l_j, i_j)$ 'nin tüm bant genişliğinin geçerli bir bölümünde j th RU olduğu ve u_j 'nin p_j 'ye ayrılan kullanıcı kümesinin olduğu geçerli bir kullanıcı programı olduğunu söyleyelim. Örneğin, Şekil 5.3'teki bölümle birlikte geçerli bir kullanıcı programı Çizelge 5.1'de gösterilmektedir.

Çizelge 5.1. Geçerli bir kullanıcı zamanlaması

j	p_j	u_j
0	(2, 0)	{3}
1	(3, 2)	{16}
2	(3, 3)	{5}
3	(1, 1)	{1, 7, 10, 15}

Bir $RU(l, i)$ üzerindeki Sıfır Zorlamalı Hüzmleme (Zero-Forcing Beamforming - ZFBF) kapasitesi, bu RU'nun bir parçası olan her bir alt taşıyıcıda elde edilen hızların toplanmasıyla eşitlik 5.9'da hesaplanabilmektedir.

$$R_{ZFBF}(RU(l, i)) = \sum_{s \in RU(l, i)} R_{ZFBF}(s) \quad (5.9)$$

O zaman, g'nin ZFBF kapasitesi eşitlik 5.10 ve 5.11 verilmektedir.

$$R_{ZFBF}(g) = \sum_j R_{ZFBF}(p_j) \quad (5.10)$$

$$\sum_j \sum_{s \in p_j} \sum_{k \in U_s} \log_2(1 + P_{k,s}) \quad (5.11)$$

5.4.3. Optimizasyon Probleminin Algoritması

Program ve Kaynak Tahsisi (Schedule and Resource Allocation - SRA) sorunu iki görevden oluşur:

- Bant genişliğini bir veya daha fazla RU'ya ayırmak
- RU'ları kullanıcılara (SU-MIMO) veya kullanıcı gruplarına (MU-MIMO) tahsis etmektir.

Kısıtlamalar şunlardır:

- Bir kullanıcı veya kullanıcı grubu yalnızca birden fazla RU ile atanabilmektedir.
- MU-MIMO iletimi yalnızca 106 alt taşıyıcıdan daha büyük RU'lar için geçerlidir, başka bir deyişle $l \leq L - 3$.
- $RU(l, i)$ Üzerinde tahsis edilen kullanıcı sayısı 1 ile $M(l)$ arasındadır.

$M(l)$, $RU(l, i)$ 'de izin verilen maksimum kullanıcı sayısıdır ve l 'nin bir fonksiyonudur. AP ortak MU-MIMO ve OFDMA modunda iletim yaparsa ve $l \leq L - 3$, $RU(l, i)$ MU-MIMO için kullanılabilir ve $M(l) = \lfloor N_T/N_R \rfloor$, aksi takdirde $RU(l, i)$ SU-MIMO kullanılmaktadır ve $M(l) = 1$. Yukarıdaki tüm kısıtlamalarla, 802.11ax'ın SRA'sı bir optimizasyon problemi eşitlik 5.12'den oluşturulabilir.

$$\begin{aligned}
 & \max_{g \in G} R_{ZFBF}(g) \\
 & \text{st } 0 \leq \sum_j c_{j,k} \leq 1 \\
 & 1 \leq \sum_k c_{j,k} \leq M(l_j) \\
 & c_{j,k} \in \{0,1\},
 \end{aligned} \tag{5.12}$$

Burada $c_{j,k}$, k kullanıcısının j th RU'da tahsis edilip edilmediğini gösterir ve G , tüm geçerli kullanıcı zamanlama kümesidir.

Algoritma hakkında daha fazla ayrıntı için, Şekil 5.4'te sağlanan kaba kodunu bulunmaktadır:

ALGORİTMA 1 RECURSIVE-SCHEDULING(U, l, i)

Gerek:

Tüm kullanıcıların CSI'si

- 1: // problemi iki alt probleme ayırın
 - 2: **if** $l < L - 1$ **then**
 - 3: // Solve the SRA on $RU(l + 1, 2i)$ first
 - 4: $g_{opt}(l + 1, 2i) = \text{RECURSIVE-SCHEDULING}(U, l + 1, 2i)$
 - 5: $U_c = U - \{u | u \in g_{opt}(l + 1, 2i)\}$
 - 6: $g'_{opt}(l + 1, 2i + 1) = \text{RECURSIVE-SCHEDULING}(U_c, l + 1, 2i + 1)$
 - 7: $g_m(l, i) = \text{MERGE}(g_{opt}(l + 1, 2i), g'_{opt}(l + 1, 2i + 1))$
 - 8: // Solve the SRA on $RU(l + 1, 2i + 1)$ first
 - 9: $g_{opt}(l + 1, 2i + 1) = \text{RECURSIVE-SCHEDULING}(U, l + 1, 2i + 1)$
 - 10: $U'_c = U - \{u | u \in g_{opt}(l + 1, 2i + 1)\}$
 - 11: $g'_{opt}(l + 1, 2i) = \text{RECURSIVE-SCHEDULING}(U'_c, l + 1, 2i)$
 - 12: $g'_m(l, i) = \text{MERGE}(g'_{opt}(l + 1, 2i), g_{opt}(l + 1, 2i + 1))$
 - 13: **end if**
 - 14: //User grouping on $RU(l, i)$
 - 15: $g_s(l, i) = \text{USER-SELECTION}(U, l, i)$
 - 16: $G = \{g_m(l, i), g'_m(l, i), g_s(l, i)\}$
 - 17: //Select the optimal user schedule from G
 - 18: $g_{opt}(l, i) = \arg \max_{g \in G} (R_{ZFBF}(g))$
 - 19: **return** $g_{opt}(l, i)$
-

Şekil 5.4. Özyinelemeli zamanlama algoritmasının sözde kodu [10]

15. satırdaki "*User – SELECTION* (U, l, i)" yöntemi son bölümde açıklanmıştır, sözde kodu şekil 5.5'te gösterilmiştir:

Algoritma 2 SIEVE-SEARCH(C, M)

Gerek: C : bir dizi kullanıcı, M : AP'nin anten sayısı

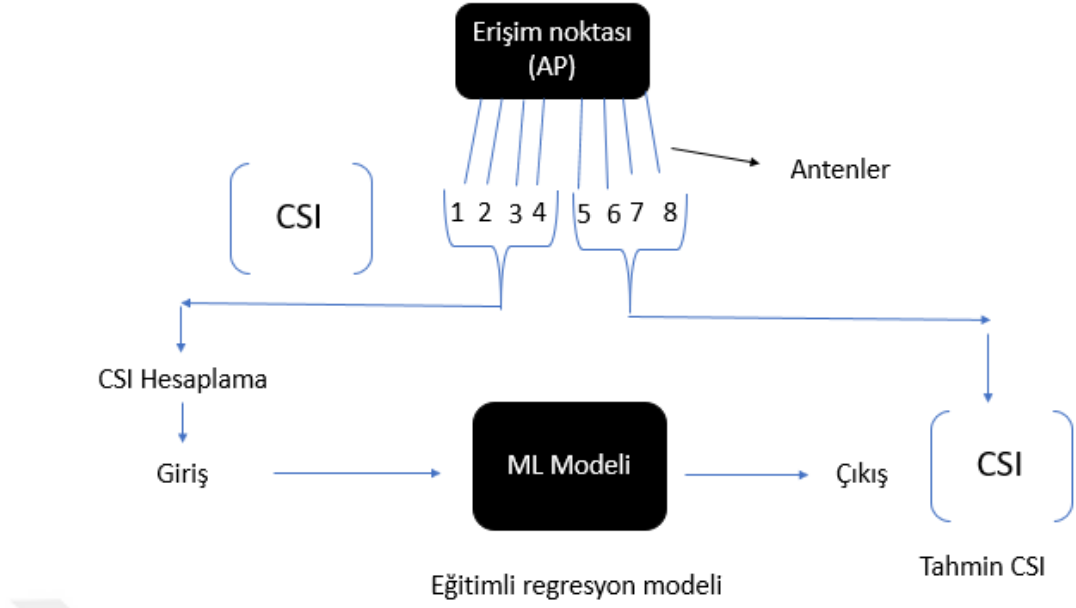
$S(k)$: aramanın Nth yinelemede seçilmiş kullanıcılar kümesi

```
1:  $\mathcal{T} \leftarrow \{\}, S \leftarrow \{\}$  // initialize the sets of trees and selected combinations
2:  $k \leftarrow 1$ 
3: while  $C \neq \{\}$  do
4:    $\mathcal{T}_0^k \leftarrow \{\}$  K'inci yinelemenin ağacını başlat
5:   for  $i := 1$  to  $M$  do
6:     // sonraki seviyeye dal
7:      $G_i \leftarrow \{G \cup \{c\} : G \in \mathcal{T}_{i-1}^k, c \in C \setminus G\}$ 
8:     bir aday grubun toplam oranını hesaplamak
9:     aday kombinasyonu sırala
10:     $\mathcal{T}_i^k \leftarrow$  Top K
11:  end for
12:   $S^k \leftarrow \operatorname{argmax}_{1 \leq i \leq M, G \in \mathcal{T}_i^k} r(G)$  en iyisini seç
13:   $S \leftarrow S \cup S^k, C \leftarrow C \setminus S^k, \mathcal{T} \leftarrow \mathcal{T} \cup \mathcal{T}^k$ 
14:   $k \leftarrow k + 1$ 
15: end while
16: return  $S, \mathcal{T}$ 
```

Şekil 5.5. Kullanıcı seçim algoritmasının sözde kodu [7]

5.5. Önerilen Algoritma

İlk olarak, AP'nin antenlerini iki alt gruba ayrılmaktadır ve sonra ilkinin CSI'sını tahmin edilmektedir. Bundan sonra, Şekil 5.6'da gösterildiği gibi ikinci alt küme için CSI'yı tahmin etmek için regresyon modeline girdi olarak birinci alt kümenin CSI'sını kullanılmıştır. Bunu yaparak artık tüm antenlerin CSI'sına sahip olunmaktadır. Daha sonra, Şekil 4'te gösterildiği gibi 802.11ax zamanlama algoritmasını uygulanmıştır ve Şekil 5.6'te gösterildiği gibi 106 alt taşıyıcıya eşit veya daha büyük olan RU'lar için kullanıcı seçim yöntemini uygulanmıştır.



Şekil 5.6. CSI tahmin yöntemi

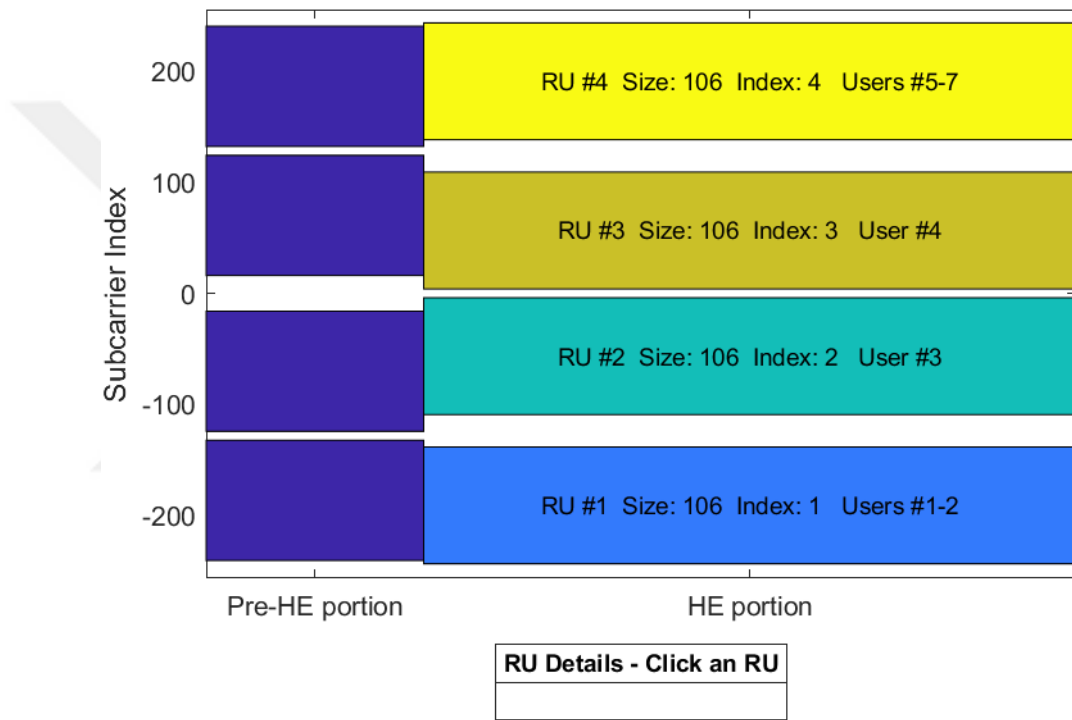
Algoritmamızı aşağıdaki adımlardaki gibi tanımlanabilmektedir:

- AP antenlerini (U) iki alt grup A, B 'ye bölünmektedir. Lakin $A \cup B = U$ Ve $A \cap B = \emptyset$ şarttır.
- H_A , birinci alt küme A 'nın CSI'si olsun: $H_A = [Re \{H_A\}, Im\{H_A\}]$
- Çevrimiçi CSI tahmininde gösterildiği gibi regresyon modelini uygulayarak H_B 'yi hesaplanabilmektedir: $H_B = M_i^{Re}([Re (H_A), Im(H_A)]) + j M_i^{Im}([Re (H_A), Im(H_A)])$
- Tüm antenlerin CSI'si artık 802.11ax zamanlama Algoritmasında girdi olarak uygulanmaya hazırdır: “*Recursive – Scheduling (U, l, i)*”

5.6. Simülasyon Sonuçları

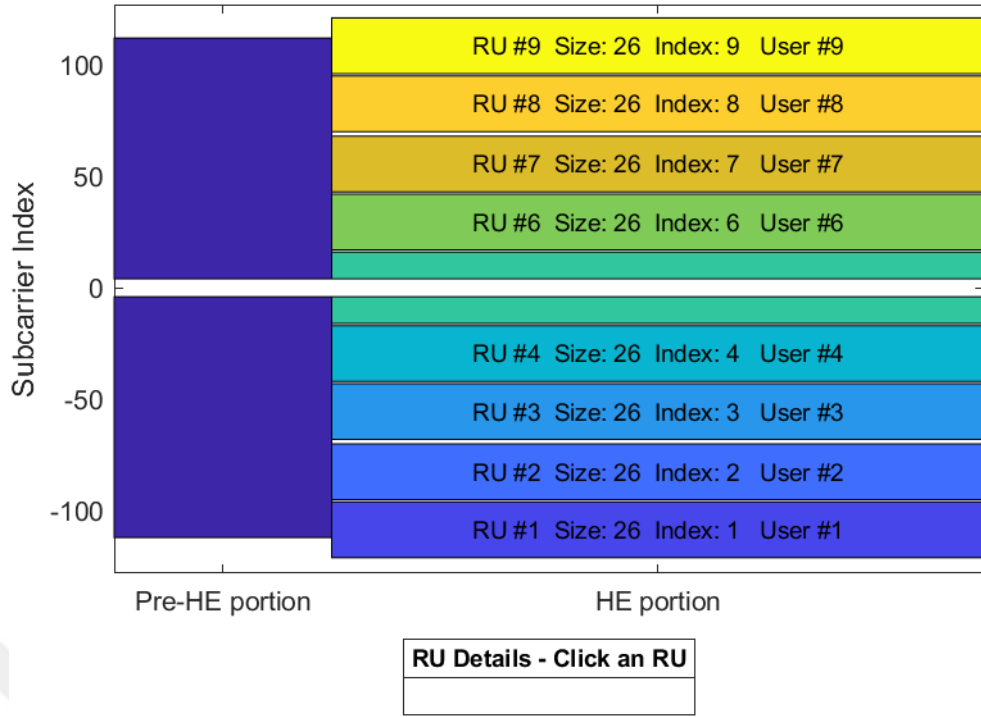
Simülasyonlarda eski ve yeni algoritmalar değerlendirilmiştir. MATLAB'da 'WlanHEMUConfig' nesnesi kullanılarak bölünen 802.11ax RU'lar bir örnektir.

Şekil 5.7'de, 40MHz bant genişliğinin, her birinin boyutu 106 alt taşıyıcının bulunduğu 4 RU'ya bölündüğü gösterilmektedir.



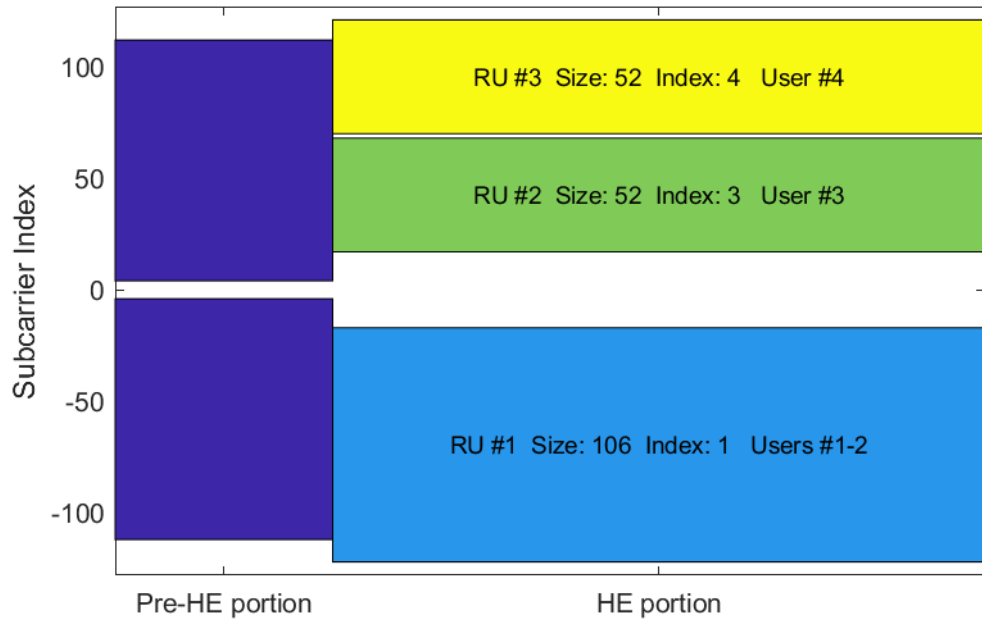
Şekil 5.7. 40MHz, 4 RUs (106)

Şekil 5.8'de gösterilen 20MHz bant genişliği, 26 alt taşıyıcıya sahip 9 RU'ya bölünmüştür.



Şekil 5.8. 20MHz, 9 RUs (26)

Şekil 5.9’da 20 MHz bant genişliğinin 3 RU’ya bölündüğü, ancak iki RU’nun 52 boyutta alt taşıyıcıya ve üçüncünün 106 alt taşıyıcıya sahip olduğu gösterilmektedir.



RU Details - Click an RU

Şekil 5.9. 20MHz, 3 RUs (106, 52, 52)

6. SONUÇLAR

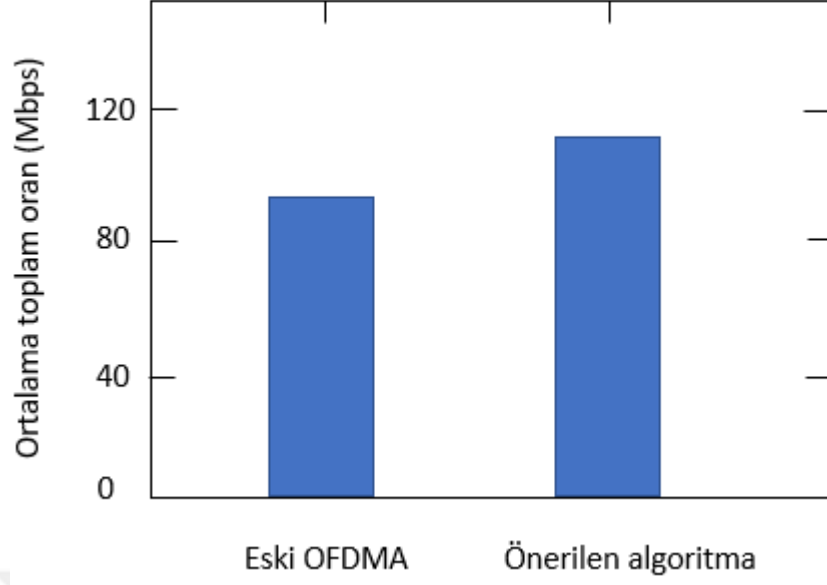
Sunulan algoritma simülasyonlarda değerlendirilmiştir. MATLAB'daki WINNER II modeline göre kablosuz kanalın WINNER II modeliyle modellenebileceği, merkezi frekansı 5GHz olan $5m \times 5m$ ofis alanında tek bir 802.11ax BBS'de DL-MU iletimlerini düşünülmektedir.

Simülasyonlar için kapalı ofis A1 görüş hattı olmayan (Non-Line-Of-Sight - NLOS) senaryosunu seçilmektedir. Her simülasyon senaryosu için AP'nin konumunu sabit tutulmaktadır ve kullanıcıları rastgele dağıtarak birçok farklı topoloji oluşturulmaktadır. Daha sonra, regresyon modelimizle hem eski OFDMA hem de önerilen OFDMA altındaki toplam oranının ortalama değerini rapor edilmektedir. Son olarak ise tüm simülasyonlarda, OFDMA zamanlama algoritması olarak RECURSIVE-SCHEDULING [10] ve kullanıcı gruplama algoritması olarak SIEVE [7] kullanılmaktadır.

Şimdi ise birden çok simülasyon senaryosunu aşağıdakiler gibi uygulanacaktır:

Senaryo 1: BBS şunlardan oluşur (Şekil 6.1):

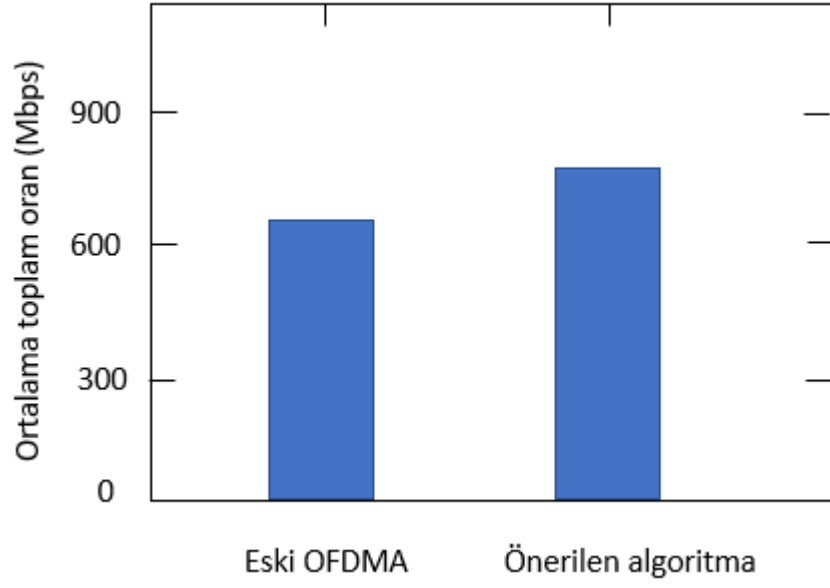
- BBS, 4 antenli bir AP ($N_T = 4$)
- 1 antenli 7 kullanıcı ($N_R = 1$)
- 20MHz bant genişliğinden ($L = 4$)



Şekil 6.1. Senaryo 1'in sonucu

Senaryo 2: BBS şunlardan oluşur (Şekil 6.2):

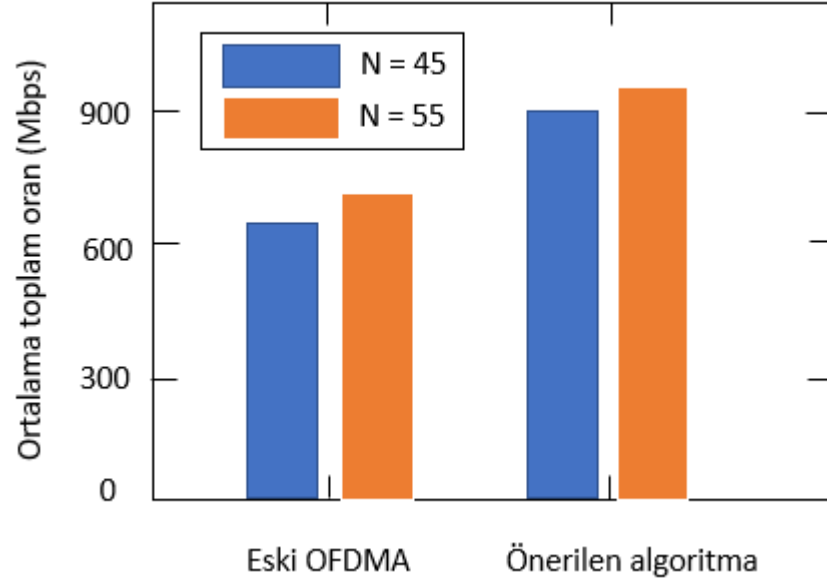
- BBS, 4 antenli bir AP ($N_T = 4$)
- 1 antenli 30 kullanıcı ($N_R = 1$)
- 40MHz bant genişliğinden ($L = 5$)



Şekil 6.2. Senaryo 2'in sonucu

Senaryo 3: BBS şunlardan oluşur (Şekil 6.3):

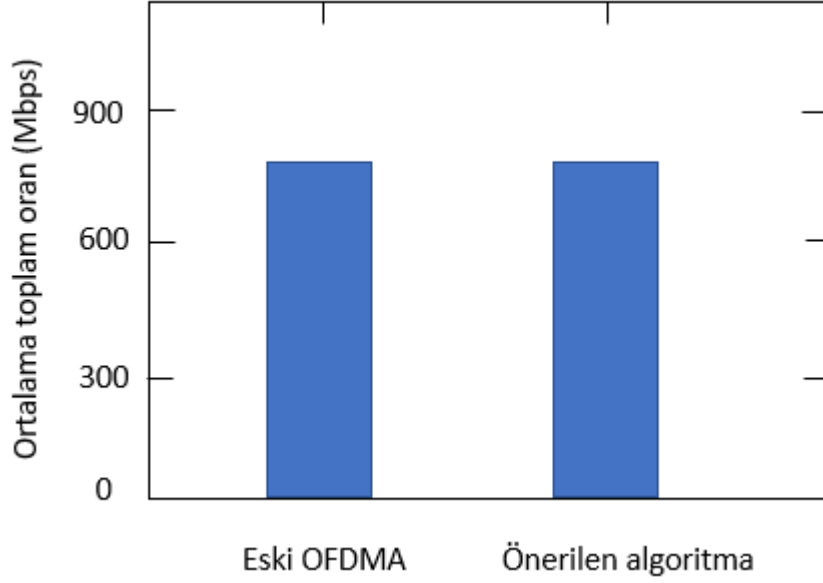
- BBS, 4 antenli bir AP ($N_T = 4$)
- 1 antenli N kullanıcı ($N_R = 1$)
- 40MHz bant genişliğinden ($L = 5$)



Şekil 6.3. Senaryo 3'in sonucu

Senaryo 4: BBS şunlardan oluşur (Şekil 6.4):

- BBS, 1 antenli bir AP ($N_T = 1$)
- 1 antenli 30 kullanıcı ($N_R = 1$)
- 40MHz bant genişliğinden ($L = 4$)



Şekil 6.4. Senaryo 4'in sonucu

Yukarıda tüm senaryoların şekillerinde de gösterildiği gibi, önerilen algoritmanın toplam oranı, ağdaki ek yükün azaltılmasına izin verdiği için beklenen eski OFDMA'dan daha yüksektir. Eski OFDMA zamanlama algoritmasında, AP'ye bağlı tüm kullanıcılardan (tüm antenler) CSI alınmaktadır. Ancak önerilen algoritmamızla, kullanıcılar ve AP'nin antenlerin yarısı arasındaki CSI'yi elde edilmektedir ve ardından CSI'nin geri kalanını daha öncesinde de açıklandığı gibi eskisinden tahmin edilmektedir.

3. senaryoda, toplam oran, N arttıkça artmaktadır ve bu nedenle önerilen algoritma sonucumuz da artırılmıştır.

Senaryo 4'te, AP'de yalnızca bir anten bulunmaktadır, böylece ortalama toplam oran, eski OFDMA zamanlama algoritmasında ve önerilen algoritmada aynı değere sahiptir, çünkü önerilen algoritmada ağı yükü azaltmak için yönlendiricideki AŞIRI YÜKLEME anten sayısından yararlanılmaktadır.

Simülasyon sonuçları aşağıda Çizelge 6.1’de gösterildiği gibi tüm senaryoları sayısal bir değer olarak değerlendirilebilmektedir.

Çizelge 6.1. Simülasyon sonuçları

Senaryolar	ML olmadan ortalama toplam 802.11ax oranı (Mbps)	ML ile ortalama toplam 802.11ax oranı (Mbps)
Senaryo 1	90.25 Mbps	118.29 Mbps
Senaryo 2	650.12 Mbps	830.87 Mbps
Senaryo 3 (N = 45, N = 55)	660.15 Mbps, 712.20 Mbps	903.01 Mbps, 958.98 Mbps.
Senaryo 4	802.58 Mbps	802.58 Mbps

Ortalama toplam oran, önerilen algoritmamızı uygulayarak ortalama toplam oranı %22 ile %30 arasında arttırılmıştır; bu, daha hızlı veri derecelendirmesi elde edilmesi için daha iyi bir ağda harika bir şeyken, şu ana kadar 802.11ax'de zamanlama ve kaynak tahsisi için standart bir algoritma yoktur.

Bu çalışmada, MIMO DL için CSI edinimi sorununu detaylıca incelenmektedir ve bunu sorunu azaltmak için ML tabanlı bir yaklaşım önerilmektedir. Yüksek boyutlu kanalların doğal yapısını öğrenmek için ML algoritmasını LR kullanılmıştır. Yeni bir kanal gerçekleştirme ile karşı karşıya kalındığında, antenlerin yalnızca bir kısmının CSI'larını tahmin etmek için DL pilotlarını iletmesi gerekmektedir; bu, antenlerin geri kalanının CSI'sını tahmin etmek için eğitimli modele girilebilmektedir. Bunu yaparak aşağıdakileri önemli ölçüde azaltılabilmektedir:

- DL pilotlarının ek yükü
- UL geri bildiriminin ek yükü
- CSI edinimi için enerji tüketimi.

Bu nedenle, önerilen ML tabanlı inen bağlantı CSI edinme yaklaşımı, ulaşılabilir oranı önemli ölçüde iyileştirebilmektedir.

Bu çalışmada de 802.11ax bağlamında kullanıcı toplam oranını maksimize etmek amacıyla kullanıcıları ve kullanıcı gruplarını alt taşıyıcılara en iyi şekilde nasıl atanacağı araştırılmaktadır. Bant genişliğini birlikte RU'lara bölen ve kullanıcıları bunlara göre planlayan yeni bir algoritma sunulmaktadır. Yukarıda bahsedilen algoritmaların performansını karşılaştıran kapsamlı simülasyonlar, pratik şemalarımızın incelenen tüm senaryolarında çok iyi performans gösterdiğini ortaya koymaktadır.

Kaynaklar

- [1] J. Thomas, “How important is WiFi in daily life?,” *Purple*, 2015. <https://purple.ai/blogs/how-important-is-wifi-in-daily-life/> (accessed Aug. 02, 2015).
- [2] Newsroom, “No wifi, no homework: Internet is now ‘more important than food or family,’” *YORKSHIRE POST*, 2014. <https://www.yorkshirepost.co.uk/news/uk-news/no-wifi-no-homework-internet-now-more-important-food-or-family-1831219/> (accessed Aug. 07, 2014).
- [3] W. Stallings and C. Beard, *Wireless Communication networks and systems*. Hoboken: Pearson Higher Education, 2016.
- [4] H. Lodwal, A. Yadav, and M. Panchal, “A Quality of Service (QoS) Aware Scheduling Algorithm to Boost QoS of Cell-Edge Users in LTE Networks,” *Int. J. Recent Technol. Eng.*, vol. 8, no. 2, pp. 2589–2594, 2019, doi: 10.35940/ijrte.B2818.078219.
- [5] A. Gopalan, C. Caramanis, and S. Shakkottai, “On wireless scheduling with partial channel-state information,” *IEEE Trans. Inf. THEORY*, vol. 58, no. 1, pp. 403–420, 2012, doi: 10.1109/TIT.2011.2169543.
- [6] R. Adeogun, “Channel Prediction for Mobile MIMO Wireless Communication,” Victoria University of Wellington, 2015.
- [7] W. L. Shen, K. C. J. Lin, M. S. Chen, and K. Tan, “SIEVE: Scalable user grouping for large MU-MIMO systems,” *Proc. - IEEE INFOCOM*, vol. 26, pp. 1975–1983, 2015, doi: 10.1109/INFOCOM.2015.7218581.
- [8] E. Khorov, A. Kiryanov, A. Lyakhov, and G. Bianchi, “A tutorial on IEEE 802.11ax high efficiency WLANs,” *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 21, no. 1, pp. 197–216, Jan. 2019, doi: 10.1109/COMST.2018.2871099.
- [9] H. A. Omar *et al.*, “A Survey on High Efficiency Wireless Local Area Networks : Next Generation WiFi,” *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 18, no. 4, pp. 2315–2344, 2016, doi: 10.1109/COMST.2016.2554098.
- [10] K. Wang and K. Psounis, “Scheduling and Resource Allocation in 802 . 11ax,” in *IEEE INFOCOM 2018 - IEEE Conference on Computer*

Communications, 2018, pp. 279–287, doi:
10.1109/INFOCOM.2018.8486204.

- [11] R. M. Karthik and S. Palaniswamy, “Resource Unit (RU) based OFDMA Scheduling in IEEE 802.11ax system,” in *2018 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI)*, 2018, pp. 1297–1302, doi: 10.1109/ICACCI.2018.8554931.
- [12] CISCO(team), “IEEE 802 . 11ax : The Sixth Generation of Wi-Fi,” 2018. [Online]. Available: <https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/wireless/white-paper-c11-740788.html>.
- [13] C.-F. Shih, “Algorithms and Protocols for Next Generation Wifi Networks,” Georgia Institute of Technology, 2017.
- [14] K. Dovelos and B. Bellalta, “Optimal Resource Allocation in IEEE 802.11ax Uplink OFDMA with Scheduled Access,” in *Networking and Internet Architecture*, 2018, pp. 1–17, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1811.00957>.
- [15] S. Bhattarai, G. Naik, and J.-M. J. Park, “Uplink Resource Allocation in IEEE 802.11ax,” in *ICC 2019 - 2019 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, May 2019, vol. 2019-May, no. March, pp. 1–6, doi: 10.1109/ICC.2019.8761594.
- [16] S. Bi, R. Zhang, Z. Ding, and S. Cui, “Wireless Communications in the Era of Big Data,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 53, no. 10, pp. 190–199, 2015, doi: 10.1109/MCOM.2015.7295483.
- [17] D. Olive, *Linear Regression*. Springer, 2017.
- [18] P. Dong, H. Zhang, and G. Y. Li, “Machine Learning Prediction based CSI Acquisition for FDD Massive MIMO Downlink,” *2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*. IEEE, Abu Dhabi, United Arab Emirates, pp. 1–6, 2018, doi: 10.1109/GLOCOM.2018.8647328.
- [19] S. Pilosof, R. Ramjee, D. Raz, Y. Shavitt, and P. Sinha, “Understanding TCP fairness over wireless LAN,” in *IEEE INFOCOM 2003. Twenty-second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (IEEE Cat. No.03CH37428)*, 2003, pp. 863–872, doi: 10.1109/infcom.2003.1208924.

- [20] M. Bottigliengo, C. Casetti, C. F. Chiasserini, and M. Meo, "Short-term fairness for TCP flows in 802.11b WLANs," *Proc. - IEEE INFOCOM*, pp. 1383–1392, 2004, doi: 10.1109/INFCOM.2004.1357023.
- [21] P. Bhagwat, P. Bhattacharya, A. Krishna, and S. K. Tripathit, "Enhancing throughput over wireless LANs using channel state dependent packet scheduling," in *Proceedings of IEEE INFOCOM '96. Conference on Computer Communications*, 1996, pp. 1133–1140, doi: 10.1109/INFCOM.1996.493057.
- [22] G. Urvoy-Keller and A. L. Beylot, "Improving flow level fairness and interactivity in WLANs using size-based scheduling policies," in *MSWiM'08: Proceedings of the 11th ACM International Conference on Modeling, Analysis, and Simulation of Wireless and Mobile Systems*, 2008, pp. 333–340, doi: 10.1145/1454503.1454559.
- [23] Y. Yao, B. Sheng, and N. Mi, "A new packet scheduling algorithm for access points in crowded WLANs," *Ad Hoc Networks*, vol. 36, no. 1, pp. 100–110, 2015, doi: 10.1016/j.adhoc.2015.06.001.
- [24] M. R. Tabany and C. G. Guy, "Design and implement delay-aware QoS scheme for 3GPP LTE/LTE-A networks for mixed traffic flow," in *2015 IEEE Symposium on Computers and Communication (ISCC)*, Jul. 2015, pp. 38–44, doi: 10.1109/ISCC.2015.7405451.
- [25] A. S. Md Zain, M. F. Abd. Malek, M. Elshaikh, N. Omar, and A.-S. T. Hussain, "Performance analysis of scheduling policies for VoIP traffic in LTE-Advanced network," in *2015 International Conference on Computer, Communications, and Control Technology (I4CT)*, Apr. 2015, pp. 16–20, doi: 10.1109/I4CT.2015.7219528.
- [26] J. A. Zubairi, E. Erdogan, and S. Reich, "Experiments in fair scheduling in 4G WiMAX and LTE," in *2015 International Conference on High Performance Computing & Simulation (HPCS)*, Jul. 2015, pp. 277–282, doi: 10.1109/HPCSim.2015.7237050.
- [27] S. Baghi and M. Daneshvar Farzanegan, "A novel delay based scheduling algorithm for video traffic in LTE," in *2015 2nd International Conference on Knowledge-Based Engineering and Innovation (KBEI)*, Nov. 2015, pp. 514–520, doi: 10.1109/KBEI.2015.7436098.
- [28] Q. Liu and C. W. Chen, "Smart Downlink Scheduling for Multimedia Streaming Over LTE Networks With Hard Handoff," *IEEE Trans. Circuits*

Syst. Video Technol., vol. 25, no. 11, pp. 1815–1829, Nov. 2015, doi: 10.1109/TCSVT.2015.2400751.

- [29] S. Shukla and V. Bhatia, “Packet Scheduling Algorithm in LTE/LTE-Advanced-based Cellular Networks,” *IETE Tech. Rev.*, vol. 35, no. 6, pp. 551–561, Nov. 2018, doi: 10.1080/02564602.2017.1342573.
- [30] A. Bazzi, A. Zanella, G. Cecchini, and B. M. Masini, “Analytical investigation of two benchmark resource allocation algorithms for LTE-v2v,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 68, no. 6, pp. 5904–5916, 2019, doi: 10.1109/TVT.2019.2909438.
- [31] Y. Huang, Y. Chen, Y. T. Hou, and W. Lou, “CURT: A Real-Time Scheduling Algorithm for Coexistence of LTE and Wi-Fi in Unlicensed Spectrum,” in *2018 IEEE International Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks, DySPAN 2018*, 2019, pp. 1–9, doi: 10.1109/DySPAN.2018.8610476.
- [32] O. G. Uyan and V. C. Gungor, “QoS-aware LTE-A downlink scheduling algorithm: A case study on edge users,” *International Journal of Communication Systems*, vol. 32, no. 15, 2019, doi: 10.1002/dac.4066.
- [33] A. Pantelidou and A. Ephremides, “Scheduling in wireless networks,” *Found. Trends Netw.*, vol. 4, no. 4, pp. 421–511, 2009, doi: 10.1561/13000000030.
- [34] J. Walrand, *Scheduling and Congestion Control for Wireless and Processing Networks*, vol. 6. Berkeley: Morgan & Claypool, 2010.
- [35] V. Gabale, B. Raman, P. Dutta, and S. Kalyanraman, “A classification framework for scheduling algorithms in wireless mesh networks,” *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 15, no. 1, pp. 199–222, 2013, doi: 10.1109/SURV.2012.022412.00068.
- [36] J. W. Kathrine and A. Raj, “Packet Scheduling Algorithms in Different Wireless Networks A Survey,” *Int. J. Eng. Res. Technol.*, vol. 1, no. 8, pp. 1–6, 2012, [Online]. Available: <https://www.ijert.org/packet-scheduling-algorithms-in-different-wireless-networks-a-survey>.
- [37] M. Han, W. Chen, W. Pi, W. Li, and R. Zeng, “The RAS scheduling algorithm based on 802.11n WIFI router,” *Int. J. Secur. its Appl.*, vol. 9, no. 11, pp. 113–124, 2015, doi: 10.14257/ijssia.2015.9.11.12.

- [38] Z. Zhang, S. Bronson, J. Xie, and W. Hu, "Employing the One-Sender-Multiple-Receiver Technique in Wireless LANs," *IEEE/ACM Trans. Netw.*, vol. 21, no. 4, pp. 1243–1255, Aug. 2013, doi: 10.1109/TNET.2012.2222436.
- [39] K. Lee and C. Kim, "User scheduling for MU-MIMO transmission with active CSI feedback," *EURASIP J. Wirel. Commun. Netw.*, 2015, doi: 10.1186/s13638-015-0331-4.
- [40] M. Anand, E. B. Nightingale, and J. Flinn, "Self-tuning wireless network power management," *Wirel. Networks*, vol. 11, no. 4, pp. 451–469, 2005, doi: 10.1007/s11276-005-1768-x.
- [41] E. Rozner, V. Navda, R. Ramjee, and S. Rayanchu, "NAPman: Network-assisted power management for WiFi devices," in *MobiSys'10 - Proceedings of the 8th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services*, 2010, pp. 91–105, doi: 10.1145/1814433.1814445.
- [42] F. R. Dogar, P. Steenkiste, and K. Papagiannaki, "Catnap: Exploiting high bandwidth wireless interfaces to save energy for mobile devices," in *MobiSys'10 - Proceedings of the 8th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services*, 2010, pp. 107–122, doi: 10.1145/1814433.1814446.
- [43] J. Manweiler and R. Roy Choudhury, "Avoiding the rush hours: WiFi energy management via traffic isolation," *IEEE Trans. Mob. Comput.*, vol. 11, no. 5, pp. 739–752, 2012, doi: 10.1109/TMC.2011.269.
- [44] A. Enayet, N. Mehajabin, M. A. Razzaque, C. S. Hong, and M. M. Hassan, "PowerNap: a power-aware distributed Wi-Fi access point scheduling algorithm," *Eurasip J. Wirel. Commun. Netw.*, vol. 2016, no. 27, pp. 1–13, 2016, doi: 10.1186/s13638-016-0522-7.
- [45] Q. Qu *et al.*, "Survey and Performance Evaluation of the Upcoming Next Generation WLANs Standard - IEEE 802.11ax," *Mob. Networks Appl.*, vol. 24, no. 5, pp. 1461–1474, 2019, doi: 10.1007/s11036-019-01277-9.
- [46] M. S. Afaqui, E. Garcia-Villegas, and E. Lopez-Aguilera, "IEEE 802.11ax: Challenges and Requirements for Future High Efficiency WiFi," *IEEE Wirel. Commun.*, vol. 24, no. 3, pp. 130–137, 2016, doi: 10.1109/MWC.2016.1600089WC.
- [47] K. H. Lee, "Performance analysis of the IEEE 802.11ax MAC protocol for

- heterogeneous Wi-Fi networks in non-saturated conditions,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 19, no. 7, pp. 1–20, 2019, doi: 10.3390/s19071540.
- [48] J. S. Sanchez-Mahecha, S. Cespedes, and J. Bustos-Jimenez, “QoS Evaluation of the Future High-Efficiency IEEE 802.11ax WLAN Standard,” in *2018 IEEE Colombian Conference on Communications and Computing (COLCOM)*, May 2018, pp. 1–6, doi: 10.1109/ColComCon.2018.8466723.
- [49] D. Kwon, S. W. Kim, J. Kim, and A. Mohaisen, “Interference-aware adaptive beam alignment for hyper-dense IEEE 802.11ax internet-of-things networks,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 18, no. 10, 2018, doi: 10.3390/s18103364.
- [50] I. F. Chao, C. S. Chiou, and K. Hsu, “A group-oriented QoS-enhanced proportional fair scheduling algorithm over downlink OFDMA-based networks,” in *4th International Symposium on Next-Generation Electronics, IEEE ISNE 2015*, 2015, pp. 1–4, doi: 10.1109/ISNE.2015.7131958.
- [51] G. Z. Islam and M. A. Kashem, “An OFDMA-based New MAC mechanism for IEEE 802.11ax,” in *Proceedings of 2018 5th International Conference on Networking, Systems and Security, NSysS 2018*, 2019, pp. 1–7, doi: 10.1109/NSysS.2018.8631367.
- [52] E. Avdotin, D. Bankov, E. Khorov, and A. Lyakhov, “OFDMA resource allocation for real-time applications in IEEE 802.11ax networks,” in *2019 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking, BlackSeaCom 2019*, 2019, pp. 1–3, doi: 10.1109/BlackSeaCom.2019.8812774.
- [53] T. Ramji, B. Ramkumar, and M. S. Manikandan, “Resource and subcarriers allocation for OFDMA based wireless distributed computing system,” in *Souvenir of the 2014 IEEE International Advance Computing Conference, IACC 2014*, 2014, pp. 338–342, doi: 10.1109/IAdCC.2014.6779345.
- [54] W. R. Ghanem, V. Jamali, Y. Sun, and R. Schober, “Resource Allocation for Multi-User Downlink URLLC-OFDMA Systems,” in *2019 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*, May 2019, pp. 1–6, doi: 10.1109/ICCW.2019.8756746.
- [55] K. H. Lee, “Using OFDMA for MU-MIMO user selection in 802.11ax-Based Wi-Fi Networks,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 186041–186055, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2960555.

- [56] J. Li, Q. Yang, J. Yang, M. Qin, and K. S. Kwak, "User Perceived Qos Provisioning for Video Streaming in Wireless OFDMA Systems: Admission Control and Resource Allocation," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 44747–44762, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2865010.
- [57] K. Seong, M. Mohseni, and J. Cioffi, "Optimal Resource Allocation for OFDMA Downlink Systems," in *2006 IEEE International Symposium on Information Theory*, Jul. 2006, pp. 1394–1398, doi: 10.1109/ISIT.2006.262075.
- [58] O. Sharon and Y. Alpert, "Optimizing TCP Goodput and Delay in next generation IEEE 802.11 (ax) devices," *Trans. Networks Commun.*, vol. 6, no. 4, pp. 14–39, 2018, doi: 10.14738/tnc.64.4925.
- [59] J. H. Tseng, Y. F. Chen, and C. L. Wang, "User Selection and Resource Allocation Algorithms for Multicarrier NOMA Systems on Downlink Beamforming," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 59211–59224, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2982677.
- [60] D. Bankov, A. Didenko, E. Khorov, V. Loginov, and A. Lyakhov, "IEEE 802.11ax uplink scheduler to minimize, delay: A classic problem with new constraints," in *2017 IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, Oct. 2017, vol. 2017-October, pp. 1–5, doi: 10.1109/PIMRC.2017.8292382.
- [61] G. Naik, S. Bhattarai, and J.-M. Park, "Performance Analysis of Uplink Multi-User OFDMA in IEEE 802.11ax," in *2018 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, May 2018, vol. 2018-May, no. March, pp. 1–6, doi: 10.1109/ICC.2018.8422692.
- [62] O. Sharon and Y. Alpert, "Scheduling Strategies and Throughput Optimization for the Uplink for IEEE 802.11ax and IEEE 802.11ac Based Networks," *Wirel. Sens. Netw.*, vol. 09, no. 08, pp. 250–273, 2017, doi: 10.4236/wsn.2017.98014.
- [63] W. Cui, K. Shen, and W. Yu, "Spatial Deep Learning for Wireless Scheduling," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 37, no. 6, pp. 1248–1261, 2019, doi: 10.1109/JSAC.2019.2904352.
- [64] X. Cao, R. Ma, L. Liu, H. Shi, Y. Cheng, and C. Sun, "A Machine Learning-Based Algorithm for Joint Scheduling and Power Control in Wireless Networks," *IEEE Internet Things J.*, vol. 5, no. 6, pp. 4308–4318, 2018, doi: 10.1109/JIOT.2018.2853661.

- [65] H. Ye, G. Y. Li, and B. H. Juang, "Power of Deep Learning for Channel Estimation and Signal Detection in OFDM Systems," *IEEE Wirel. Commun. Lett.*, vol. 7, no. 1, pp. 114–117, 2018, doi: 10.1109/LWC.2017.2757490.
- [66] A. R. Utami and Iskandar, "Optimization Subcarrier Allocation and Genetic Algorithm for Resource Allocation in MIMO-OFDMA," in *ISESD 2018 - International Symposium on Electronics and Smart Devices: Smart Devices for Big Data Analytic and Machine Learning*, 2019, pp. 1–4, doi: 10.1109/ISESD.2018.8605480.
- [67] A. R. Utami and Iskandar, "Resource Allocation Analysis with Genetic Algorithm in LTE MIMO-OFDMA Cellular System," in *TSSA 2019 - 13th International Conference on Telecommunication Systems, Services, and Applications, Proceedings*, 2019, pp. 182–185, doi: 10.1109/TSSA48701.2019.8985502.
- [68] R. Karmakar, S. Chattopadhyay, and S. Chakraborty, "Intelligent MU-MIMO User Selection with Dynamic Link Adaptation in IEEE 802.11ax," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 18, no. 2, pp. 1155–1165, 2019, doi: 10.1109/TWC.2018.2890219.
- [69] D. Coleman and L. Miller, *802.11ax for dummies*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons.
- [70] B. Bellalta and K. Kosek-Szott, "AP-initiated multi-user transmissions in IEEE 802.11ax WLANs," *Ad Hoc Networks*, vol. 85, pp. 145–159, 2019, doi: 10.1016/j.adhoc.2018.10.021.
- [71] J. Klein Brinke, and N. Meratnia. 2019. Dataset: Channel state information for different activities, participants and days.