O-RAN TABANLI YENİ NESİL HABERLEŞME SİSTEMİNİN BENZETİMİ VE BAŞARIM ANALİZİ

Emin BİLİR

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

O-RAN TABANLI YENİ NESİL HABERLEŞME SİSTEMİNİN BENZETİMİ VE BAŞARIM ANALİZİ

Emin BİLİR
502131010

Doç. Dr. Murtaza CİCİOĞLU
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2025
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans

O-RAN TABANLI YENİ NESİL HABERLEŞME SİSTEMİNİN BENZETİMİ VE BAŞARIM ANALİZİ

Emin BİLİR

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Murtaza CİCİOĞLU

Son yıllarda, mobil operatörlerin Radyo Erişim Ağı (RAN) mimarilerinin verimliliğini, zekasını ve satıcı firma bağımsızlığını arttırma çabaları, Açık Radyo Erişim Ağı (O-RAN) kavramını hücresel mobil ağlarda öne çıkaran ve üzerinde yoğun araştırmalar yapılan bir alan haline getirmiştir. O-RAN, RAN işlevlerini açık hale getirip sanallaştırmayı ve optimize etmeyi amaçlamaktadır. Bu bağlamda, birden fazla satıcının sağladığı ayrıştırılmış ağ bileşenlerinin açık arayüzlerle bağlandığı sanallaştırılmış RAN çözümlerini desteklemektedir. O-RAN, beyaz kutu donanımları ve çeşitli satıcılardan temin edilen açık kaynaklı yazılım bileşenlerinin uyum içinde çalışmasını sağlayan, standartlaşmış bir ara bağlantı yapısına dayalıdır. Bu mimari, modüler bir baz istasyonu yazılım yığınını, farklı üreticilerin ana bant ve radyo ünitesi bileşenleriyle sorunsuz bir şekilde entegre eden, kullanıma hazır donanımlar üzerinde çalıştırır. O-RAN mimarisinin, farklı ağ politikaları ve ağ senaryoları açısından analiz edilmesi, yeni nesil ağlar için büyük önem taşımaktadır. Bu tez çalışmasında, O-RAN mimarisi ve sağladığı avantajlar ayrıntılı bir şekilde ele alınmıştır. Ayrıca O-RAN mimarisi için yeni bir hücre değişim algoritması tasarlamış ve farklı hücre değişim algoritmaları ile birlikte hücre değişim performans analizi ve benzetimi gerçekleştirilmiştir. Gerçekçi analizler yapılabilmesi için bir kampüs ağı tasarlanmış ve farklı senaryolar ile hücre değişim algoritmalarının performansları karşılaştırılmıştır. O-RAN mimarisi için önerilen hibrit hücre değişim algoritması, Referans Sinyal Alınan Güç (RSRP) ve Hizmet Kalitesi (QoS) temelli hücre değişim algoritmaları ile karşılaştırılmıştır. Yapılan analizler sonucunda, O-RAN için geliştirilen hibrit hücre değişim algoritmasının daha iyi performans sergilediği tespit edilmiştir. Son olarak, bulanık mantık yaklaşımının O-RAN hücre değişimi üzerindeki etkisi incelenmiş ve hibrit hücre değişim algoritması ile karşılaştırılmıştır. Bulanık mantık ile istasyonların kapasiteleri daha homojen dağıtılmıştır. RSRP politikadaki blok oranı %16,23'ten sırası ile hibrit ve bulanık mantık yaklaşımıyla %7,15, %6,25'e düşürülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Open-RAN, Hücre Değişimi, Qos, RSRP, Bulanık Mantık
2025, 96 sayfa.

ABSTRACT

MSc

SIMULATION AND PERFORMANCE ANALYSIS OF AN O-RAN BASED NEXTGENERATION COMMUNICATIONS SYSTEM

Emin BILIR

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Computer Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Murtaza CICIOGLU

In recent years, efforts by mobile operators to increase the efficiency, intelligence and vendor independence of Radio Access Network (RAN) architectures have made the Open Radio Access Network (O-RAN) concept prominent in cellular mobile networks and an intensively researched area. O-RAN aims to open, virtualize and optimize RAN functions. In this context, it supports virtualized RAN solutions where disaggregated network components from multiple vendors are connected with open interfaces. O-RAN is based on a standardized interconnection structure that enables white-box hardware and open-source software components from various vendors to work in harmony. This architecture runs a modular base station software stack on ready-to-use hardware that seamlessly integrates baseband and radio unit components from different vendors. Analyzing the O-RAN architecture in terms of different network policies and network scenarios is of great importance for next-generation networks. In this thesis, the O-RAN architecture and its advantages are discussed in detail. In addition, a new cell change algorithm has been designed for the O-RAN architecture and cell change performance analysis and simulation have been performed with different cell change algorithms. In order to make realistic analyses, a campus network has been designed, and the performances of cell change algorithms have been compared with different scenarios. The hybrid cell change algorithm proposed for the O-RAN architecture has been compared with Reference Signal Received Power (RSRP) and Quality of Service (QoS) based cell change algorithms. As a result of the analyses, it has been determined that the hybrid cell change algorithm developed for O-RAN has better performance. Finally, the effect of the fuzzy logic approach on O-RAN cell change has been investigated and compared with the hybrid cell change algorithm. The capacities of the stations have been distributed more homogeneously with fuzzy logic. The block ratio in the RSRP policy has been reduced from 16.23% to 7.15% and 6.25% with the hybrid and fuzzy logic approaches, respectively.

Key words: Open-RAN, Cell Handover, Qos, RSRQ, Fuzzy Logic
2025, 96 pages.

ÖNSÖZ ve/veya TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimim boyunca ve bu tezin hazırlanmasında gösterdiği her türlü destek ve yardımdan dolayı, her zaman bakış açışımı değiştiren kariyerime yön veren sabrı ve yol göstericiliği ile etkilerde bulunan, bilgi birikimini aktarmaktan hiç çekinmeyen çok değerli hocam Doç. Dr. Murtaza CİCİOĞLU'na en içten teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımın her anında yanımda olan, sabrı, sevgisi ve sonsuz desteğiyle bana güç veren eşime minnettarım. Bu zorlu akademik yolculukta her adımımda yanımda olduğun için teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, bana her koşulda inanan, sevgileri ve dualarıyla hep arkamda duran aileme şükranlarımı sunuyorum. Son olarak, bu süreçte bilgisiyle, tavsiyeleriyle ve dostluğuyla katkıda bulunan tüm hocalarıma, arkadaşlarıma ve sevdiklerime teşekkürlerimi sunarım.

Adı Soyadı

Emin Bilir
04/05/2025

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET ..... Vİİİ
ABSTRACT ..... İX
ÖNSÖZ VE/VEYA TEŞEKKÜR X
KISALTMALAR DİZİNİ ..... Xİİ
ŞEKİLLER DİZİNİ ..... XİV
TABLOLAR DİZİNİ XV
1. GİRİŞ 1
2. HÜCRESEL AĞ TEKNOLOJİLERİ 7
2.1 MOBİL HÜCRESEL AĞ STANDARTLARININ FARKLILAŞTIRICILARI 7
2.2 GSM 16
2.3 UMTS/3G 17
2.4 LTE (4G) 19
2.5 5G 21
2.6 O-RAN TEKNOLOJİSİ 26
2.6.1 RIC Yapısı 30
2.6.2 O-RAN Uygulamaları 33
2.6.3 O-RAN Mimarisinde Hücre Değişimi 35
3. LİTERATÜR TARAMASI 38
4. O-RAN MİMARİSİ İÇİN ÖNERİLEN HÜCRE DEĞİŞİM YÖNTEMİ 45
4.1 O-RAN MİMARİSİNDE RSRP, QOS VE HİBRİT HÜCRE DEĞİŞİM ALGORİTMALARI 49
4.2 O-RAN MİMARİSİNDE BULANIK MANTIK TABANLI HÜCRE DEĞİŞİMİ 53
4.3 SENARYO 1 (HAREKETLİ KULLANICI) 59
4.3.1 Politikasız Yaklaşım 60
4.3.2 RSRP Tabanlı Hücre Değişim Senaryosu 61
4.3.3 QoS Tabanlı Hücre Değişim Senaryosu 62
4.3.4 Bulanık Mantık Tabanlı Hücre Değişim Senaryosu 62
4.4 SENARYO 2 (SABİT KULLANICILAR) 63
5. O-RAN MİMARİSİNDE HÜCRE DEĞİŞİM YÖNTEMLERİNİN PERFORMANS ANALİZLERİ 65
5.1 Senaryo 1 (Hareketli Kullanıcı) Sonuç 65
5.2 Senaryo 2 (Sabit Kullanıcılar) Sonuç 68
6. SONUÇ 73
KAYNAKLAR 74
EKLER 79
ÖZGEÇMİŞ 81

KISALTMALAR DİZİNİ

Kısaltmalar	Açıklama
AI	Yapay Zeka
API	Uygulama Programlama Arayüzü (Application Programming Interface)
BBU	Temel Bant Birimi (Baseband Unit)
BSC	Baz İstasyonu Denetleyicisi (Base Station Controller)
CN	Çekirdek Ağ (Core Network)
CNFs	Cloud-Native Ağ İşlevleri (Coud-Native Network Functions)
DAC/ADC	Analogdan Dijitale /Dijitalden Analoğa Dönüştürme
DSP	Dijital Sinyal İşlemcisi (Digital Signal Processor)
DU-CU	Dağıtık Birim/Merkezi Birim (Distributed Unit/Centralized Unit)
eMBB	Gelişmiş Mobil Geniş Bant (Enhanced Mobile Broadband)
ETSI	Avrupa Telekomünikasyon Standartları Enstitüsü
GPU	Grafik İşlem Birimi (Graphics Processing Unit)
HW/SW	Donanım/Yazılım (Hardware/Software)
IFFT	Ters Hızlı Fourier Dönüşümü (Inverse Fast Fourier Transform)
KPI	Anahtar Performans Göstergesi (Key Performance Indicator)
KPMs	Anahtar Performans Ölçümleri (Key performance Measurements)
MAC	Orta Erişim Kontrolü (Medium Access Control
ML	Makine Öğrenmesi
MME	Mobilite Yönetimi Varlığı (Mobility Management Entity)
MU	Mobil kullanıcı (Mobile user)
near-RT RIC	neredeyse gerçek zamanlı RAN Akıllı Denetleyici
non-RT-RIC	Gerçek Zamanlı Olmayan RIC (RAN Akıllı Denetleyici)
O-RAN	Açık Radyo Erişim Ağı (Open Radio Access Network)
O-SC	O-RAN Software Community (O-RAN Yazılım Topluluğu)
ONAP	Açık Ağ Otomasyon Platformu (Open Network Automation Platform)
Open-FH	Open-Fronthaul (Açık Transmisyon)
PDCP	Paket Veri Yakınsama Protokolü (Packet Data Convergence Protocol)
QoS	Hizmet kalitesi (Quality of service)
RAN	Radyo Erişim Ağı (Radio Access Network)
rAPPs	3. parti uygulamalar (3rd party applications)
RF	Radyo Frekansı (Radio Frequency)
RIC	Radyo Akıllı Kontrol Cihazı (Radio Intelligent Controller)
RL	Pekiştirmeli öğrenme (Reinforcement learning)
RLC	Radyo Link Kontrolü (Radio Link Control)
RNC	Radyo Ağ Denetleyicisi (Radio Network Controller)
RRC	Radyo Kaynak Kontrolü (Radio Resource Control)
RRM	Radyo Kaynak Yönetimi (Radio Resource Management)
RRU	Uzaktan Radyo erişim Ünitesi (Remote Radio Unit)
RSRP	Referans-Sinyal-Alma-Gücü (Reference-Signal-Receive-Power)

RU	Radyo Birimi (Radio Unit)
SDAP	Hizmet Veri Uyarlama Protokolü (Service Data Adaptation Protocol)
SDN	Yazılım Tanımlı Ağ (Software-Defined Networking)
SMO	Servis Yönetimi ve Orkestrasyonu
SON	Kendi Kendini Organize Eden Ağlar Self-Organizing Network
SPP	Tek Amaçlı İşlemci (Single Purpose Processor)
UE	Kullanıcı ekipmanı (User equipment)
UP/CP	Kullanıcı Düzlemi/Kontrol Düzlemi (User Plane/Control Plane)
URLLC	Yüksek Güvenilirlikli Düşük Gecikmeli İletişim
vBS	Sanal baz istasyonları (Virtual base stations)
VNFs	Sanallaştırılmış ağ işlevleri
3GPP	3.Nesil Ortaklık Projesi (3rd Generation Partnership Project)

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1. Hücresel Ağlarda Kapsama Alanı 1
Şekil 1.2. Geleneksel RAN Mimarisinde Baz İstasyonu 2
Şekil 1.3. Hücresel Ağlarda Hücre Değişimi 3
Şekil 1.4. Geleneksel RAN' dan O-RAN Mimarisine Geçiş 5

Şekil 2.1. FDMA Yapısı 9
Şekil 2.2. TDMA Yapısı 10
Şekil 2.3 CDMA Yapısı 11
Şekil 2.4 OFDMA yapısı ve LTE' de 1 RB yapısı 12
Şekil 2.5 BPSK sinyal örneği 14
Şekil 2.6 QPSK Modülasyon Örneği 14
Şekil 2.7 Dörtgen Genlik Modülasyon Örnekleri 15
Şekil 2.8 GSM mimarisi şebeke elemanları 17
Şekil 2.9 UMTS (3G) Mimarisi 18
Şekil 2.10 LTE Mimarisi 21
Şekil 2.11 5G Mimarisi 24
Şekil 2.12 Ayrılmış Radyo Erişim Ağı 28
Şekil 2.13 Geleneksel RAN mimarisi ve O-RAN mimarisi kıyaslama 29
Şekil 2.14 RIC Mimarisi 31
Şekil 2.15 RT-yakın-RIC Mimarisi 32
Şekil 2.16 O-RAN ve gelişen teknolojiler ile beraber farklı hücre değişimi ihtiyaçları. 36

Şekil 4.1 Tez çalışmasında kullanılan yol haritası 46
Şekil 4.2. Matlab'da ışın izleme (Ray Tracing) 47
Şekil 4.3. RSRP/QoS politikalarının simülasyon akış şeması 52
Şekil 4.4. Önerilen hibrit hücre değişim algoritması 53
Şekil 4.5. Rota boyunca ölçülen sinyallerin dağılımı 54
Şekil 4.6. Giriş sinyali üyelik fonksiyonu 55
Şekil 4.7. Politika tipi, Baz İstasyonu ve Servis Tipi için üyelik fonksiyonları 55
Şekil 4.8. Bulanık skoru çıkış fonksiyonu 56
Şekil 4.9. Bulanık mantık tabanlı hücre değişimi 57
Şekil 4.10. Üç boyutlu kontrol arayüzü 58
Şekil 4.11. Önerilen hücre değişim algoritmalarının (Handover-xApp) O-RAN mimarisindeki konumu 59
Şekil 4.12. Politikasız senaryosu 61
Şekil 4.13. RSRP tabanlı hücre değişimi senaryosu 61
Şekil 4.14. QoS temelli hücre değişimi senaryosu 62
Şekil 4.15. Bulanık mantık tabanlı hücre değişim senaryosu 63
Şekil 4.16. Kampüs içi sabit kullanıcı dağılımı 64

Şekil 5.1 Hücre değişim algoritmalarının karşılaştırmalı sinyal güçleri 66
Şekil 5.2 Mobil kullanıcının rotası boyunca kümülatif hücre değişikliği sayısı 67
Şekil 5.3 Senaryo 1 için toplam hücre değişimi sayıları ve ortalama sinyal seviyeleri .. 68

TABLOLAR
DİZİNİ

Tablo 2.1. Teknolojilere göre çoklu erişim teknikleri....8

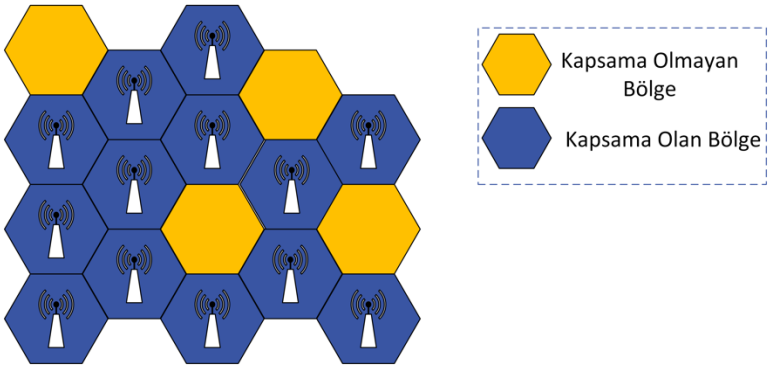
Tablo 3.1 2020-2024 yılları arasındaki bazı ilgili çalışmalar 43

Tablo 4.1 O-RAN için sınıflar ve özellikler....48
Tablo 4.2 Baz istasyonlarının ve kullanıcıların benzetim parametreleri....49
Tablo 4.3 Mikro Hücre ve Makro Hücre karşılaştırması 49
Tablo 4.4 LTE ölçüme dayalı olay tablosu 51
Tablo 4.5 Hücre değişim kararı için bulanık mantık kural setleri....56

Tablo 5.1. Mobil kullanıcının hücre değişim algoritmasına göre ortalama sinyal gücü..66
Tablo 5.2. RSRP-QoS hücre değişim politikalarına göre baz istasyonlarının kapasite durumları 69
Tablo 5.3. Ses ve veri servislerinde hücre değişim algoritmalarına göre blok oranları..69
Tablo 5.4. Hücre değişim algoritmalarına göre baz istasyonlarının kapasite durumları 70
Tablo 5.5. Ses ve veri servislerinde hücre değişim algoritmalarına göre blok oranları..71
Tablo 5.6. Bulanık mantık ile RSRP, QoS ve hibrit tabanlı hücre değişim yöntemlerinin baz istasyonu kapasitesi açısından karşılaştırılması....71
Tablo 5.7. Ses ve veri servislerinde hücre değişim algoritmalarına göre blok oranları..72

1. GİRİŞ

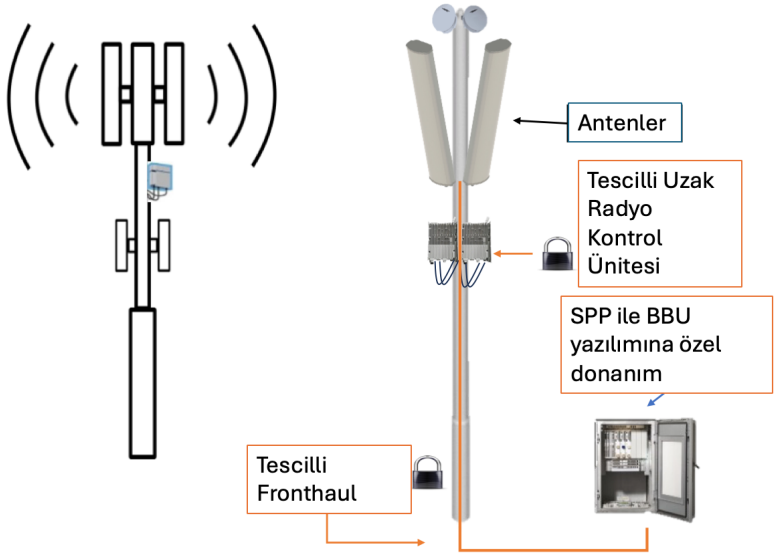
Kablosuz haberleşme sistemleri içerisinde dünya genelinde en yaygın olarak kullanılan ve çok sayıda kullanıcıya ulaşan mimari mobil hücresel ağ mimarisidir. Mobil ağlar 220'yi aşkın ülkede 750'den fazla mobil operatör ile dünya nüfusunun büyük çoğunluğunun kullanımındadır. Bu mimariyi milyarlarca insan vakitlerinin çoğunda aktif olarak kullanmaktadır. Bu mimari ses, kısa mesaj (SMS), nesnelerin interneti (IoT) ve makineler arası iletişim (M2M) uygulamalarında da çok tercih edilmekte ve ihtiyaç günden güne artmaktadır (Alam vd., 2023; Rahnema, 1993; Salman vd., 2014). Coğrafik bölgelere göre belirli mesafelerde, standartlarla belirlenmiş frekanslar kullanılarak baz istasyonu ismi verilen sinyal alıcı ve vericileri kurularak sinyal sürekliliği ve kapsama alanı sağlanmaktadır. Şekil 1.1'de baz istasyonları ile belirli bir bölgede kapsamanın nasıl sağlandığı gösterilmiştir. Hücresel ağlarda en önemli bölümlerden bir tanesi ise radyo erişim ağı (RAN)'dır. RAN kullanıcıların ağa ilk bağlandığı yer olması açısından önemli bir yer tutmakta ve baz istasyonunda konumlanmaktadır. Şekil 1.2'de görüldüğü üzere baz istasyonları en temelde üç ana ekipmandan oluşmaktadır; Temel Bant Birimi (BBU), Uzak Radyo Birimi (RRU) ve antenlerdir.



Şekil 1.1. Hücresel Ağlarda Kapsama Alanı

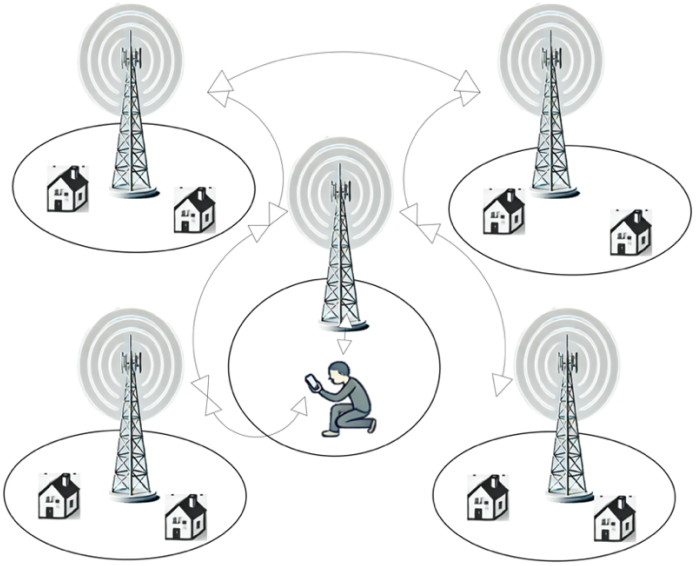
Mobil ağlarda mevcut geleneksel RAN mimarisi bir kara kutuya benzetilmektedir. Bu benzetimdeki önemli faktörlerden biri, Şekil 1.2'de görüldüğü üzere, baz istasyonundaki BBU ile Tek Amaçlı İşlemci (SPP) ve ayrıca her bir baz istasyonu için RRU arasında ayrı lisanslama gerektiren tescilli arayüzlerin varlığıdır (Parallelwireless, 2024). 'Tek Amaçlı İşlemci' terimi, Dijital Sinyal İşlemcisine (DSP) veya Grafik İşleme Birimi'ne (GPU) benzer şekilde, haberleşme sistemi içerisindeki belirli bir görev veya işlev için özel olarak

tasarlanmış belirli bir donanımı belirtir. Ayrıca geleneksel mimaride, temel bant ünitesindeki yazılım katmanı sabit olmamla birlikte, sınırlı erişime izin verilmekte ve geliştirilmesi mümkün olamamaktadır.



Şekil 1.2. Geleneksel RAN Mimarisinde Baz İstasyonu

Kullanıcıların bağlı oldukları hücreden aynı istasyondaki başka bir frekansa ya da başka bir istasyondaki hücreye geçmesi işlemi hücre değişimi (handover) olarak adlandırılmaktadır. Şekilde 1.3'te görüldüğü üzere RAN mimarisinde kullanıcı sayısının fazlalığı, hücrelerdeki limitli frekans kaynakları, coğrafi koşulların karmaşıklığı sebepli hücre değişim süreçlerinde problemler yaşanmaktadır. Bu sebeplerden dolayı dikkatli ve titiz hücre değişim yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Hücre değişimindeki problemleri gidermek ve daha sağlıklı hale getirmek için farklı yöntemler ile çalışmalar yapılmıştır. Hücresel ağlarda hücre değişim senaryoları için 3. Nesil Ortaklık Projesi (3GPP), Uluslararası Telekomünikasyon Birliği (ITU) gibi standartlar altında belirli parametreler oluşturulmuştur. Bu parametrelerde optimizasyon çalışmaları yapılarak ağ yönetimi gerçekleştirilmektedir (Cai vd., 2020a; Pinem vd., 2019).



Şekil 1.3. Hücresel Ağlarda Hücre Değişimi

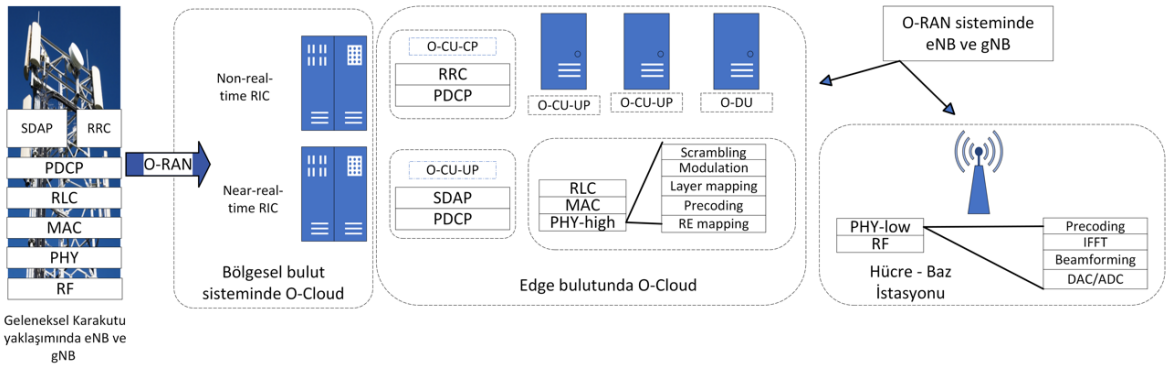
O-RAN vizyonu, uzun yıllar boyunca açık ve programlanabilir ağlar üzerine yapılan araştırmalara dayanmaktadır. O-RAN teknolojisinin temelleri, son 15 yıldır kablolu ağlarda Yazılım Tanımlı Ağlar (SDN) (Akyildiz vd., 2015; Feamster vd., 2014; Kreutz vd., 2015) devriminin odak noktasını oluşturmuş ve son zamanlarda bu ilkeler kablosuz teknolojilerde de kullanılmaya başlanmıştır.

Geleneksel RAN teknolojilerindeki en önemli sorunlardan birisi, ekipman sağlayıcılarına olan bağımlılıktır. Tek bir tedarikçiye bağlı kalmak, kontrol ve esneklik açısından zorluklar yaratmakta, rekabeti ve fiyat-performans oranını düşürmekte, yazılım çözümlerindeki çeşitliliği sınırlamaktadır. Ayrıca, tüm ekipmanlar için tek bir sağlayıcı yerine, farklı seçeneklerin bulunduğu bir pazarın oluşması da beklenmemektedir. Bununla birlikte, her donanım ve yazılım arayüzünün tescilli, lisanslı olması gerekmektedir. O-RAN, yeni özellikler ve hizmetlerin daha kolay uygulanmasını sağlarken, ağın taleplere uygun olarak ölçeklenmesini basitleştirerek esnekliği artırabilir. Çünkü O-RAN, yeni bileşenlerin eklenmesini ve ağın istenilen ölçüde büyütülüp küçültülmesini mümkün kılan modüler bir mimariye sahiptir.

Şekil 1.4, geleneksel RAN mimarisinden O-RAN mimarisine (Dryjański, 2021; Polese vd., 2023b; Ranjbar vd., 2022) doğru evrimin katmanlı bir modelini göstermektedir.

Geleneksel RAN mimarisinde, baz istasyonları dikey katmanlı bir yapıya sahip olduğundan, birden fazla görevin aynı lokasyonda gerçekleştirilmesi zorunludur (Habibi vd., 2019). Örneğin, dikey katmanlı mimariler ağın ölçeklenebilirliği konusunda zorluklar barındırmaktadır. Eğer bir baz istasyonu hem radyo kaynağı yönetimini hem de üst katman protokol işlemlerini yönetiyorsa, herhangi bir görevdeki işlem yükünün artması, paylaşılan kaynaklar nedeniyle diğer görevlerin performansını olumsuz etkileyebilir. Daha fazla kapasite eklemek veya yeni hizmetleri devreye almak, geleneksel mimaride önemli değişiklikler gerektirebilir ve bu da esnekliği ve ölçeklenebilirliği azaltmaktadır. Belirli bir kapsama alanına ve sınırlı kaynaklara sahip bir baz istasyonunun birçok görevi üstlenmesi, kaynak darboğazlarına yol açabilir. Ancak, bu durumun her RAN sahasında kaynakları paylaşan geleneksel RAN mimarisinin doğasında bulunduğunun altını çizmek önemlidir.

O-RAN'da ayrımın amacı, ağ operatörlerine Dağıtılmış Birim (Distributed Units - DU) ve Merkezi Birim (Central Units - CU) işlevlerini nasıl konumlandıracakları ve performansı en üst düzeye nasıl çıkaracakları konusunda karar verme imkânı sağlamaktır. Bu ayrıştırma, farklı satıcılardan gelen donanım ve yazılımların uyumlu bir şekilde çalışmasına imkân sağlamakta ve ağ mühendislerine, çeşitli ağ sağlayıcılarının ürünlerini bir arada kullanma imkanı, esnekliği vermektedir. Hücre değişimi veya dinamik kaynak tahsisi gibi hızlı yanıt süreleri gerektiren görevler, işlevler arasında etkin bir koordinasyon olmadığında gecikmelere neden olabilir. Baz istasyonlarının Radyo Biriminin (RU), DU, CU ve RAN Akıllı Denetleyici (RIC) gibi mantıksal işlevlere ayrılması sayesinde, hücre değişimi, ilk bağlantı ve hizmet yönlendirme gibi işlemler bulut tabanlı yazılımlar aracılığıyla daha verimli bir şekilde yönetilebilir. O-RAN mimarisi, RAN fonksiyonel bölme seçeneği sayesinde geleneksel yaklaşıma kıyasla daha hızlı karar alma ve veri akışı işlemlerine imkân tanımaktadır. Örneğin, gecikmeye duyarlı hizmetler için uygun ön taşıma kullanılabilirliğine dayanan bir gereksinim olduğunda, MAC-PHY bölünmesi en uygun çözüm olabilir. Bu çözüm, fiziksel katmana yakın bulut bağlantıları kullanılarak, geleneksel yaklaşımla ilişkili gecikmeleri en aza indirir. Mobil operatörleri, altyapılarını gelişen pazar trendlerine, teknolojik yeniliklere ve değişen müşteri ihtiyaçlarına uyum sağlamak amacıyla sürekli olarak güncellerken, artan sermaye ve operasyonel harcamaları ile karşı karşıya kalmaktadırlar [5].



Şekil 1.4. Geleneksel RAN' dan O-RAN Mimarisine Geçiş

Bu tez çalışmasında, öncelikle Bursa Uludağ Üniversitesi yerleşkesini modellemek amacıyla MATLAB yazılımı kullanılarak bir benzetim ortamı tasarlanmıştır. Benzetim, mobil kullanıcıların yanı sıra 4 makro ve 2 mikro baz istasyonundan oluşmaktadır (MATLAB, t.y.; OSM, 2023). O-RAN mimarisindeki kontrol düzlemiyle ilişkili A1 arayüzü, radyo kaynağı yönetimi, optimizasyonu ve konfigürasyonu konusunda RAN bileşenleri arasında bilgi alışverişini kolaylaştırmaktadır. O-RAN mimarisinde tanımlanan A1 arayüz standartlarına göre, MATLAB iletişim araç çubuğunun (communication toolbox) temel bileşenleri olan Radyo Frekansı (RF) yayılımı ve Site fonksiyonları kullanılarak temel sınıflar ve bir benzetim ortamı geliştirilmiştir. Tasarlanan bu ortamda 2 senaryo çalıştırılması planlanmıştır. Bu senaryolara ait detaylar ise Bölüm 4 ve Bölüm 5'te tartışılacaktır.

Mobil şebekelerde hücre değişimi, müşterilerin kesintisiz ve yüksek kaliteli hizmet alabilmesi açısından kritik bir rol oynamaktadır. Günümüzde operatörler, bu geçişleri yönetmek için Avrupa Telekomünikasyon Standartları Enstitüsü (ETSI) ve 3GPP tarafından tanımlanan olaylar ile tetiklenen hücre değişim yöntemlerini kullanmaktadır (ETSI, 2013). Hücre değişimi için Referans-Sinyal-Alma-Gücü (RSRP), Referans Sinyal Alınma Kalitesi (RSRQ), Sinyal-Girişim ve Gürültü Oranı (SINR) gibi parametreler kullanılmaktadır. Ancak, bu metriklerle tetiklenen hücre değişimlerinin önemli bir dezavantajı, kullanıcının hizmet türünün göz önünde bulundurulmamasıdır. Bu tez çalışmasında kullanıcının hizmet türlerini de göz önünde bulunduran algoritmalar geliştirilmiştir.

Matematik alanında mantık, hesaplamalı sistemler için kritik role sahiptir. Belirsiz ve kesin olmayan gerçek dünya problemlerinin çözümü için mantık önemli bir yer tutmaktadır. 1965 yılında Loutfi Zadeh "Fuzzy sets" çalışması ile dünyaya bulanık mantığı tanıtmıştır (Zadeh, 1965). Bulanık mantık, geleneksel mantık yöntemlerinin çözümleyemeyeceği birçok problemlere çözüm üretecek yapıdadır. Örneğin geleneksel mantığın sadece 0 ve 1'lerden oluşması, belirsiz muğlak birçok dünya değerini temsil etmek için yetersiz kalmaktadır. Bulanık mantıkla beraber matematik ve insan mantığı arasındaki bu boşluk giderilmiştir. Bulanık mantık, yapay zekânın gelişimine katkı sunmakla birlikte, insan mantığına göre kararlar alabilen sistemlerin tasarlanabilmesi için de öncül olmuştur. Günümüzde bulanık mantık, yüz tanıma modelleri, klimalar, çamaşır makineleri, fren sistemleri, insansız hava araçları ve metro sistemleri gibi birçok alanda kullanılmaktadır (Singh vd., 2013). Bu çalışmada da ilk olarak bulanık mantık kullanılmadan hücre değişimleri algoritmaları incelenmiş, sonrasında ise bulanık mantık temelli hücre değişimi geliştirilip performansa etkileri ele alınarak incelenmiştir.

Özetle, bu tez çalışmasında MATLAB benzetim yazılımı kullanılarak O-RAN mimarisi ile RSRP ve QoS tabanlı hücre değişim senaryoları analiz edilmiştir. Ayrıca, geleneksel hücre değişim politikalarının sınırlamalarını aşmak amacıyla hibrit bir hücre değişim politikası ve bulanık mantık tabanlı hücre değişim algoritmaları geliştirilmiş, simülasyon ortamında test edilmiştir.

Bu hususlar ışığında bu çalışmanın başlıca katkıları şu şekilde sıralanabilir:

- Kampüs ortamındaki baz istasyonları, mobil ve sabit kullanıcılar, sinyaller, bağlantılar, arayüzler ve yapılar gibi özgün gereksinimlere göre uyarlanmış kampüse özel bir O-RAN mimarisinin benzetiminin yapılması ve tasarlanması,
- Yeni bir hücre değişim-xApp algoritmasının geliştirilmesi ve bu algoritmanın değişim sayısı, kapasite ve blok hızı ölçümleri açısından değerlendirilmesi,
- Önerilen hibrit hücre değişim algoritmasının RSRP tabanlı ve QoS tabanlı hücre değişim algoritmalarıyla karşılaştırılması,
- Bulanık mantık tabanlı hücre değişim algoritması geliştirilmesi ve performans analizleri karşılaştırmalı olarak analiz edilmesidir.

2. HÜCRESEL AĞ TEKNOLOJİLERİ

Aynı anda çok sayıda kullanıcının belirli bir frekans spektrum bandını kullanması, lisans maliyetini karşılayacak düzeyde gelir sağlamamaktadır. Bu sınırlamaya rağmen, yüzbinlerce veya milyonlarca aboneye hizmet verebilmek için frekansların mekânsal olarak yeniden kullanılması gerekmektedir. Bu nedenle frekanslar belirli bir coğrafi bölgede tekrar tekrar kullanılmaktadır. Bu yaklaşım, uygun maliyetli bir abone yoğunluğu sağlamak ve kabul edilebilir bir kalitede hizmet sunmak için kullanılır. Frekansların coğrafi bölgelerde yeniden kullanılması mimarisine hücresel ağ yapısı denir. Geniş bir kapsama alanı (örneğin, bir şehir) tek bir yüksek güçlü verici ve yüksek bir kuleye monte edilmiş antenle sağlanabilir. Bu yaklaşım, radyo ve televizyon yayınlarına benzer şekilde kapsama açısından gerçekleştirilebilir olsa da tekrar kullanılan frekanslar ve kodlar açısından dikkat edilmesi gereken hususlar içerir. Ancak, sistem kapasitesi (örneğin, eşzamanlı mobil kullanıcı sayısı veya desteklenen sesli arama sayısı) mevcut spektrumla sınırlıdır ve bu spektrum, kıt ve sıkı bir şekilde düzenlenmiştir. Yıllar boyunca artan bu talep ve ihtiyaçlara karşılık verebilmek adına mobil hücresel ağlar farklı yenilikler ile gelişmektedir. Her hücresel ağ teknolojisi dönemin ihtiyaçlarına karşılık veren belirli bir süreyi geçirdikten sonra yerini yeni nesil teknolojilere bırakmıştır.

2.1 Mobil Hücresel Ağ Standartlarının Farklılaştırıcıları

Mobil ağları birbirinden ayıran çeşitli farklılaştırıcılar bulunmaktadır. Bu farklılaştırıcılar, mobil ağlardaki jenerasyon farkını oluşturan temel özelliklerdir. Bu bölümde, temel düzeydeki bu ayrıştırıcılar ele alınacaktır.

2.1.1 Çoklu Erişim Teknikleri

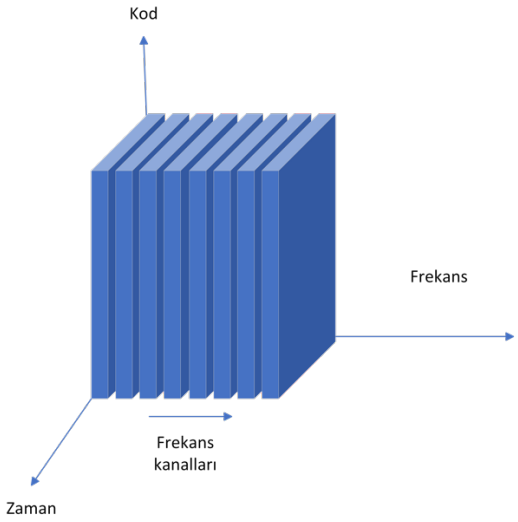
Çoklu erişim teknikleri, aynı ortamı paylaşan birden fazla alıcı ve verici arasındaki iletişimi sağlamak amacıyla geliştirilen yöntemlerdir. Mobil ağlarda bu iletim ortamı havadır. Çok sayıda mobil kullanıcının, tahsis edilen spektrumu en verimli şekilde kullanabilmesi için bu teknikler devreye girer. Spektrum sınırlı olduğu için, mevcut bant genişliğinin farklı kullanıcılar tarafından aynı anda kullanılmasına olanak tanıyarak hücrenin veya coğrafi alanın kapasitesini arttırmak gerekir. Bu paylaşım, mevcut kullanıcıların hizmet kalitesinde herhangi bir düşüş yaşanmayacak şekilde yapılmalıdır.

Bir hücresel sistem, belirli bir alanı, her hücredeki mobil birimin bir baz istasyonuyla iletişim kurduğu hücrelere ayırır. Hücresel sistem tasarımının temel amacı, kanal kapasitesini artırmak, yani belirli bir bant genişliğinde mümkün olduğunca fazla çağrıyı yeterli hizmet kalitesiyle yönetebilmektir. Kanala erişim sağlamak için birkaç farklı yöntem kullanılmaktadır. Geçmişten günümüze kullanılan yöntemlerden bazıları; Frekans Bölmeli Çoklu erişim (FDMA), Zaman Bölmeli Çoklu Erişim (TDMA), Kod Bölmeli Çoklu Erişim (CDMA), Geniş Bant Kod Bölmeli Çoklu Erişim (WCDMA), Ortogonal Frekans Bölünmeli Çoklu Erişim (OFDMA) ve Ortogonal Olmayan Çoklu Erişim (NOMA) ortam erişim teknikleridir. Tablo 2.1'de teknolojilere göre kullanılan çoklu erişim teknikleri verilmiştir.

Tablo 2.1. Teknolojilere göre çoklu erişim teknikleri

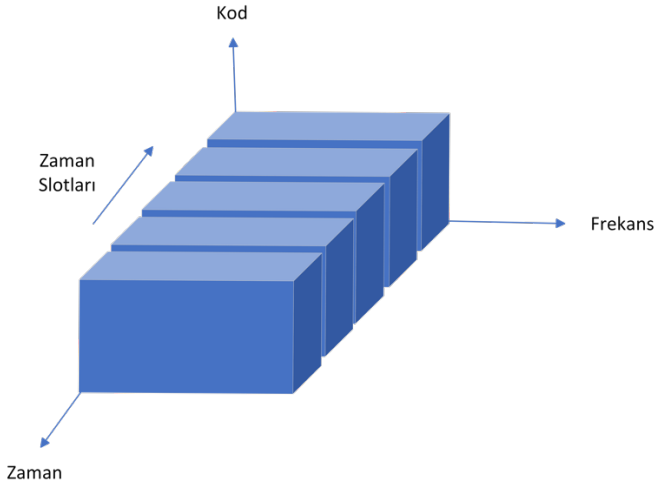
Teknoloji	Çoklu Erişim Tekniği
2G	FDMA/TDMA
3G	WCDMA
4G	OFDMA
5G	NOMA/OFDMA

Şekil 2.1'de gösterildiği gibi, her bir kullanıcıya çağrı yaparken veya alırken farklı frekans atamasının yapıldığı hücresel sistemler için ilk çoklu erişim tekniği olan frekans bölmeli çoklu erişim tekniği geliştirilmiştir. Aşağı bağlantı (downlink) için bir frekans ve yukarı bağlantı (uplink) için farklı frekanslar kullanılır ve bu yönteme frekans bölmeli çift yönlü iletişim (FDD) denir. Atanan bu frekans çifti, komşu kanal girişimini azaltmak için aynı hücrede veya bitişik hücrelerde çağrı sırasında kullanılmaz. Bir FDMA kanalı, aynı anda yalnızca bir kullanıcı verisi taşır. Gelişen teknolojilerde artan abone sayılarına bağlı olarak 2G' deki 200 kHz'lik kanal 2 ve 4'e bölünebilir hale getirilerek daha çok kullanıcıya ulaşabilir hale gelmiştir. Minimum iletişim paketleme süresinde herhangi bir kanal kullanımda değilse, boşta kalır ve diğer kullanıcılar tarafından paylaşım için kullanılamaz. Bu durum kapasitenin artırılmasını engeller. Ses kanalı tahsis edildikten sonra, baz istasyonu (BS) ve mobil istasyon (MS) aynı anda ve sürekli olarak veri iletir (Faruque, 2019).



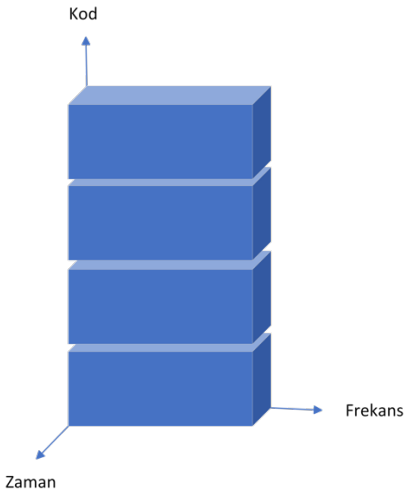
Şekil 2.1. FDMA Yapısı

İlk analog hücresel sistemi olan AMPS (Gelişmiş Cep Telefonu Sistemi), FDMA/FDD teknolojisine dayanmaktadır. Tek bir kullanıcı, çağrı süresince bir kanalı işgal eder ve bu tek kanal, aslında 45 MHz'lik bir frekans farkı ile ayrılmış iki yönlü (çift yönlü) kanaldan oluşur. Bir arama sona erdiğinde veya hücre değişimi gerçekleştiğinde, kanal serbest bırakılır ve başka bir mobil abonenin kullanımına sunulur. Bir diğer erişim tekniği zaman bölmeli çoklu erişim (TDMA) tekniğidir. Dijital sistemlerde, kullanıcılar her zaman kendilerine tahsis edilen bant genişliğini kullanmadığından, sürekli veri iletimi gerekli değildir. Bu durumda, TDMA, FDMA'ya kıyasla daha verimli bir erişim tekniği sağlar. GSM (Mobil İletişim için Küresel Sistem) ise TDMA teknolojisini benimsemiştir. Şekil 2.2'de görüldüğü üzere TDMA'da kullanıcılar tüm bant genişliğini yalnızca belirli zaman dilimleri için kullanabilir. Çoğu durumda, bant genişliği FDMA'ya göre daha az sayıda kanala bölünür ve kullanıcılar, o kanaldaki tüm bant genişliğini kısa süreliğine kullanabilecekleri zaman dilimlerine atanır. TDMA tekniği, bant genişliğini zaman bölgesinde paylaşan kullanıcılar arasında hassas bir zaman senkronizasyonu gerektirir. Bu yöntemde, iletim ve alım farklı zaman dilimlerinde yapılır ve bu işlem Zaman Bölmeli Çift Yönlü İletişim (TDD) olarak adlandırılır. GSM ise, TDMA'nın bir varyasyonunu kullanarak, FDD ile verileri dijitalleştirir ve sıkıştırır. Ardından, veriler her bir kullanıcının kendi zaman dilimine sahip olduğu farklı çerçevelerde aynı kanalda iletilir (Faruque, 2019).



Şekil 2.2. TDMA Yapısı

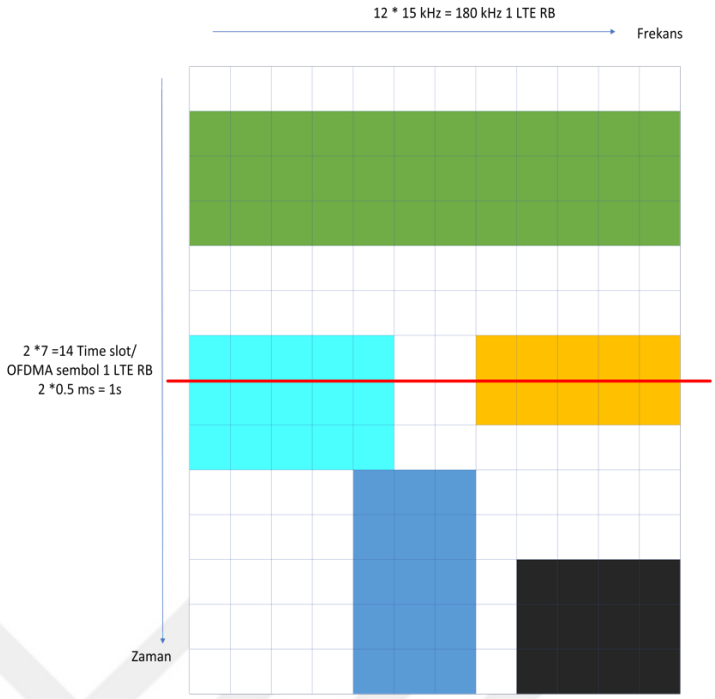
Bir diğer erişim tekniği olan kod bölmeli çoklu erişim, radyo iletişim teknolojilerinde tercih edilen bir başka yöntemidir. Şekilde 2.3'de gösterildiği gibi CDMA, birden fazla vericinin aynı frekansta ve aynı anda veri iletmesine olanak tanıyan bir tekniktir. Bu, birçok kullanıcının bir frekans bandını paylaşabilmesini sağlar. Kullanıcılar arasında karışıklık ve parazit oluşmaması için CDMA, yayılmış spektrum teknolojisi ve her vericiye özgü bir kod atama yöntemi kullanır. CDMA tekniği, 3G teknolojisinde kullanılmaktadır. Üstün spektral verimliliği sayesinde, daha fazla kullanıcı aynı bant genişliğini paylaşabilir. Gelişmiş hata düzeltme teknikleri ile daha iyi çağrı kalitesi sunarken, çağrı kesilme oranlarını da azaltır. Ayrıca, gelişmiş multimedya özellikleri ile eşzamanlı ses ve veri iletimini destekler. Günümüzde kullanılan görüntülü görüşme teknolojisi ilk olarak 3G teknolojisinde kullanılmıştır. Bu hücresel ağlar için devrim niteliğinde bir gelişme olmuştur. Ancak, CDMA'nın yayılmış spektrum yapısı nedeniyle ağ planlaması ve optimizasyonu daha karmaşıktır. Özellikle yoğun nüfuslu ve kapsama alanlarının örtüştüğü bölgelerde spektrum girişimi (interference) sorunları yaşanabilmektedir (Jamalipour vd., 2005).



Şekil 2.3. CDMA Yapısı

LTE'de kullanılan Ortogonal Frekans Bölmeli Çoklu Erişim (OFDM) ise, yüksek veri hızları ve verimlilik sağlayan bir tekniktir. Bu yöntem, geniş bir frekans bandını küçük alt frekanslara böler ve her bir alt frekansta veri taşıyıcılarını konumlandırır. Bu alt frekansların birbirine dik (ortogonal) olması, frekanslar arasında girişim olmamasını sağlar ve bu da OFDM'in en önemli avantajlarından biridir. Özellikle CDMA tekniğinde yaşanan girişim sorunlarına çözüm getirmiştir. OFDM, zaman ve frekans bölmelerini birleştirerek hem verimliliği artırır hem de yansımalar ve çoklu yol yayılımlarının neden olduğu bozulmalara karşı direnç sağlar. LTE sisteminde veri iletimi için kullanılan OFDM alt frekans bantları, her biri 15 kHz genişliğinde olan "Alt Taşıyıcılar" (Subcarriers) ile ifade edilir ve bu alt taşıyıcılar zaman-frekans alanında ayrılmıştır.

Şekilde 2.4'te gösterildiği üzere LTE'deki kaynaklar "Kaynak Elemanları (Resource Elements - RE)" ve "Kaynak Blokları (Resource Blocks - RB) " olarak tanımlanır. Bir kaynak elemanı, bir alt taşıyıcı ve bir OFDM sembolü tarafından belirlenen en küçük veri birimidir. Bir kaynak bloğu ise 12 alt taşıyıcı (180 kHz genişlik) ve 1 ms'lik sürede (7 veya 6 OFDM sembolü) birleştirilen bir yapıdan oluşur. RB'ler, LTE ağlarında kullanıcı verisinin taşındığı temel birimlerdir ve bu bloklar hem yukarı hem de aşağı bağlantıda veri iletimi için kullanılır. Bu yapılar, spektrum kullanım verimliliğini en üst düzeye çıkarır ve kullanıcılar arasında dinamik kaynak paylaşımını mümkün kılar. Her bir renk farklı kullanıcıyı temsil etmektedir. (Navita ve Amandeep, 2016).



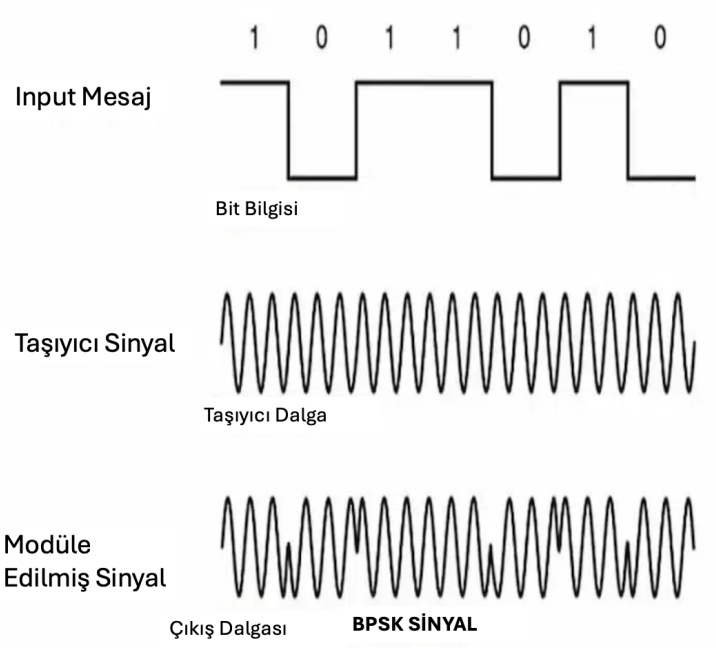
Şekil 2.4 OFDMA yapısı ve LTE' de 1 RB yapısı

5G ile beraber kullanılması hedeflenen Ortogonal Olmayan Çoklu Erişim (NOMA) tekniği ise önceki yöntemlerden farklı olarak güç domainini kullanmaktadır. İstasyondan gelen sinyal her iki kullanıcının alıcısında alınan sinyal, her iki kullanıcının iletim sinyallerinin bir süperpozisyonundan oluşur. Bu nedenle, her kullanıcının sinyalini alabilmesi ve kendi verilerini çözebilmesi için çok kullanıcılı sinyal ayrımının abone tarafında uygulanması gerekir. Bu, maksimum olasılık algılama veya SIC (Ardışıklık Girişim İptali) gibi doğrusal olmayan alıcılar tarafından sağlanabilir. Bu doğrultuda, kullanıcılar arasındaki kanal kazanç farklarından yararlanılarak, güçlü kullanıcının sinyalinin zayıf kullanıcıdan önce çözülmesi sağlanır. SIC tekniği, güçlü kullanıcının sinyalini çıkararak zayıf kullanıcının sinyalini daha düşük girişimle çözmesine olanak tanır. Böylece, aynı frekans kaynakları daha verimli bir şekilde kullanılarak spektral verimlilik artırılır. NOMA'nın bu özelliği, özellikle yüksek kullanıcı yoğunluğu olan 5G ağlarında daha fazla kullanıcıya hizmet sunmayı mümkün kılarken, aynı zamanda enerji verimliliği ve gecikme sürelerinde de iyileştirmeler sağlar.

2.1.2 Modülasyon Teknikleri

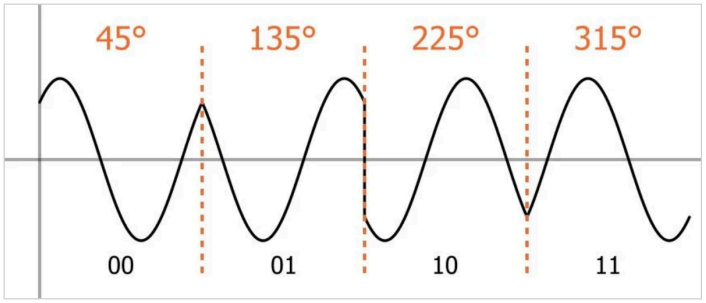
Modülasyon, sinyallerin verimli iletimini sağladığı için kablosuz iletişim sistemlerinde önemli bir rol oynar. Modülasyon sayesinde, iletilmek istenen bilgi, kablolu veya kablosuz bir kanal üzerinden iletilebilecek bir taşıyıcı elektromanyetik dalgaya gömülür. Vericide gerçekleştirilen modülasyon ve alıcıda yapılan demodülasyon işlemi, orijinal sinyalin doğru bir şekilde geri dönüştürülmesini sağlar. QPSK, QAM ve BPSK gibi farklı modülasyon şemaları, sinyalleri iletmek ve almak için kullanılır ve bu sayede iletişim sisteminin verimliliği artırılır. Ayrıca, ağ modülasyon teknikleri, kablosuz ağların verimliliğini artırmak ve enerji tasarrufu sağlamak için kullanılabilir. Genel anlamda, modülasyon, çeşitli iletişim mimarilerinde güvenilir ve verimli iletişim sağlama açısından kritik bir öneme sahiptir. Dijital modülasyon teknikleri, daha fazla gürültü bağışıklığı, kanal bozulmalarına karşı dayanıklılık ve çoklu yol yayılımı (multi-path) ile yansıma (fading) koşullarında daha iyi performans sunar. Bu modülasyonlar, ses, veri ve video gibi farklı bilgi türlerinin daha kolay çoğullamasını sağlayarak iletişim sistemlerinde avantajlar sunar.

BPSK: İkili Faz Kaydırma Anahtarlama (BPSK), iletişim sistemlerinde bilgi iletmek amacıyla kullanılan basit ve verimli bir modülasyon tekniğidir. Şekil 9’da BPSK için bir sinyal örneği verilmiştir. BPSK'de taşıyıcı sinyal, her sembolde fazının 180 derece değiştirilmesi ile modüle edilir. 180 derecelik bir faz kayması 0'ı, faz kayma olmaması ise 1'i temsil eder. Bu teknik, gürültü ve parazit gibi etkilerin yoğun olduğu iletişim kanallarında verimli ve daha garanti çalışması özelliği nedeniyle tercih edilir. BPSK ile her sembolde yalnızca 1 bit bilgi taşınabilir, bu da onu düşük veri hızına sahip ancak kararlı bir modülasyon yöntemi haline getirir (Madankar ve Ashtankar, 2016).



Şekil 2.5. BPSK sinyal örneği

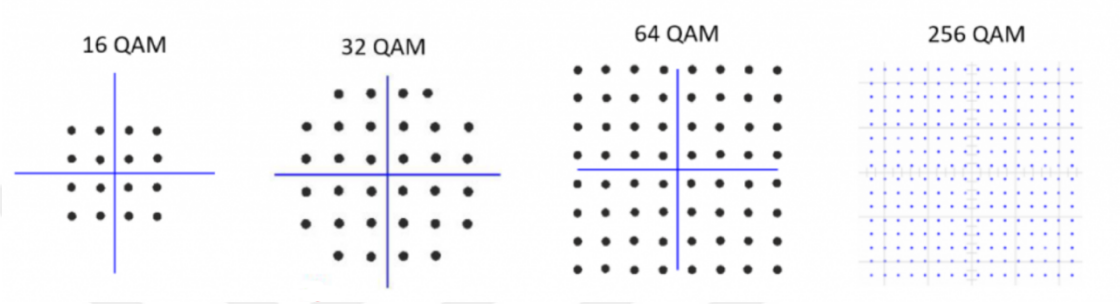
QPSK: Şekil 2.6, Kuadratur Faz Kaydırmalı Anahtarlama (QPSK) modülasyonunu göstermektedir. Dörtlü Faz Kaydırmalı Anahtarlama (QPSK) her bir sembol 2 bitlik bilgi içerdiği, dört farklı taşıyıcı faz kaymasından (0, 90, 180 veya 270 derece) birini seçerek iki bitin aynı anda modüle edildiği bir Faz Kayması Anahtarlama (PSK) türüdür. QPSK, aynı bant genişliğini kullanarak sıradan PSK'ya göre iki kat daha fazla bilgi taşıyabilme kapasitesine sahiptir. Bu teknik, MPEG2 video, kablolu modemler, video konferans, mobil kablosuz iletişim sistemleri ve dijital verilerin bir RF taşıyıcısı üzerinden uyduyla iletimi gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılır (Birla vd., 2014).



Şekil 2.6. QPSK Modülasyon Örneği

QAM: Dörtgen Genlik Modülasyonu (QAM) hem genlik hem de faz modülasyon tekniklerini birleştiren bir dijital modülasyon yöntemidir. QAM, veri taşıma kapasitesi

açısından QPSK'dan daha üstündür. QAM, aynı taşıyıcı üzerinde iki sinyalin iletilebileceği düşüncesine dayanır, bu sinyallerden biri diğerine göre belirli derecelerde faz kaymasıyla modüle edilir. QAM modülasyonu, her bir taşıyıcıyı Amplitude Shift Keying (ASK) ve Phase Shift Keying (PSK) teknikleriyle modüle ederek daha yüksek veri hızları sağlar (Halawa vd., 2016). QAM türünde modülasyonun derecesi arttıkça veri hızının artması ile bu modülasyonun sağlık bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için ihtiyaç duyulan sinyal kalitesi seviyesi doğru orantılı bir şekilde artmaktadır.



Şekil 2.7 Dörtgen Genlik Modülasyon Örnekleri

2.1.3 Taşıyıcı Bant Genişliği

GSM'de (Mobil İletişim için Küresel Sistem), "taşıyıcı bant genişliği" terimi, bir GSM taşıyıcısına veya kanalına tahsis edilen frekans bandının genişliğini ifade eder. Aynı coğrafi bölgede birden fazla kullanıcının aynı anda hizmet alabilmesi için birden fazla taşıyıcı kullanılır. Her taşıyıcı, belirli bir frekans bandında çalışır ve paraziti önlemek amacıyla genellikle bitişik taşıyıcılardan koruma bantları (guard bant) ile ayrılır. GSM'deki taşıyıcı bant genişliği 200 kHz'dir, bu da her taşıyıcının ses veya veri iletimi için yeterli spektral alana sahip olmasını sağlar. Bu bant genişliği, UMTS (3G) teknolojisinde 5 MHz, LTE teknolojisinde ise 15 kHz'lik daha küçük taşıyıcılardan oluşur. Ancak, LTE'de kullanılan bu küçük taşıyıcı genişliği yanıltıcı olmamalıdır, çünkü LTE, tamamen farklı bir çoklu erişim tekniği (OFDMA) kullanıp küçük taşıyıcıları bileştirerek daha yüksek veri hızlarına ulaşır.

2.1.4 Anahtarlama Teknikleri

Mobil teknolojileri birbirinden ayıran iki temel anahtarlama tekniği vardır: devre anahtarlama ve paket anahtarlama. Devre anahtarlama, veri iletimi başlamadan önce iki cihaz arasında özel bir iletişim hattının kurulduğu bir yöntemdir. Bu hat, oturum boyunca

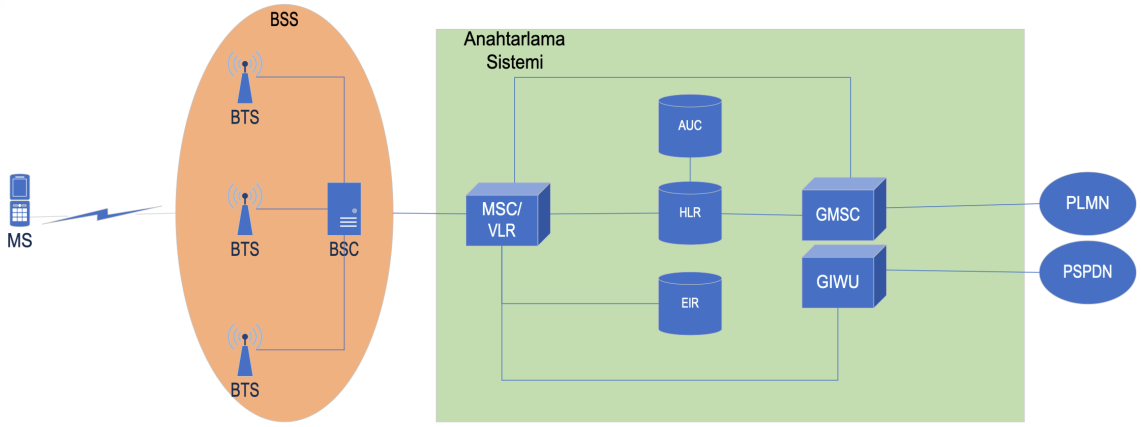
iletişime özel ayrılmış olarak kalır ve başka cihazlar, kullanıcılar tarafından kullanılamaz. Devre anahtarlama, sesli iletişimde ve bazı veri iletimlerinde yaygın olarak kullanılır. Bu yöntemde, iletişim süresince bant genişliği garanti edilir, çünkü özel bir yol tahsis edilmiştir. Paket anahtarlama ise, verilerin paket adı verilen küçük birimlere bölündüğü ve ağ üzerinden iletildiği bir yöntemdir. Her paket, yönlendirme ve kaynak-hedef bilgilerini içerir. Paketler, hedefe ulaşmak için farklı yollar izleyebilir ve ağ tıkanıklığı nedeniyle bozulma veya gecikme yaşanabilir. Paket anahtarlama, bant genişliğinin birden fazla kullanıcı tarafından paylaşılmasına olanak tanıdığı için daha verimli bir yöntemdir. Bu yöntem, kaynakların sadece veri iletimi gerektiğinde tahsis edilmesi sayesinde daha dinamik bir yapı sağlar (Baransel vd., 1995).

2.2 GSM

GSM ilk olarak 1980'lerin sonunda Avrupa'da geliştirilen dijital hücresel iletişim standardıdır. GSM'in geliştirilmesine 1982 yılında, Avrupa Telekomünikasyon Standartları Enstitüsü (ETSI) öncülüğünde başlandı. Amaç, Avrupa çapında uyumlu bir cep telefonu standardı oluşturarak, farklı ülkelerde ve operatörler arasında kesintisiz mobil iletişim sağlamaktı. İlk GSM ağı 1991 yılında Finlandiya'da açıldı ve bu teknoloji kısa süre içinde dünya genelinde yaygınlaştı. GSM, analog sistemlerden dijital sistemlere geçişte önemli bir dönüm noktası oldu ve 2G (İkinci Nesil) günümüzdeki mobil iletişimin temelini oluşturdu.

GSM'in temel özelliklerinden biri TDMA teknolojisini kullanmasıdır. Bu teknoloji, bir frekans kanalını zaman dilimlerine bölerek birden fazla kullanıcının aynı frekansta aynı anda veri iletmesini sağlar. GSM, 900 MHz ve 1800 MHz frekans bantlarında çalışır. Ses iletimi ve SMS (Kısa Mesaj Servisi) gibi temel hizmetlerin yanı sıra ilerleyen yıllarda, GSM üzerinden veri iletimi için GPRS ve EDGE teknolojileri ile farklı hizmet türleri eklenmiştir. Bu sayede, ilk dönemlerde daha düşük hızda veri aktarımı sağlanırken, zamanla internet ve MMS gibi multimedya hizmetleri de mümkün hale gelmiştir. GSM, günümüzde 3G, 4G ve 5G gibi teknolojilere geçilmiş olmasına rağmen, halen birçok ülkede yaygın bir şekilde kullanılmakta ve özellikle kırsal alanlarda ve bazı IoT cihazlarında etkin bir şekilde hizmet vermektedir (Eberspächer vd., 2008).

Şekil 2.8, bir GSM iletişim ağının temel mimarisini göstermektedir. Kullanıcı Cihazı (MS) üzerinden iletişim, Baz İstasyon Alt Sistemi (BSS) ile sağlanır. BSS, baz istasyonlarını (BTS) ve bunları yöneten Baz İstasyon Denetleyicisi'ni (BSC) içerir. Bu yapı, çağrı ve veri trafiğini Anahtarlama Sistemi'ne iletir. Anahtarlama Sistemi, Mobil Anahtarlama Merkezi (MSC) ve Ziyaretçi Konum Kaydı (VLR) gibi bileşenleri içerir. Ev Konum Kaydı (HLR), kullanıcı abonelik bilgilerini saklarken, Yetkilendirme Merkezi (AUC) güvenlik doğrulamalarını gerçekleştirir. Ekipman Kimlik Kaydı (EIR), cihazların kimlik kontrolünü yapar. GMSC (Gateway MSC), diğer şebekelerle bağlantıyı sağlar ve GIWU (Gateway for Interworking Units) ise veri ağlarıyla entegrasyonu mümkün kılar. Sistemin uç noktalarında ise Genel Anahtarlamalı Telekomünikasyon Ağı (PLMN) ve Anahtarlamalı Genel Paket Veri Ağı (PSPDN) bulunur.



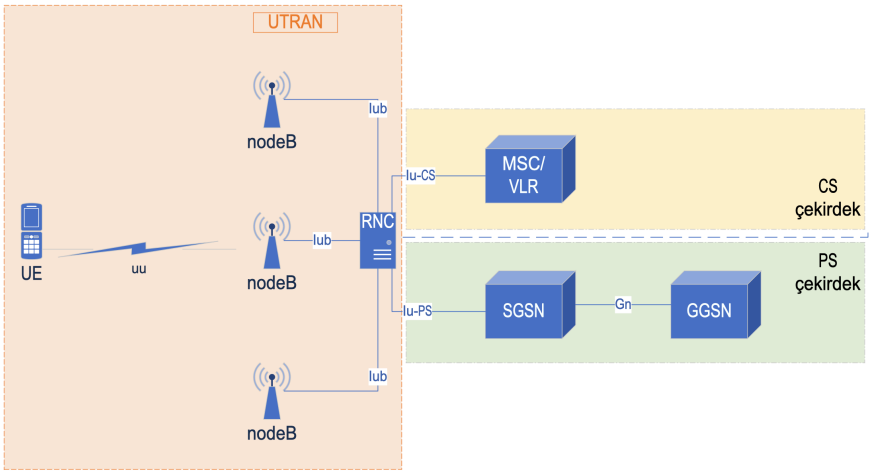
Şekil 5.8 GSM mimarisi şebeke elemanları

2.3 UMTS/3G

Üçüncü nesil (3G) mobil ağ sistemi, mobil iletişim teknolojilerinde önemli bir sıçramayı temsil eder. 3G, 1999 yılında Evrensel Mobil Telekomünikasyon Sistemi (UMTS) adı altında geliştirilmiştir ve Avrupa'daki 3GPP tarafından standartlaştırılmıştır. UMTS, önceki nesil olan GSM (2G) ile geriye dönük uyumlu olacak şekilde tasarlanmıştır. Bu sayede, GSM ve UMTS ağları arasında birlikte çalışma durumu (interoperability) mümkündür. 3G teknolojisi hem daha yüksek veri hızları hem de daha gelişmiş hizmetler sunarak, mobil internet ve multimedya hizmetlerinin önünü açmıştır. Ayrıca, 3G'deki mobil cihazlar Kullanıcı Ekipmanı (User Equipment, UE) olarak isimlendirilir ve bu cihazlar genellikle hem 2G hem de 3G iletişimini destekleyen, çift modlu çok bantlı terminallerdir. Şekil 2.9'da gösterildiği üzere 3G ağlarının radyo erişim kısmına genel

olarak RAN (Radyo Erişim Ağı) denir ve bu terim hem 2G hem de 3G teknolojileri için ortaktır. UMTS için kullanılan radyo erişim teknolojisine ise WCDMA (Geniş Bant Kod Bölmeli Çoklu Erişim) denir ve bu radyo erişim ağı UTRAN olarak adlandırılır. 2G'deki BSC şebeke elamanın yerini UMTS ağında, baz istasyonlarının kontrolünden sorumlu olarak RNC (Radyo Ağı Denetleyicisi) gerçekleştirir. UMTS'nin GSM'den en önemli farklarından biri, kullanıcı düzlemini kontrol düzleminden ve radyo ağını taşıma ağından ayırmasıdır. Bu ayrım, farklı radyo erişim teknolojilerinin (RAT'ler) aynı çekirdek ağ üzerinde çalışmasına olanak tanır ve ağın esnekliğini artırır. UMTS'nin genel ağ yapısı, GSM'ye benzer, ancak daha gelişmiş ve esnek bir mimariye sahiptir, bu da 3G'nin daha yüksek performanslı hizmetler sunmasına katkıda bulunur ("UMTS Architecture and Functionality", 2009).

Şekil 2.9, UMTS mimarisini ve CS (Circuit-Switched - Devre Anahtarlamalı) ile PS (Packet-Switched - Paket Anahtarlamalı) etki alanlarının rolünü göstermektedir. GSM ve UMTS sistemlerinde, CS etki alanı devre anahtarlamalı tüm trafiği yönetir ve özellikle sesli aramalar gibi gerçek zamanlı servisler için kullanılır. PS etki alanı ise paket anahtarlamalı trafiği işleyerek yüksek veri aktarımı için uygun bir altyapı sunar. Bu yapı, internet erişimi ve video akışı gibi hizmetlerin sağlanmasını mümkün kılar.



Şekil 2.9 UMTS (3G) Mimarisi

UMTS mimarisinde Kullanıcı Ekipmanı (UE), NodeB olarak adlandırılan baz istasyonları aracılığıyla iletişim kurar. NodeB'ler, Radyolink Kontrolörü (RNC) ile bağlantılıdır ve bu

bütünleşik yapı UTRAN (UMTS Terrestrial Radio Access Network) olarak adlandırılır. RNC hem CS hem de PS çekirdek ağlarına bağlanır. CS çekirdek kısmında Mobil Anahtarlama Merkezi (MSC) ve Ziyaretçi Konum Kaydı (VLR) birimleri, devre anahtarlamalı trafiği yönetirken sesli arama hizmetlerini destekler. PS çekirdek kısmında ise SGSN (Serving GPRS Support Node) ve GGSN (Gateway GPRS Support Node) birimleri, paket anahtarlamalı trafiği yönlendirir ve veri iletişim hizmetlerini sağlar.

NodeB ile RNC arasındaki bağlantı Iub arayüzü ile sağlanırken, RNC'nin CS çekirdeğe bağlantısı Iu-CS, PS çekirdeğe bağlantısı ise Iu-PS arayüzleriyle gerçekleştirilir. Bu çift modlu yapı sayesinde kullanıcılar, GSM ve UMTS ağları arasında geçiş yaparken sorunsuz bir hizmet deneyimi yaşar.

WCDMA, 1998 yılında Avrupa Telekomünikasyon Standartları Enstitüsü (ETSI) tarafından seçilmiş ve hem FDD hem de TDD varyantlarını destekler. FDD, farklı frekans bantlarında yukarı ve aşağı bağlantı iletişimlerini sağlar, TDD ise zaman dilimleri üzerinden bu iletimleri yapar. WCDMA'da sinyal spektrumu, yayılma kodları kullanılarak genişletilir. Bu genişleme, her bilgi sembolünün, "0" ve "1" değerlerini içeren yüksek hızlı bir çip yayılma dizisi ile kodlanarak gerçekleştirilir. Bu yayılma işlemi, spektrum verimliliğini artırır ve çoklu kullanıcıların aynı frekansta birbirine müdahale etmeden iletişim kurmasını sağlar ("UMTS Terrestrial Radio Access Network—Architecture and Protocols", 2009).

2.4 LTE (4G)

Uzun Vadeli Evrim (LTE), 3G hizmetlerinde bir sonraki adım olarak gelişen bir mobil iletişim teknolojisidir ve 3GPP tarafından standartlaştırılmıştır. LTE ilk piyasaya sürülme teknolojisi baz alındığında, kullanıcılarına saniyede 150 Mbps kadar bir aşağı bağlantı (download) hızı ve 50 Mbps'ye kadar bir yukarı bağlantı (upload) hızı sunar. Bu hızlar, mobil veri iletişiminde önemli bir sıçrama olarak kabul edilir. Sonraki yıllarda bu hızlar daha yüksek seviyelere ulaşmıştır. Sabit kablosuz ve kablolu iletişim standartlarının hızla 100 Mbps veya daha yüksek hızlara ulaşmasıyla birlikte, LTE hücresel ağlar üzerinden bu yüksek veri hızlarını sağlayarak kullanıcı deneyimini önemli ölçüde iyileştirmeyi hedeflemiştir. LTE'nin amacı, 3G'den daha yüksek hızlar ve daha düşük gecikmelerle geniş bant hizmetlerini mobil cihazlara taşımaktır.

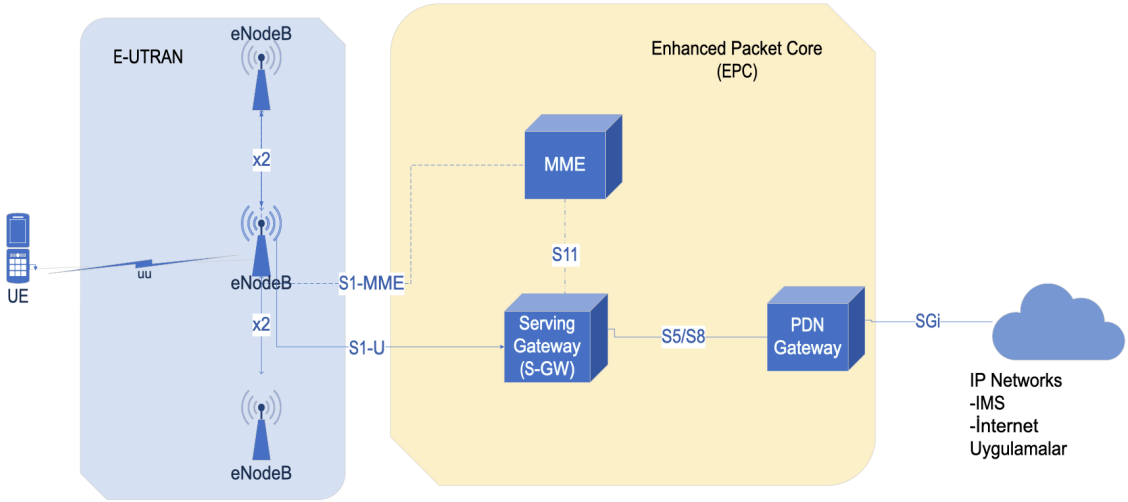
LTE, bu yüksek veri hızlarını sağlamak için OFDM teknolojisini kullanır. OFDM, spektrum verimliliğini artıran gelişmiş girişim kontrol teknikleri ile dikkat çeker. Ayrıca, MIMO (Multiple Input Multiple Output) gibi teknolojilerin kolayca uygulanmasını sağlar, bu da sinyal kalitesini ve veri hızlarını artırır. LTE'de ayrıca esnek spektrum kullanımı mümkündür, yani operatörler ağlarını 1.4, 3, 5 MHz gibi dar bant genişliklerinden başlayarak, çok daha geniş spektrumlarda (10, 15, 20 MHz'e kadar) ölçeklendirebilirler. Bu esneklik, operatörlerin farklı spektrum kaynaklarına sahip olduğu yeniden frekans dağılımı (refarming) senaryolarında, mevcut spektrumları verimli bir şekilde kullanmalarına olanak tanır. LTE'nin gelişmiş zamanlama teknikleri ve girişim azaltma özellikleri, çoklu kullanıcıların aynı anda veri iletmesini sağlayarak hücresel ağların kapasitesini artırır. Bu da LTE'yi, hem yüksek veri hızı talebi olan kullanıcılar hem de operatörler için ideal bir teknoloji haline getirmiştir (Muhammad Imran Sarwar, 2020) .

Şekilde 2.10'da LTE mimarisi şebeke ekipmanları ile gösterilmiştir. LTE ağının çekirdek kısmı olan EPC (Evolved Packet Core), hem kontrol hem de kullanıcı düzlemleri için bir dizi işlevsel öğe içerir. Kontrol düzlemi, EPC'deki hareketlilik ve sinyalizasyon işlemlerini yönetir ve en kritik elemanlardan biri MME (Mobility Management Entity)'dir. MME, LTE ağında UE bilgilerini yönetir ve depolar, geçici kimlikler üretir ve UE'lere tahsis eder. Aynı zamanda, kullanıcı kimliğini doğrulama, hareketliliği yönetme ve taşıyıcıları yönetme gibi önemli görevleri yerine getirir. MME ayrıca, NAS (Non-Access Stratum) sinyallemesi için bir sonlandırma noktası olarak da işlev görür. MME, UE ve çekirdek ağ arasındaki sinyalizasyonun yönetildiği katmandır.

Kullanıcı düzlemi (U-plane) ağ geçidi olan Serving Gateway (S-GW), kullanıcı verisinin radyo erişim ağı (E-UTRAN) üzerinden EPC'ye taşınmasını sağlar. S-GW, inter-eNodeB (farklı eNB'ler arası) ve intra-3GPP (LTE ile 2G/3G ağları arasındaki mobilite) hareketliliği için bir bağlantı noktası görevi görür. Aynı zamanda, ECM-IDLE durumundaki UE'ler için paket yönlendirme, aşağı bağlantı verilerinin arabelleğe alınması ve yönlendirme gibi işlemlerden sorumludur. Bu, UE'nin aktif olmadığı durumlarda bile veri paketlerinin gerektiği şekilde işlenmesine yardımcı olur.

Packet Data Network Gateway (P-GW) PDN (Packet Data Network) için kullanıcı düzlemi ağ geçidi olarak konumlandırılmıştır. İnternet veya operatörün IP Multimedya Alt Sistemi (IMS) gibi dış ağlarla bağlantı sağlamaktadır. P-GW, kullanıcı IP adreslerinin atanması, politika uygulaması ve ücretlendirme gibi kritik işlemleri yürütür. P-GW, kullanıcı verisinin dış dünyaya iletilmesi ve politikalara uygun şekilde yönlendirilmesinden sorumlu olduğu için, LTE ağının önemli bir bileşenidir.

LTE'nin radyo erişim ağı kısmı olan E-UTRAN (Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network), eNB (eNodeB) adı verilen baz istasyonlarından oluşur. eNB, UE'ye hava arayüzü sağlar ve X2 arayüzü üzerinden diğer eNB'lere, S1 arayüzü üzerinden ise MME ve S-GW'lere bağlanır. Bir eNB, birden fazla MME ve S-GW ile bağlantı kurabilir, bu da ağ esnekliğini ve güvenilirliğini artırır. Bu mimari, S1-flex olarak bilinmekte ve ağın, yük dengesine göre farklı MME ve S-GW'ler arasında esnek bağlantılar kurmasına olanak tanımaktadır (Cox, 2014).



Şekil 2.10 LTE Mimarisi

2.5 5G

LTE başlangıçta tasarlandığında, en önemli kullanım durumu Mobil Geniş Bant (MBB) için yüksek hızlı internet erişimiydi. Bu amaçla, LTE ağı, IP paketlerini mümkün olan en hızlı şekilde iletmek üzere optimize edilmiş ve düşük gecikmeli bir hava arayüzü sağlayacak şekilde tasarlanmıştı. Bağlı ve boşta durumlar arasında hareket ederken kullanıcıların kesintisiz hizmet alması ve yüksek veri hızları elde edebilmesi hedeflendi.

Ancak, zamanla teknolojik gelişmeler ve farklı kullanım senaryolarının ortaya çıkması, LTE'nin bu ilk tasarımının ötesine geçememesini sebep oldu. Ancak teknolojideki gelişmeler beraberinde Makine-Makine (M2M) haberleşmesi, nesnelerin interneti, arttırılmış ve sanal gerçeklik uygulamaların haberleşmesi konularını ortaya çıkarmıştır.

M2M uygulamaları, genellikle çok düşük veri hızları gerektiren ve veri gecikmelerinin sorun olmadığı bir teknolojidir. Ancak bu cihazlar genellikle küçük pillerle çalıştıkları için, enerji verimliliği en önemli bir faktördür. NB-IoT (Dar Bant Nesnelerin İnterneti) gibi teknolojiler, bu tip senaryolara hitap etmek için LTE'de geliştirilmiştir. Bu cihazlar, çok uzun süreler boyunca (haftalar, aylar, hatta yıllar) pil ömrünü koruyabilmek amacıyla, veri aktarımı sırasında uzun boşta kalma sürelerinde mümkün olduğunca güç açısından verimli olacak şekilde tasarlanmış hava arayüzlerine ve prosedürlere ihtiyaç duymaktadır (Gupta ve Jha, 2015).

Uygulama spektrumunun diğer ucunda ise Araçtan Araca (V2V) iletişim yer alır. Bu tür iletişimler, çok düşük gecikme süresi gerektirir çünkü zaman hassasiyetine sahiptir. Güç tüketimi bu senaryolarda daha az önemli bir faktördür, çünkü araçlar genellikle yeterli enerji kaynağına sahiptir. Bu gibi senaryolar için LTE, taşıyıcı birleştirme (carrier aggregation) gibi teknolojilerle yüksek veri aktarım hızları ve düşük gecikme sağlamak üzere yıllar içinde birçok gelişmeye uğramıştır.

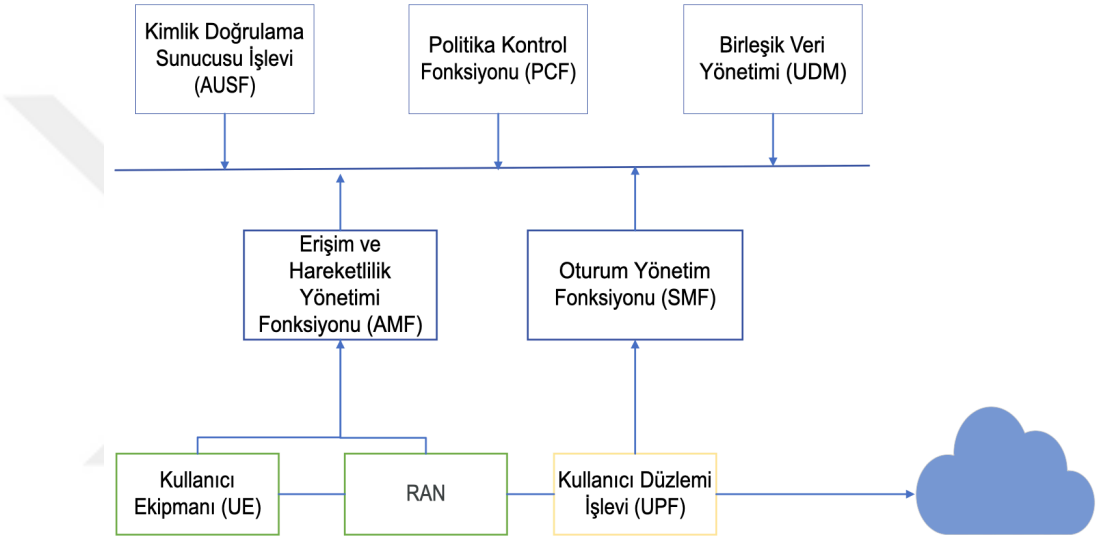
LTE'nin mevcut hava arayüzü ve çekirdek ağ mimarisi, başlangıçta Mobil Geniş Bant (MBB) hizmetlerine odaklanmış bir yapıdadır. Ancak, LTE'nin MBB odaklı katı yapısı, mobil olmayan geniş bant senaryoları veya IoT gibi farklı iletişim ihtiyaçları olan cihazlar için bazı sınırlamalar getirebilmektedir. Örneğin, LTE'nin optimizasyonları arasında NB-IoT (Dar Bantlı Nesnelerin İnterneti) ve yüksek hız, düşük gecikme gereksinimlerine uygun çözümler geliştirilmiş olsa da, bu yapılar belirli kullanım durumları için hala kısıtlamalar içerebilir. İşte tam bu noktada 5G, LTE'nin sınırlamalarını aşan bir mimariyle devreye girmektedir. 5G, geniş bant dışındaki senaryoları destekleyecek şekilde tasarlanmış, esnek bir altyapı sunarak ultra düşük gecikme, yüksek güvenilirlik ve IoT cihazlarının yoğun kullanımını hedeflemektedir (Cox, 2021).

LTE'de kullanılan birçok prosedür, zamanlama ilişkilerine dayanmaktadır. Örneğin, LTE spesifikasyonlarına göre, HARQ (Hybrid Automatic Repeat Request) ACK/NACK yanıtlarının belirli bir gecikmeyle gönderilmesi gerekmektedir. Bu kısıtlamalar, LTE'nin geliştirildiği dönemdeki mobil cihazların işlem gücü sınırlamalarına bağlı olarak uygulanmıştı. Ancak günümüz cihazları, gelişmiş işlemciler sayesinde bu işlemleri çok daha hızlı gerçekleştirebilmektedir. Buna rağmen, LTE'nin geriye dönük uyumluluğu koruma gerekliliği, bu zamanlama kısıtlamalarını devam ettirmektedir. 5G ise bu tür sıkı zamanlama ilişkilerinden kaçınarak, daha dinamik ve düşük gecikmeli bir yapıyla modern teknolojik gereksinimlere uyum sağlamaktadır. Bu, 5G'nin ultra düşük gecikme ve ultra güvenilir iletişim (URLLC) gibi yenilikçi kullanım durumlarını desteklemesine olanak tanımaktadır.

Spektrum kullanımı açısından da LTE ile 5G arasında önemli farklılıklar bulunmaktadır. LTE, özellikle 6 GHz altındaki frekanslar için tasarlanmıştır ve 15 kHz alt taşıyıcı aralığı ile Ortogonal Frekans Bölmeli Çoklama (OFDM) kullanır. Bu yapı, orta mesafelerde veri aktarımı sırasında gecikme yayılmasını kontrol altına alarak, 20 MHz genişliğindeki kanallar için optimum bir performans sağlar. Ancak 5G, bu sınırları aşarak 100 GHz'e kadar çıkan spektrum aralıklarını hedefler. Bu durum, çok daha geniş alt taşıyıcı aralıklarının kullanılmasını gerektirir. Örneğin, 5G'de kullanılan birkaç yüz kHz'lik alt taşıyıcı aralıkları, kısa mesafelerde veri iletimine ve daha geniş kanal bant genişliklerine izin verir. Bu geniş bant yapısı, bireysel sembol iletim sürelerini kısaltarak hava arayüzü gecikmesini azaltır ve özellikle yüksek hızlı veri aktarımı gerektiren senaryolarda performansı artırır (Alhaj vd., 2022). Sonuç olarak, 5G'nin esnek ve ileriye dönük mimarisi, LTE'nin sınırlamalarını aşarak, IoT, endüstriyel otomasyon, düşük gecikmeli iletişim ve ultra geniş bant hizmetleri gibi yeni nesil kullanım durumlarını destekleyecek şekilde tasarlanmıştır. Bu dönüşüm hem kullanıcı deneyimini iyileştirmekte hem de mobil teknolojilerde çığır açan yeniliklerin temelini oluşturmaktadır.

5G mimarisi, Service-Based Architecture (SBA) olarak adlandırılan bir yapı ile sıfırdan tasarlanmıştır. Bu mimari, ağ işlevlerini hizmetlere göre bölerek daha esnek ve ölçeklenebilir bir yapı sunmuştur. 5G çekirdek ağı, fonksiyonların ağ üzerinden hizmet olarak sunulmasını sağlayan bu mimari ile optimize edilmiş ve belirli hizmetler için düşük

gecikme, yüksek hız ve güvenilirlik sunmak üzere yapılandırılmıştır. Bu yaklaşım, 5G'nin sadece yüksek hız değil, aynı zamanda makineden makineye iletişim, ultra düşük gecikme ve yüksek güvenilirlik gibi çeşitli senaryolara uyumlu hale gelmesini sağlamaktadır. Şekil 2.11'de 5G mimarisi ve bileşenleri gösterilmektedir. Görselden de anlaşılacağı üzere 5G mimarisi ağ işlevlerine göre hizmetlere bölünmüştür. Bu nedenle bu mimari 5G çekirdek servis temelli mimari (Service-Based Architecture (SBA)) olarak isimlendirilir (Lin ve Lee, 2021).



Şekil 2.11 5G Mimarisi

5G sisteminde, UE 5G Yeni Radyo (NR) erişim ağı üzerinden 5G çekirdek ağına ve veri ağlarına (DN) (örneğin, internet gibi) bağlanır. 5G çekirdek ağı, gelişmiş bir mimariye sahiptir ve farklı işlevlerle kullanıcıların taleplerini karşılamaktadır. Bu mimarinin ana bileşenlerinden biri, Erişim ve Mobilite Yönetimi İşlevi (AMF)'dir. AMF, UE'nin 5G ağına olan bağlantısı için tek giriş noktası olarak hizmet eder ve UE'nin talep ettiği hizmete göre bağlantıyı yönlendirir. AMF, Oturum Yönetim İşlevi (SMF) ile çalışarak, kullanıcı oturumunu yönetmektedir. SMF, UE'nin oturumlarını kontrol eder ve veri akışlarını yönetir. Kullanıcı verisinin dış ağlar ile UE arasında taşınmasından ise Kullanıcı Düzlemi İşlevi (UPF) sorumludur. UPF, IP veri trafiğini yönlendirir ve harici veri ağlarına erişimi sağlar. Bu fonksiyon, kullanıcı düzlemi işlemlerinin merkezindedir ve verilerin hızlı ve verimli bir şekilde aktarılmasını sağlar. Kimlik Doğrulama Sunucusu

İşlevi (AUSF), AMF'ye UE'nin kimliğini doğrulama konusunda destek verir. AUSF, kullanıcının kimliğini doğruladıktan sonra, UE'nin 5G çekirdek ağı üzerindeki hizmetlere erişmesine izin verir. Bu, ağın güvenliği açısından kritik bir işlemdir.

Diğer önemli işlevler arasında Politika Kontrol İşlevi (PCF), Uygulama İşlevi (AF), Birleşik Veri Yönetimi (UDM) ve Oturum Yönetimi İşlevi (SMF) bulunur. PCF, ağ davranışını yönetmek için politika kontrol çerçevesini sağlar ve bu politikaları uygular. UDM, kullanıcı abonelik bilgilerine erişerek kullanıcı oturumlarını ve ağ politikalarını düzenler. AF ise, belirli uygulamaların ağdaki ihtiyaçlarına göre optimize edilmesini sağlar. Bu mimari, 5G'nin esnek, ölçeklenebilir ve hizmete dayalı yapısını ortaya koyar ve ağın performansını kullanıcının talep ettiği hizmete göre optimize eder (De Simone vd., 2024).

GSM, UMTS, LTE ve 5G gibi geleneksel hücresel ağ teknolojileri, mobil iletişimde önemli bir rol oynamış ve birbirini takip eden nesillerle ağ performansını ve kapasitesini artırmayı hedeflemiştir. Bu sistemler, mobil cihazların sürekli olarak birbirine bağlanabilmesi için çeşitli çözüm ve teknikler sunmuş, ancak bu teknolojilerin her biri belirli sınırlamalara ve esneklik eksikliklerine sahiptir. Özellikle, ağın merkezileştirilmiş yapısı, esneklik ve yenilikçilik açısından bazı kısıtlamalar oluşturmuş, bu da daha gelişmiş ve uyarlanabilir bir yapının gerekliliğini ortaya koymuştur.

Bu bağlamda, O-RAN (Open Radio Access Network) mimarisi, daha esnek, açık ve modüler bir ağ yapısı sunmak için güçlü bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. O-RAN, operatörlerin ağlarını daha verimli yönetmelerine, daha hızlı inovasyon yapmalarına ve farklı donanım sağlayıcıları ile uyumlu bir şekilde çalışmalarına olanak tanır. O-RAN'ın sunduğu açık standartlar ve yazılım tabanlı mimariler, hücresel ağların daha dinamik bir şekilde yönetilmesini ve optimize edilmesini mümkün kılar. Bu tezde, geleneksel hücresel ağlardan O-RAN'a geçişin, özellikle kampüs ağları gibi spesifik uygulama alanlarında nasıl bir fark yaratabileceği uygulanabileceği ve bunun performans üzerindeki etkileri incelenecektir.

2.6 O-RAN TEKNOLOJİSİ

O-RAN (Open Radio Access Network) topluluğu, mobil ağ mimarisini daha açık, esnek ve yenilikçi hale getirmek amacıyla kurulmuştur. O-RAN'ın en önemli çalışma alanlarından biri, RAN (Radyo Erişim Ağı) işlevlerini birbirinden ayrıma yaklaşımıdır. Bu yaklaşım, geleneksel mobil ağ mimarisinde bir bütün olarak çalışan RAN işlevlerinin daha küçük, modüler ve açık arabirimlere ayrıştırılmasını sağlamaktadır (Alavirad vd., 2023; Salvat vd., 2023). Şekil 2.12'de görüldüğü gibi, Temel Bant Birimi (BBU), bir Merkezi Birim (CU) ve bir Dağıtılmış Birim (DU) olarak ikiye ayrılır (O-RAN ALLIANCE, 2023). O-RAN'ın sunduğu ayrışma yaklaşımı, telekomünikasyon sektöründeki tedarikçi çeşitliliğini arttırmanın önünü açmayı hedeflemektedir. Mevcut durumda, bu alandaki büyük şirketler hem donanım hem de yazılım üretebilmektedir. Bu yaklaşım beraberinde kapalı ve katı bir yapıyı da ortaya koymaktadır. Geleneksel mobil ağ mimarilerinde kullanılan RRU (Remote Radio Unit) gibi ekipmanlar, büyük tedarikçilerin sağlayıcı olduğu kapalı ekosistemlerde varlığını sürdürmeye devam etmektedir. Ancak O-RAN teknolojisinin getirdiği en büyük yenilik, bu kapalı yapıyı kırarak ağın şeffaf ve daha modüler hale dönüşümüdür.

O-RAN yaklaşımının ana hedefi, ağın RAN kısmını açık kaynak bir yapıya kavuşturmaktır. Bu kısım, genellikle kara kutu olarak adlandırılan ve kapalı mimari içinde çalışan bir yapıydı. Geleneksel telekomünikasyon ağlarında, tedarikçiler tarafından sağlanan ekipmanlar ve yazılımlar arasında sıkı bir bağımlılık bulunmakla birlikte bu durum, operatörlerin farklı tedarikçilerden ürün seçebilme esnekliğini sınırlamaktadır. O-RAN'ın getirdiği ayrışma, bu kara kutu yapısının açılmasını sağlamakta ve farklı tedarikçilerin donanım ve yazılım çözümlerinin bir arada çalışabilmesine olanak tanımaktadır.

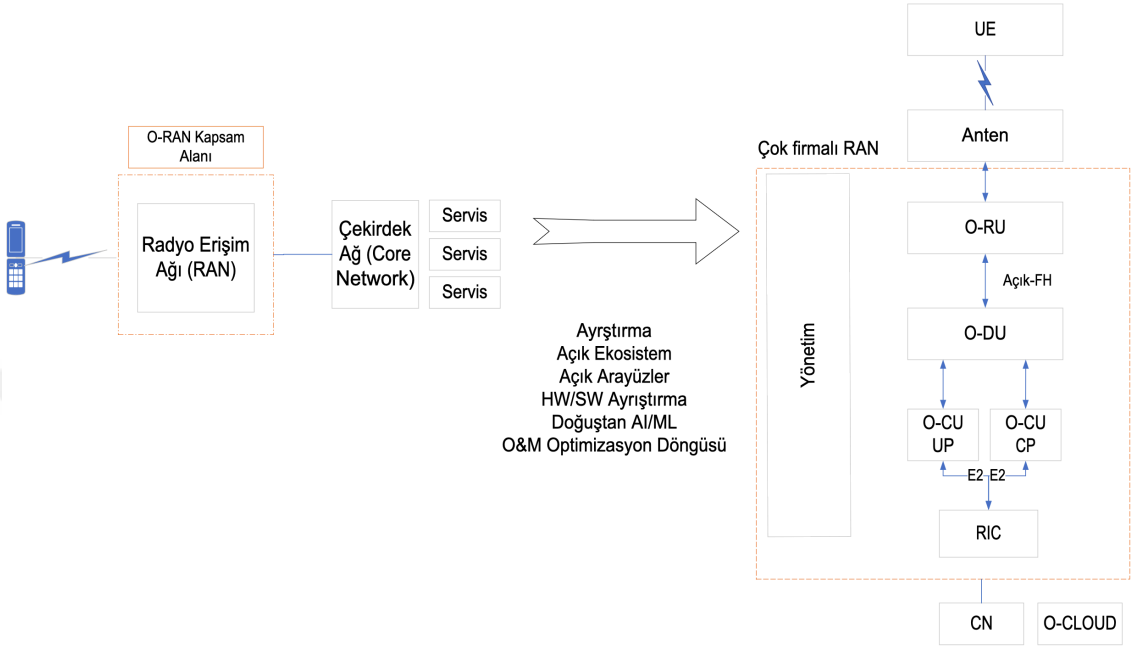
Şekil 2.12'de gösterilen O-RAN teknolojisinin kapsamı, ağ erişim kısmını daha şeffaf, açık ve akıllı bir hale getirmeye odaklanmaktadır. O-RAN, açık arabirimler ve modüler bir yapı sunarak operatörlerin ağ altyapısını daha esnek şekilde yapılandırmasını sağlamaktadır. Bu yaklaşım, daha küçük ve yenilikçi firmaların da telekomünikasyon pazarına girmesini kolaylaştıracaktır. Bu durum sadece büyük firmaların donanım ve yazılım çözümleri yerine, operatörlerin açık standartlara uygun farklı tedarikçilerden ürün

seçebilmesine imkân sunmaktadır. Ayrıca, O-RAN'ın bir diğer önemli hedefi de ağın daha akıllı hale dönüşmesini sağlamaktır. Yapay zekâ (AI) ile desteklenmiş RAN Intelligent Controller (RIC) gibi bileşenler sayesinde ağların daha dinamik yönetilmesi mümkün olabilecektir. Bu, ağların hem daha verimli çalışmasını hem de kullanıcı taleplerine daha hızlı ve optimize edilmiş yanıtlar verilmesini mümkün kılacaktır. Sonuç olarak, O-RAN'ın amacı, mobil ağ mimarisinde açıklık, şeffaflık ve esneklik sağlayarak daha rekabetçi bir ekosistem oluşturmak ve operatörlerin çeşitli tedarikçilerden ürün seçebilmesini sağlamaktır. Bu durum, pazardaki çeşitliliğin artmasına ve inovasyonun hızlanmasına katkıda bulunacaktır (D'Oro vd., 2024).

O-RAN'ın öne çıkan bir diğer yönü, telekomünikasyon şirketleri arasındaki iş birliğini güçlendirmek amacıyla kritik olan açık arayüz prensibidir. Bu, sistemlerin sorunsuz çalışabilmesi için açık bir arayüz gerektirir. Ayrıca, O-RAN yapısında OpenStack ve O-Cloud gibi kavramlar yer almaktadır. OpenStack, hem genel hem de özel bulut altyapılarını kurmak ve yönetmek için hizmetler sunan açık kaynaklı bir bulut bilişim platformudur. Bu platform, sanallaştırılmış ağ fonksiyonlarını (VNF'ler) ve O-RAN mimarisinin diğer bileşenlerini barındırmak için esnek ve ölçeklenebilir bir ortam sağlamaktadır. Cloud-Native Network Functions (CNF'ler) ile ilişkilendirilen O-Cloud kavramı ise genellikle konteyner ve mikro hizmet mimarileri kullanılarak geliştirilmektedir. Bu sayede daha modüler ve ölçeklenebilir yapılar tasarlanabilmektedir. Merkezi bulut, bilgi işlem kaynaklarının tek bir veri merkezinde toplanmasını ifade etmektedir.

O-RAN'ın geleneksel mimariden ayıran en önemli yeniliklerinden bir diğeri de RAN Akıllı Kontrolör (RIC) yapısıdır. RIC, O-RAN içinde AI ve ML'nin entegre şekilde çalıştığı bir alan sunmaktadır [16]. RIC, radyo erişim ağlarına çoklu satıcı uyumluluğu, zekâ, esneklik ve programlanabilirlik kazandıran Open-RAN'ın ayrıştırma stratejisinin kilit bir parçasıdır. Bu yapı, mobil operatörlere ürün toplam maliyet tahmini (TCO) azaltırken, müşterilerin deneyim kalitesini (QoE) arttıran yenilikçi kullanım senaryolarını destekleyebilmektedir. Aynı zamanda RAN operasyonlarını büyük ölçekte otomatikleştirip optimize eden üçüncü taraf uygulamaların entegrasyonunu mümkün kılmaktadır. Bu gelişme, Radyo Kaynak Yönetimi (RRM), komşuluk optimizasyonu (yük dengeleme), Kendi Kendini Organize Eden Ağlar (SON) ve çeşitli satıcılar tarafından

yürütülen spektrum yönetimi gibi AI tabanlı optimizasyon fonksiyonlarının gelişimini desteklemektedir (N. F. Cheng vd., 2022; O-RAN ALLIANCE, 2023; Polese vd., 2023c; Rimeod Labs, 2023).



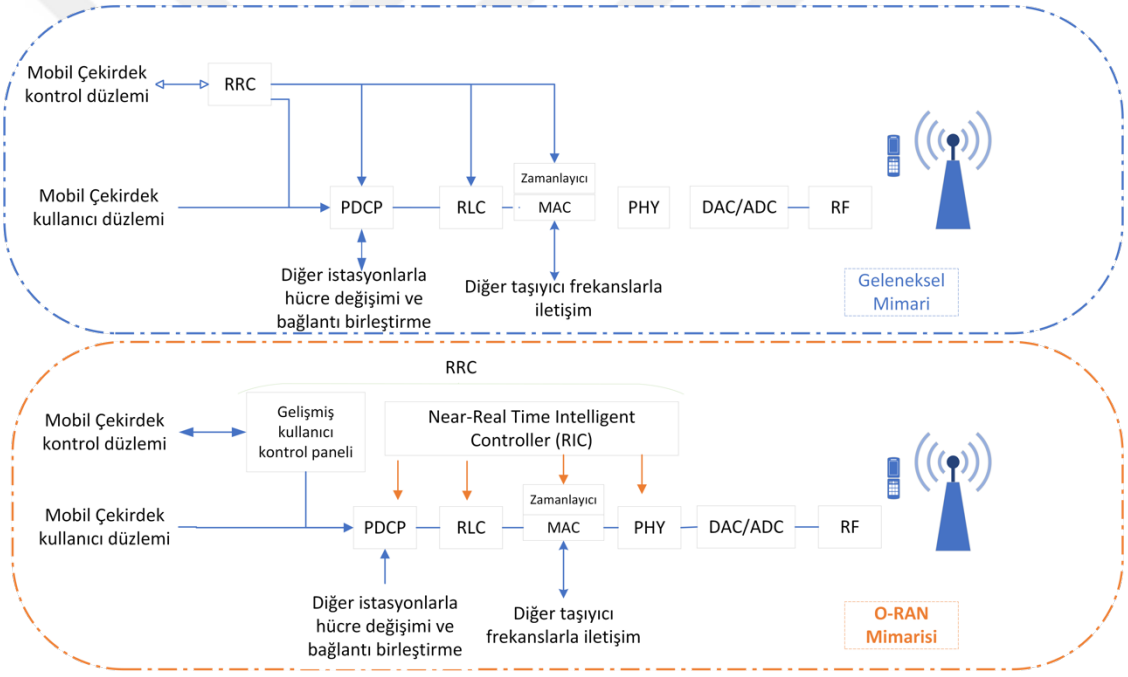
Şekil 2.12 Ayrılmış Radyo Erişim Ağı

Benzer bir mimari 3GPP tarafından da tanımlanmış olmakla birlikte, O-RAN yaklaşımı (Chopra, 2023), açık ön taşıyıcı arayüzünün sağladığı esneklik sayesinde, bu yapıları (RU, DU) birbirleriyle açık arayüzler üzerinden iletişim kurabilecek şekilde farklı üreticiler tarafından geliştirme imkânı sunmaktadır. DU ve CU işlevleri, geleneksel BBU yapısına karşılık gelirken, RU geleneksel RAN sistemlerinde olduğu gibi işlevini korumaktadır. Ancak O-RAN mimarisi, bu bileşenleri mantıksal olarak ayırma yeteneği sunarak, bulut teknolojisinin mobil ağlara entegre edilmesine olanak tanımaktadır (Rimeod Labs, 2023),(Kazemifard ve Shah-Mansouri, 2021).

O-RAN mimarisinde, bir DU'ya birden fazla RRU bağlanabilir ve bir CU'ya birden fazla DU bağlanabilir. Bu mantıksal yapılandırma, büyük fiziksel toplama noktalarına olan gereksinimi ortadan kaldırarak daha hızlı, güvenilir, erişilebilir, yönetilebilir ve kontrol edilebilir bir ağ yapısı sunar. Ayrıca, bu mantıksal mimari Google, Oracle, IBM ve

VMware gibi büyük şirketlerin bulut hizmetlerine kolayca uyum sağlayarak, onların ihtiyaçlarını karşılayacak esneklikte çalışabilir.

Şekil 2.13, hem geleneksel hem de O-RAN mimarilerindeki ağ katmanlarını göstermektedir. Her iki mimaride de radyo taşıyıcısını, yayın sistemi bilgilerini, konfigürasyon yönetimini ve raporlamayı ayarlayıp sürdüren bir RRC (Radyo Kaynak Kontrolü) katmanı bulunur (Salvat vd., 2023). Geleneksel ağ mimarilerinde, RRC, PDCP (Paket Veri Yakınsama Protokolü), RLC (Radyo Bağlantı Kontrolü), MAC (Ortam Erişim Kontrolü) ve fiziksel (PHY) katmanları, CU ve DU'nun kontrol ettiği ve yönettiği şekilde tipik olarak BBU tarafından yönetilir. Bu yapı, katmanlı bir mimari ile tanımlanır. O-RAN'da ise RIC mimarisine geçiş, bu katmanların ayrılması süreciyle başlar.



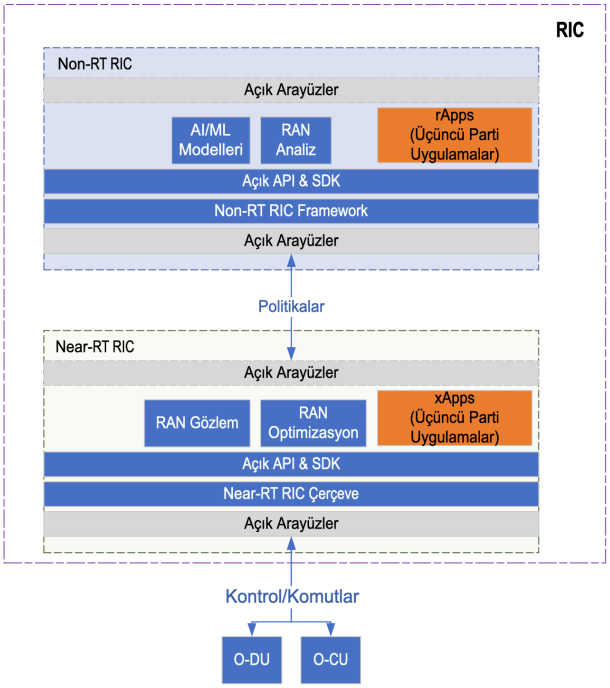
Şekil 2.13 Geleneksel RAN mimarisi ve O-RAN mimarisi kıyaslama

Geleneksel RAN mimarisinde, kısıtlı sayıda satıcı RAN özelliklerini geliştirme yetkisine sahipti. Ancak RIC sayesinde birçok satıcı, operatörlere hem maliyet tasarrufu hem de performans iyileştirme potansiyeli sunan çeşitli uygulamalar ve yenilikçi çözümler geliştirebilmektedir. Bu açık inovasyon yaklaşımı, RAN çözümlerinin daha çevik ve hızlı bir şekilde hayata geçirilmesine olanak tanır. Günümüzde optimizasyonlar genellikle hücre seviyesinde gerçekleşmekte olup, değişiklik öncesi ve sonrası veri toplama ve

analiz süreçleri daha uzun bir zaman dilimini gerektirir. Ancak, RIC'in neredeyse gerçek zamanlı işleyişi sayesinde, optimizasyon kararları milisaniyeler içinde, kullanıcı düzeyinde çağrı işleme sırasında alınabilir. Bu yaklaşım, RAN'ın gerçek zamanlı kontrol ve otomasyonu için açık bir çerçeve ve platform kullanarak operatörlere büyük bir avantaj sağlar (Upadhyaya vd., 2022).

2.6.1 RIC Yapısı

RIC, ağ performansını iki tür denetleyici aracılığıyla kontrol eder ve yönetir: 10 ms ile 1 saniye arasında yanıt sürelerine sahip olan gerçek zamanlıya yakın denetleyici (Near-RT RIC) ve 1 saniyeden daha uzun yanıt sürelerine sahip olan gerçek zamanlı olmayan denetleyici (Non-RT RIC). Bu denetleyiciler, kullanıcı sayısı, trafik yoğunluğu, hız ve kaynak kapasitesi gibi anahtar performans ölçümleri (KPM) temelinde ağ üzerinde optimizasyonlar yapabilmektedir. Bu yapının en önemli katkısı, ağı otomatik olarak optimize eden kapalı döngü kontrol mekanizmasıdır. Ağ dilimleme, yük dengeleme, hücre devri ve kaynak tahsisi politikaları gibi uygulamalar, ağ optimizasyonuna örnek olarak gösterilebilir. Şekil 2.14'de de görüldüğü üzere RT-olmayan-RIC, SMO (Servis Yönetimi ve Orkestrasyonu) yapısının bir parçası olarak görev yapar. RT-olmayan-RIC, gerçek zamanlı olmayan bir kontrol döngüsü kullanarak, RT-RIC süreçlerini iyileştirecek bilgiler sunmakta, rehberlik sağlamakta ve AI/ML modellerinin yönetimini gerçekleştirmektedir (Bonati vd., 2023; Rimeod Labs, 2023). Ayrıca, RT-olmayan-RIC, SMO operasyonlarını etkileyebilir ve bu sayede SMO'ya bağlı olan O-RAN mimarisinin tüm bileşenlerini dolaylı olarak yönetme yeteneği kazanır. Bu, RT-olmayan-RIC'nin binlerce cihazı etkileyen kapsamlı kararlar almasına ve politikaları uygulamasına olanak tanır. O-RAN mimarisinde temel bir yapı olan RT-olmayan-RIC, RT-yakın-RIC'e benzer şekilde, 1 saniyeden daha uzun sürede çalışan kapalı bir kontrol döngüsü yürütür ve 3. taraf uygulamalar (rAPP'ler) için destek sağlar.



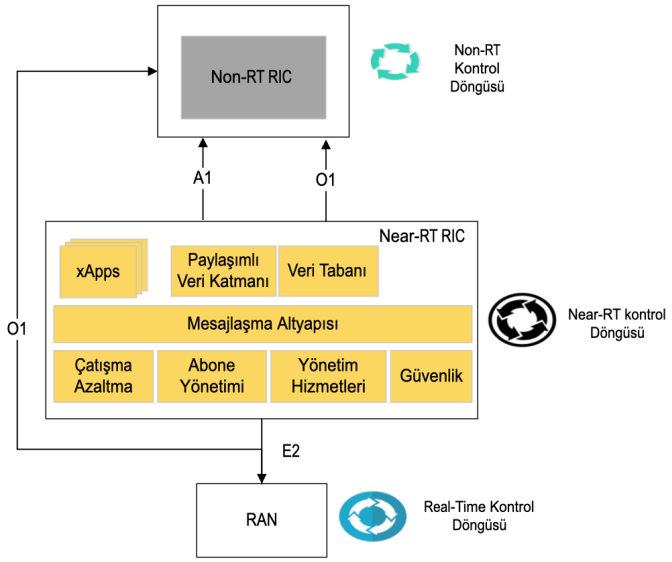
Şekil 2.14 RIC Mimarisi

RT-yakın-RIC ve Kontrol Döngüsü, ağ kenarlarında uygulanarak 10 ms ile 1 saniye arasında değişen periyodik kontrol döngüleri yürütür. Ağın kenar noktası, kuruluş ağının üçüncü taraf ağ hizmetleriyle buluştuğu ve temel ağ altyapısının kim tarafından kontrol edildiğini belirleyen bir veya daha fazla güvenlik sınırıyla tanımlanır. Uç bilgi işlem ise verileri son kullanıcılara daha yakın bir yerde işleyen dağıtılmış bir mimaridir. RT-yakın-RIC, genellikle birden fazla RAN düğümüyle bağlantılı çalışır ve bu nedenle, RT'ye yakın kapalı döngü kontrolü, yüzlerce hatta binlerce kullanıcının Hizmet Kalitesi (QoS) üzerinde etkili olabilir.

O-RAN topluluğunun önerdiği açık radyo erişim ağı mimarisinde, ayrıştırılmış radyo erişim ağlarını dağıtmak ve yönetmek için kullanılan karmaşık platform ve yazılım katmanlarını bir araya getiren mimariye SMO adı verilir. SMO, RAN etki alanını yönetir. Şekil 2.15'de (O-RAN ALLIANCE, 2023) RT-yakın-RIC yapısı gösterilmiştir. Özel mantık işlemlerini destekleyen ve xAPP adı verilen hizmetlerin uygulanması için bu yapı kritik bir rol oynar. xAPP mikro hizmetleri, standartlaştırılmış arayüzler ve hizmetler aracılığıyla radyo kaynak yönetimini gerçekleştirir. Bu mikro hizmetler, telsiz erişim ağından kullanıcı ve hücre bilgileri, KPM değerleri gibi verileri toplar ve gerektiğinde bu

bilgileri işleyerek kontrol işlemlerini yürütür. RT-yakın-RIC, xAPP uygulamalarını etkin bir şekilde desteklemek için farklı özellikler ve yetenekler sunar, böylece ağ performansı ve kaynak yönetimi optimize edilebilir.

- RAN hakkında bilgi içeren veri tabanı (örneğin bağlı RAN düğümleri, kullanıcı listesi vb.) ve bilgilerin xApps arasında paylaşılabileceği bir veri katmanı,
- O-RAN platformunun farklı bileşenleri arasında mesajlaşma altyapısı,
- Açık arayüzler ve uygulama programlama arayüzleri (API'ler) için sonlandırmalar,
- Aynı RAN üzerinde çalışan birden çok xApp'te çakışmaları önlemek için bir mekanizma.



Şekil 2.15 RT-yakın-RIC Mimarisi

E2 arayüzünün sunduğu yetenekler sayesinde, RT-yakın-RIC RAN'ın kontrol ve optimizasyon süreçlerinde kritik bir rol oynar. RT-yakın-RIC, xAPP uygulamalarının uygulanması için O1, A1 ve E2 gibi arayüzlere sahiptir ve bu arayüzler, mikro hizmetlerin uygulanması ve yönetilmesini sağlar. O-RAN, gerekli işlevleri ve gereksinimleri tanımladığından, standartlara uygun olarak geliştirilen farklı uygulamaların aynı hizmetleri sunması beklenir. Ancak, O-RAN bu uygulamaların gereksinimlerini ayrıntılı olarak belirlememiştir. Buna rağmen, (Polese vd., 2023a)'da tanımlanan özelliklere sahip referans uygulamalar, O-RAN Yazılım Topluluğu (OSC) aracılığıyla prototip olarak

kullanılabilmektedir. RT-yakın-RIC, konteynır kümeleri üzerinde mikro hizmetler olarak çalışan birden fazla bileşene dayanır, bu da sistemin esnek ve ölçeklenebilir bir yapıya sahip olmasını sağlar.

A1 Arayüzü, bir xApp veya rApp geliştirirken dikkate alınması gereken en kritik arayüzlerden biridir. O-RAN mimarisinde, A1 arayüzü, SMO içerisindeki RT-olmayan-RIC ile RT-yakın-RIC'i birbirine bağlamaktadır (O-RAN ALLIANCE, 2023). Bu arayüz, protokolleri veya prosedürleri değiştirmeye gerek kalmadan yeni hizmetlerin ve veri türlerinin ağa entegre edilmesini sağlar. A1 arayüzü ayrıca dahili uygulamalar veya RT-yakın-RIC üzerinde çalışan uygulamalar için ilke tabanlı rehberlik sunar. RT-yakın-RIC tarafından uygulanan politikalar için, RIC dışındaki taraflarda basit bir geri bildirim mekanizmasıyla izleme yeteneği sağlar. RT-yakın-RIC'de A1 arayüzü üzerinden iletilen politikalar, Politika Uygulama Hizmetinde standartlaştırılmış bir mekanizma kullanılarak tanımlanır ve uygulanır.

2.6.2 O-RAN Uygulamaları

O-RAN, gerçek zamanlı ve geçmiş verileri analiz etmek için yapay zeka ve makine öğrenimi algoritmalarını RAN Akıllı Denetleyicilerine entegre eder. Değişen trafik modellerini karşılamak için kaynakları dinamik olarak tahsis eder ve bu sayede gelişmiş verimlilik sağlar. Ağ sorunlarını kullanıcıları etkilemeden önce tahmin ederek ve hafifleterek tutarlı hizmet kalitesi sağlayıp kullanıcı deneyimine pozitif deneyim yansıtır. Ağ yönetimini otomatikleştirir, operasyonel harcamaları (OPEX) azaltır.

O-RAN Ağ dilimleme ile, fiziksel bir ağı, her biri belirli bir kullanım durumu için optimize edilmiş birden fazla sanal ağa (dilim) bölmesine olanak tanır. Örneğin:
yüksek hızlı veri hizmetleri için Geliştirilmiş Mobil Geniş Bant (eMBB), otonom araçlar veya endüstriyel otomasyon gibi uygulamalar için Ultra Güvenilir Düşük Gecikmeli İletişim (URLLC), milyarlarca bağlı cihazı desteklemek için devasa IoT dilimlemesi. Çeşitli hizmet gereksinimlerini verimli bir şekilde ele alarak ölçeklenebilmeyi sağlar. Sağlık, üretim veya oyun sektörü gibi farklı endüstriler için ağ kaynaklarını özelleştirir, esneklik sağlar. Özel ağ hizmetleri sunarak operatörlere yeni kazanç fırsatları doğurmaktadır (Haryo Prananto vd., 2022).

O-RAN, kullanılmayan kaynakları (örneğin, yoğun olmayan saatlerde radyo üniteleri) kapatmak ve trafik taleplerine göre güç kullanımını optimize etmek gibi enerji tasarrufu mekanizmalarını içerir. Trafik tahmini ve güç ayarı için yapay zekâ algoritmaları ve kaynak israfını en aza indirmek için dinamik spektrum tahsisi ile enerjiden tasarruf sağlayabilmektedir. Küresel sürdürülebilirlik hedefleriyle uyumlu bir şekilde karbon emisyonlarını azaltarak çevreye fayda sağlama olanaklarına sahiptir. Özellikle yoğun kentsel dağıtımlarda operatörler için enerji faturalarını düşürerek tasarruf sağlama potansiyeli bulunmaktadır. Operasyonel verimliliği ön planda tutarak hizmet kalitesinden ödün vermeden optimum performans sağlayacaktır.

O-RAN, uç bilgi işlem platformlarıyla sorunsuz bir şekilde entegre olur ve verilerin kullanıcıya veya veri kaynağına daha yakın bir şekilde işlenmesini sağlar. Bu, görevleri merkezi bulut sunucularından kenar düğümlere boşaltarak gecikmeyi azaltır. Bu sayede otonom araçlar için gerçek zamanlı analizleri, çok düşük gecikme gerektiren sanal gerçeklik ve artırılmış gerçeklik (AR/VR) hizmetleri, trafik izleme veya kamu güvenliği sistemleri, akıllı şehir uygulamaları gibi fonksiyonlar için büyük avantaj sağlayacaktır. Çevrimiçi oyun veya uzaktan ameliyatlar gibi gecikmeye duyarlı hizmetler için bu servisler çok önemlidir. Yerelleştirilmiş işleme, ağın uç noktalarında veri işleme ve karar alma yeteneklerinin dağıtılmasını ifade eder; bu sayede, çekirdek ağa bağımlılığı azaltarak hem gecikmeyi en aza indirir hem de çekirdek ağ arızaları sırasında hizmet sürekliliğini sağlayarak kesintisiz iletişim imkânı sunar (Queirós vd., 2024).

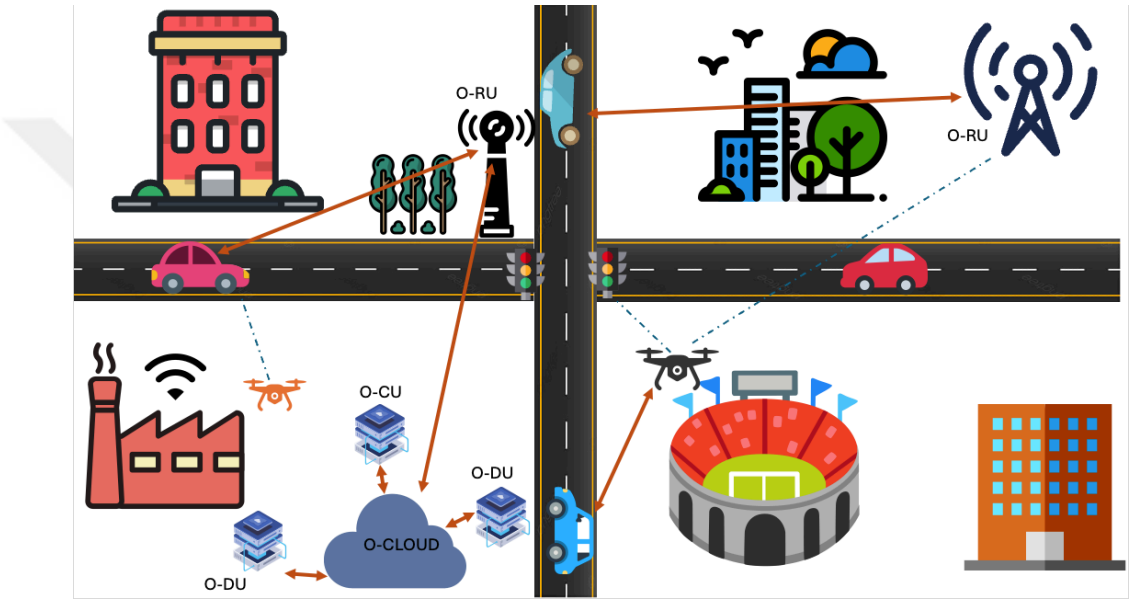
O-RAN, açık kaynaklı yazılım ve ticari kullanıma uygun (COTS) donanımdan yararlanarak kırsal ve yetersiz hizmet olan alanlarda uygun maliyetli ve ölçeklenebilir dağıtım sağlayacaktır. Kompakt ve düşük maliyetli radyo üniteleri, uzaktan operasyonlar için bulut tabanlı RAN yönetimi gibi yetenekleri bulunmaktadır. Geniş bant hizmetlerini uzak yerleşimlere ulaştırarak bölgeler arasındaki dijital servis farkını kapatmaya imkân sağlamaktadır. 5G ve ötesine yönelik gelecek yıllardaki sistem yükseltmeleri, güncellemelerini daha uygun maliyetli ve esnek bir şekilde destekleyerek operatörlerin teknolojik gelişimleri hızlı takibi ve uygulamasına zemin hazırlar.

2.6.3 O-RAN Mimarisinde Hücre Değişimi

Hücre değişim kablosuz mobil ağ haberleşmesinde kritik öneme sahip bir konudur. Sadece O-RAN için değil diğer hücresel ağ teknolojilerinde de üzerine çok çalışılan bir konudur. Bir mobil kullanıcının ağdan aldığı değişen sinyal gücü seviyesine rağmen bağlantısı kopmadan ağdan servis alabilmesi çok önemlidir. Bu nedenle mobil kullanıcıların daha uygun hücrelere yönlendirilmesi gerekmektedir.

Sürekli gelişen teknolojiler ile hücresel ağ kullanıcı terimi ve beklentileri de hızla değişmektedir. Şekilde 2.16'da görüldüğü üzere akıllı şehirler, dronlar, nesnelerin interneti cihazları gibi yeni kullanıcı ve servis tipleri ortaya çıkmıştır. Yeni nesil hücresel ağlarda, çeşitli ağ hedeflerini aynı anda optimize etmek için gerekli olan hücre değişim tetikleme olayları daha karmaşık hale gelmektedir. Örneğin, bir hedef hücre için alınan sinyal hizmet veren hücreden daha güçlü olduğunda ve hedef hücrenin mevcut kaynakları olduğunda ve onunla bağlantı kurmak için enerji verimli olduğunda, kullanıcı bu hücreye bir hücre değişim isteği başlatabilir. Ağ operatörleri, ağ önceliklerini ve ağ dilimlerini destekleyerek daha iyi ağ performansı için çeşitli yeni parametreler de tanımlayabilmektedir. Bu durumlarda, karmaşık ve dinamik ağ koşullarına uyum sağlama ve öğrenme yeteneği göz önüne alındığında yapay zekanın hücre değişim karar sürecini modellemek için önemli bir potansiyel taşıdığı görülmektedir. Çok sayıda çalışma (Beerten vd., 2023; Dzaferagic vd., 2024; Mahrez vd., 2023a; Prananto vd., 2023; Rastogi vd., 2023), kullanıcı tarafından bildirilen kanal kalitesi ölçümlerine ve hücre istatistiklerine dayanan ML temelli hücre değişim olaylarını tahmin etmek için çeşitli modeller önermiştir. Temel fikir, hedef baz istasyonunu kullanıcı için kaynak tahsisine hazırlamak amacıyla hücre değişim tetikleme olayını tahmin etmektir. Hedef baz istasyonunu proaktif olarak hazırlamak, hücre değişim kararı ertelendiğinde meydana gelen Radyo Bağlantı Arızalarını (RLF) en aza indirebilir ve bir UE'nin hizmet veren baz istasyonları arasında sık sık geçiş yaptığı Ping-Pong Hücre Değişimlerini (HOPP) azaltacaktır. Farklı çalışmalarda ise bağlantı problemlerini en aza indirme için DL algoritmaları önerilmiştir (Alraih vd., 2021; Mahamod vd., 2023). Bu algoritmaların yanı sıra, O-RAN'ın esnek ve açık mimarisi sayesinde hücre değişim yönetimi daha verimli hale gelmiş, ağdaki optimizasyon süreçleri merkezi bir yaklaşımla ele alınabilmiştir.

O-RAN yaklaşımı ile hücre değişim yönetiminde, komşu hücrelere olan anormal hücre değişimlerini de tespit etmek kolaylaşmıştır. Günümüzde aktif olarak İHA'lar hücresel ağlara bütünleşmiş şekilde kullanılmasa da çeşitli O-RAN benzetim programlarında İHA'ların ve karasal baz istasyonlarının bulunduğu bir ortamda hücre değişimin gecikmesini, paraziti ve radyo kaynağı kullanımını en aza indirmek için Derin Takviyeli Öğrenme (DRL) gibi makine öğrenmesi yaklaşımları çalışılmaktadır (Rastogi vd., 2023).



Şekil 2.16 O-RAN ve gelişen teknolojiler ile beraber farklı hücre değişimi ihtiyaçları

Bu bilgiler ışığında geleneksel mimaride hücre değişimi kararları genellikle statik ve önceden tanımlanmış kurallara dayanır. O-RAN ile bu kararlar, açık arayüzler ve yapay zekâ/makine öğrenimi (AI/ML) destekli algoritmalarla dinamik olarak alınabilir. Bu sayede O-RAN hücresel ağın geleneksel mimariye göre daha akıllı, öngörülü ve verimli olmasını sağlar. O-RAN geleneksel mimaride gerçek zamanlı olarak kontrol edilmesi zor olan kullanıcıların hareket hızı, trafik yükü ve sinyal gücü gibi parametreler gerçek zamanlı değerlendirilir. Geleneksel mimaride olduğu gibi O-RAN mimarisinde de hücre değişimi hem kullanıcı performansı hem de ağdaki hücrelerin kapasite ve kalite yönetimi açısından kritik öneme sahiptir. Bu tez çalışmasında O-RAN mimarisindeki hücre değişiminin etkisini inceleyebilmek için yeni hücre değişim algoritmaları önerilmiştir.

Hücre değişimi kararları genellikle birden fazla faktöre bağlıdır ve bu faktörler her zaman net değildir. Örneğin, hücre kapasitesi ve RSRP değerleri değişkenlik gösterebilir. Bulanık mantık, bu belirsizlikleri uzman görüşleri ve matematiksel fonksiyonları beraber kullanıp modelleyerek daha doğru kararlar alınmasını sağlar. Bu tez çalışmasındaki bulanık mantık sistemi, O-RAN mimarisinde RIC ile entegre edilerek gerçek zamanlı hücre değişim süreçlerinde kullanılabilir. Özellikle gerçek zamana yakın RIC üzerinden bulanık mantık algoritmaları çalıştırılarak karar süreçleri hızlandırılırken, süreçteki kararlılıkta artırılabilir. Bu sayede hücre değişiminde yaşanan kararsızlığa bağlı sinyal kesintileri minimuma indirilerek kullanıcı deneyimi iyileştirilir. Ayrıca, bu yaklaşım trafik yoğunluğu yüksek bölgelerde ağ kaynaklarının daha verimli kullanılmasını sağlar.

3. LİTERATÜR TARAMASI

Bu bölümde, O-RAN, O-RAN'larda hücre değişimi ve bulanık mantık ile ilgili literatürdeki güncel yöntem ve teknikler, çeşitli senaryolarla yapılan benzetimler açıklanacaktır. Marcin Dryjański çalışmasında, O-RAN mimarisinin tüm yönlerini göz önünde bulundurarak ayrıntılı olarak açıklamıştır (Rimeod Labs, 2023). Bu çalışmada RAN'ın kontrol ve optimizasyonunun çekirdeğini oluşturan Near-RT RIC ve O-RAN mimarisinin temel bileşenlerinden biri olan Non-RT RIC detayları özetlenmiştir. Yazar, AI/ML iş akışlarının mimariye nasıl uygulanacağından bahsetmiştir. O-RAN'daki güvenlik, uygulama ve standardizasyon çalışmaları tartışılmış ve mimarinin önümüzdeki yıllarda karşılaşacağı zorluklar ve endüstrinin ilerleyeceği yön ifade edilmiştir.

Lee ve ark., O-RAN mimarisinde RIC yapısının sorunsuz çalışabilmesi için verinin önemine vurgu yapmaktadır. NS-3 kullanılarak dinamik kaynak tahsisi ve gelişmiş modülasyon teknikleri gibi 5G mimarisinin özelliklerini daha iyi temsil eden bir O-RAN ağ simülasyonu geliştirilmiştir. Lee ve ark., (Lacava vd., 2023) numaralı çalışmada tasarlanan OpenRAN Gym RIC'i kullanarak bir xApp tasarlamıştır. Bu çalışma sonucunda, 5G mimarisi için gNB modül katmanlarının kolaylıkla geliştirilebileceği bir ortam oluşturulmuştur (Lee vd., 2024).

Mobil ağların 5G'den 6G'ye hızlı evrimi, Radyo Erişim Ağı tasarımında ve işletiminde bir paradigma değişimini başlatmıştır. Tatanzi ve Tang çalışmalarında, 5G ve sonrası gelecek nesil haberleşme mimarilerinde özellikle İHA'lar, IoT gibi cihazlardan oluşan karmaşık ortamlardaki hücre değişimlerinin dinamik yönetimini ele almışlardır. Zorlu hücre değişimi senaryoları için tasarlanmış bir O-RAN simülasyon aracı olan RANFusion'ı tasarlamışlardır. 3GPP standartlarına uygun şekilde geliştirilmiş, JSON tabanlı özelleştirilebilir konfigürasyon dosyalarıyla çok sayıda UE, gNodeB ve sektör destekleyen bir test ortamı sunmuşlardır. Tasarladıkları RANFusion simülasyonu ile deneylerde, yük dengeleme ve yoğun trafik senaryoları test edilmiştir. Kullanılan hücre değişim algoritması hücre değişim başarı oranı ve ortalama kullanıcı hızı gibi metrikler açısından değerlendirilmiştir. RANFusion, esnek API desteğiyle xApp veya rApp uygulamaları için özelleştirilebilir ve dinamik ağ koşullarına uyum sağlamaktadır (Natanzi ve Tang, 2024).

Cheng ve ark., O-RAN mimarisindeki uçtan uca ağ dilimlemenin eksikliğini vurgulayarak, bu boşluğu gidermek adına açık kaynaklı RAN çerçeveleri ile entegre edilmiş ağ dilimle özeliği olan ORANSlice platformunu geliştirmişlerdir. ORANSlice programlanabilir, 3GPP uyumlu RAN dilimleme ve zamanlama işlevlerine sahiptir. Ağ dilimleme, Telekom Operatörlerinin (TO) çeşitli Hizmet Seviyesi Anlaşmaları (SLA) ile hizmet sağlamayı desteklemesine olanak tanır. O-RAN mimarisinde ağ dilimleme işlemi, TO'ların özelleştirilmiş ağ hizmetleri ve daha yüksek ticari faydalar sağlamasına olanak tanımaktadır. Bununla birlikte, mevcut O-RAN topluluğunda, 5G için açık kaynaklı uçtan uca dilimleme çözümü hala bulunmamaktadır. RIC ve RAN arasındaki E2 arayüzünün genişletilmesi ve dilimleme için hizmet modelleri sayesinde RIC üzerinde xApps aracılığıyla RAN dilimleme kontrolünü ve optimizasyonunu desteklemektedir. Mevcut açık kaynaklı çerçeveler genişletilerek çoklu dilim uygulamaları, dilim önceliklendirme ve her dilim için minimum radyo kaynaklarının (örneğin, Fiziksel Kaynak Blokları- PRB) garanti edilmesini sağlayan mekanizmalar tasarlanmıştır (H. Cheng vd., 2024).

Cheng ve ark., 5G teknolojisi çerçevesinde Ultra Güvenilir Düşük Gecikmeli İletişim ve Gelişmiş Mobil Geniş Bant gibi farklı hizmetler için gereksinimlere ihtiyaç duyan kullanıcılara yönelik kaynak tahsisi ve ağ dilimleme ihtiyacını incelemişlerdir. Simülasyon ortamı olarak bir Python çerçevesi olan SimPy'yi kullanan araştırmacılar, etkili kaynak tahsisi ve ağ dilimleme için bir pekiştirmeli öğrenme (RL) algoritması geliştirmiş ve uygulamışlardır (N. F. Cheng vd., 2022).

Sarıkaya ve Onur çalışmalarında, yazılım tanımlı ağ ve ağ fonksiyonu sanallaştırma teknolojilerindeki gelişmelerle birlikte, ağ dilimleme kavramının önemini vurgulamaktadır. Çalışma, aynı fiziksel ağ içinde farklı amaçlar için faaliyet gösteren mantıksal olarak ayrılmış ağların işleyişini ele almıştır. RAN ağ dilimlerinin O-RAN tabanlı çok katmanlı 5G mimarisine entegre edilmesi incelenmiştir. Her ağ dilimi için farklı fonksiyonel seçeneklerini dikkate almışlardır. Daha sonra araştırmacılar, geliştirilen ve literatürdeki çalışmalarla sistematik olarak karşılaştırılan FlexNSP algoritmasını önermişlerdir. Bu algoritma, çok katmanlı O-RAN destekli 5G mimarisinde esnek işlevsel ayrımlara sahip bir ağ dilimleme yerleştirme problemini ele almıştır.

Problem matematiksel bir model olarak formüle edilmiştir. Çözüm için Gurobi çözücüsü (doğrusal ve doğrusal olmayan optimizasyon problemlerini çözmek için kullanılan, yüksek performanslı bir matematiksel optimizasyon yazılımı) kullanılmıştır (Sarikaya ve Onur, 2021).

Kumar ve ark., RAN'larda 5G teknolojisininde yaygın olarak kullanılmaya başlanmasıyla beraber mobil haberleşme sistemlerinin daha karmaşık hale geldiğini vurgulamışlardır. Bu durumun günden güne daha karmaşık komşuluk ilişkilerine yol açacağı düşünülmektedir. Bu bilgilerden yola çıkarak, komşuluk ilişkilerinde SON uygulamalarının öneminin altı çizilmiştir. Çalışma, özellikle O-RAN bağlamında otomatik komşuluk ilişkilerine (ANR) odaklanan bir x-App üzerine odaklanmıştır. Tasarım aşamasında Gini safsızlığına dayalı karar ağaçları kullanılmıştır (Kumar vd., 2020).

Polese ve ark. makalelerinde yeni nesil iletişim sistemlerinde programlanabilirliğin, ölçeklenebilirliğin ve ağ kontrolünün öneminden bahsetmektedirler. Çalışmalarını, uçtan uca bir deney ortamı tasarlamak amacıyla yürütmüşlerdir. Öncelikle geliştirilen ortam tanıtılmış, ardından yapay zekâ ve makine öğrenmesi tabanlı xApps'in nasıl tasarlanacağı hakkında bilgi vermektedir. Çalışma, 7 baz istasyonu ve 42 kullanıcının yer aldığı dijital ikiz teknolojisi ile Roma'daki Kolezyum konumunda bir O-RAN sistemin oluşturulup çeşitli ağ kontrollerini gösteren özel bir xApp örneğinden oluşmaktadır (Bonati vd., 2023; Polese vd., 2023a, 2024).

Pratheek ve ark. yapay zekanın O-RAN mimarisine entegrasyonunun getirdiği zorlukları, özellikle eski mimarilerle karşılaştırıldığında, ele almışlardır. RAN'da artan karmaşıklık ve esneklik gibi konular tartışılmıştır. Bu nedenle, gerçek ortamlardaki kullanım durumlarını tahmin etmek için uçtan uca bir platforma duyulan ihtiyacı vurgulamışlardır. Deneysel ortam, kurulum için C/C++ kullanılarak USRP X310 ile 5G SDN kullanılarak kurulmuştur. xApps'in işlevselliği E2 mesajları aracılığıyla gösterilmiştir (Upadhyaya vd., 2022).

Salvat ve ark. O-RAN performansını artırmayı, gerçek zamanlı ağ parametrelerini yapılandırmayı ve birden fazla sanal baz istasyonunun (vBS) güvenilir yönetimini

sağlamayı amaçlayan açık yönleri incelemiştir. Bu zorlukların üstesinden gelmek için, araştırmacılar beş vBS ve beş kullanıcıdan oluşan bir test ortamı oluşturmuşlardır. Çalışma için hesaplamalı platform tasarımı, Ubuntu işletim sistemi (OS) üzerinde çalışan 8 çekirdekli bir Intel i7-7700K CPU'yu kullanmıştır. Tasarladıkları test ortamı toplam üç bölümden oluşmaktadır; bilgi işlem veri kümesi, enerji veri kümesi ve uygulama veri kümesi. Bu veri setleri oluşturularak araştırmacılara yol gösterecek sonuç ve içgörülerin elde edilmesini amaçlamışlardır (Salvat vd., 2023).

Haryo ve ark. hücresel ağlarda hareketliliğe odaklanmakta ve durum yönetimi için makine öğrenimi/yapay zekâ algoritmalarını dahil ederek mevcut literatüre katkıda bulunmaktadır. Araştırmacılar, makine öğrenimi / AI algoritmalarının nasıl kullanıldığını detaylandırarak önceki çalışmalara dayandırmışlardır. Literatürde değişim yönetimi için denetimli, denetimsiz ve pekiştirmeli öğrenme teknikleri kullanılmaktadır. Çalışmanın temel amacı, geleneksel yaklaşıma kıyasla makine öğrenimi/yapay zekâ tabanlı hücre değişimin üstün performansını ortaya koymaktır. Ayrıca, yapay sinir ağları kullanılarak geliştirilen algoritma, O-RAN mimarisinde RIC içerisinde çalışacak şekilde hazırlanmıştır. Son olarak, uygulama O-RAN Yazılım Topluluğu'nda (OSC) geliştirilen ortamlar kullanılarak çalışmalarını yapmışlardır (Haryo Prananto vd., 2022).

Alavirad ve ark. çalışmalarında yapay zeka algoritmalarını kullanarak ağ performansını iyileştirmek için xApp'i tasarlamışlardır. Ağ performansının kontrolü, giriş kontrolü açısından gerçekleştirilir. Bilindiği gibi, giriş kontrolü, hücresel ağ kaynaklarının verimli ve güvenilir bir şekilde tahsis edilmesi için bir dizi düzenlemedir. Kaynak tahsisi, yük dengeleme, QoS gereksinim atamaları ve ağ optimizasyonu için kullanılan parametreleri içerir. Tasarlanan giriş kontrolü (AC) xApp, ns-3 ayrık zamanlı simülasyon programında uygulanmış ve performans sonuçları analiz edilmiştir (Alavirad vd., 2023).

Çalışmalarında, Thaliath ve ark. O-RAN mimarisinde kapalı bir döngü olarak çalışabilen tahmine dayalı bir ağ dilimleme üzerinde çalışmıştır. Çalışma, insan müdahalesini azaltmayı ve daha güvenilir ve esnek bir ortam yaratmayı amaçlamaktadır. Bir operatörden gelen gerçek veriler, OSC tarafından sağlanan Linux tabanlı örnek projeler kullanılarak Açık Ağ Otomasyon Platformunda (ONAP) yürütülmüştür (Thaliath vd., 2022).

Mahrez ve Driss, özellikle mobil kullanıcı ekipmanının teslimatını ele alan O-RAN çerçevesine odaklanmıştır. Araştırma, çalışmalarında QoS, trafik yükü, sinyal kalitesi ve çoklu erişim teknolojilerinin veya ortamın radyo frekanslarının çeşitliliği gibi uygulama gereksinimleriyle ilgili çeşitli faktörleri dikkate almaktadır. Anormallik tespiti için kullanılan farklı makine öğrenimi tekniklerinin tahmin doğruluğu sonuçlarını keşfederek ve karşılaştırarak hareket halindeki bir aracın teslimat sürecini araştırmışlardır (Mahrez vd., 2023b).

Lacava ve ark. çalışmalarında, 5G ve sonraki mobil ağlardaki çeşitli kullanım durumlarının ortaya çıkardığı zorlukları ele almaktadır. Bireysel kullanıcı gereksinimlerine göre uyarlanmış ağ işlevlerinin otomatik kontrolü ve optimizasyonu için çok önemli bir ihtiyacın altını çizmişlerdir. Makale, mevcut araştırma topluluklarının veriye dayalı xApp'ler oluşturmak ve etkili yapay zeka (AI) eğitimi için büyük ölçekli veri kümeleri oluşturmak için kapsamlı bir test alanından yoksun olduğunu vurgulamaktadır. Bu ihtiyacı karşılamak için yazarlar, ns-3 üzerinde 3GPP tabanlı bir simülasyon ortamıyla gerçek üretim kalitesine yakın gerçek zamanlı RAN Akıllı Denetleyicisini (RT RIC'ye yakın) entegre eden bir yazılım çerçevesi olan ns-O-RAN'ı tanıtmaktadır. Bu entegrasyon, etkili yapay zekâ eğitimi için xApps geliştirmeyi ve büyük ölçekli veri toplamayı mümkün kılmıştır (Lacava vd., 2022).

Bonati ve ark. yeni nesil O-RAN sistemleri bağlamında veri toplamak, prototipler oluşturmak ve uçtan uca veriye dayalı kontrol çözümlerini test etmek için tasarlanmış kapsamlı, açık ve O-RAN uyumlu bir deneysel araç seti olan OpenRAN Gym'i tanıtmıştır (Bonati vd., 2023). Lacava ve ark. 5G teknolojisinin O-RAN uyumluluğunu inceleyerek, bu gelişen teknolojiyle sorunsuz bir şekilde iş birliği yapacak şekilde uyarlanmış O-RAN RIC'lerin gerekliliğinin altını çizmişlerdir. Yazarlar, kullanıcıların, ağ dilimlerinin ve baz istasyonlarının kontrolü ve optimizasyonu için yenilikçi yaklaşımlar sunarak (Bonati vd., 2023)'dan yararlanarak bir x-Apps geliştirmiştir. Çalışma, x-Apps'in etkinliğini değerlendirmek için gerçek dünya koşullarına çok benzeyen bir platform olan ns-O-RAN simülasyon ortamını kullanmıştır. Simülasyon ortamında E2 arayüzünü kullanan ve E2 mesajlarını okuyan açık kaynak kodlu ns-3 modülü kullanılmıştır (Lacava vd., 2023).

Garey ve ark. tasarladıkları ns-3 model, O-RAN mimarisinin daha iyi anlaşılmasını geliştirmeyi amaçlamışlardır. Yaklaşımları, makine öğreniminin geliştirdikleri LTE kullanım senaryosuna entegrasyonunu içerir. Bu sayede mimari hakkında daha net ve deneyimsel bilgiler sunulması amaçlanmaktadır (Garey vd., 2023).

Tablo 3.1'de literatürde 2020-2024 yılları arasında incelenen çalışmaların amaçları ve simülasyon programları listelenmiştir. Bazı araştırmacılar simülasyon yapmamış, sadece verileri farklı analiz yöntemleri ile analiz etmişlerdir.

Tablo 3.1. 2020-2024 yılları arasındaki bazı ilgili çalışmalar

Çalışma	**Amaç**	**Simülasyon Programı/Analiz Methodu**	**Yıl**
(Kumar vd., 2020)	Yoğun 5G ağlarında karmaşık komşuluk ilişkilerini yönetme	Gini Impurity	2020
(Sarikaya ve Onur, 2021)	O-RAN tabanlı 5G şebekelerinde şebeke dilimleme problemlerinin çözülmesi	MIPGap	2021
(Bonati vd., 2023)	O-RAN mimarisi için gerçek fiziksel ağlarla simülasyon ortamı oluşturma	OpenRAN Gym	2022
(N. F. Cheng vd., 2022)	Ağ dilimleme için RL modeli geliştirme	Python framework, SimPy	2022
(Upadhyaya vd., 2022)	O-RAN mimarisi için bir simülasyon ortamı oluşturma	srsRAN C/C++	2022
(Haryo Prananto vd., 2022)	Hücresel ağlarda mobilite yönetimi için O-RAN' da çalışabilen RIC tasarımı	Matlab, OSC VAR	2022
(Thaliath vd., 2022)	O-RAN mimarisinde insan müdahalesini azaltan tahmine dayalı kapalı döngü ağ dilimleme optimizasyonu	ONAP (Open Network Automation Platform)	2022
(Rimeod Labs, 2023)	O-RAN mimarisinin tüm yönlerinin ayrıntılı olarak açıklanması	-	2023
(Petrut vd., 2023)	O-RAN mimarisi için bir simülasyon ortamı oluşturma	ns-3	2023
(Xian vd., 2023)	O-RAN test ortamı oluşturma	NVIDIA GeForce RTX 2080 Ti GPU, USRP B210 SDR	2023
(Silalahi vd., 2023)	O-RAN mimarisinde makine öğrenimi tabanlı giriş kontrolü xApp geliştirme ve simülasyonu	ns-3	2023
	Hücre değişim Optimizasyonu için O-RAN' da Anomali Algılama Tekniklerinin Kıyaslanması	Open Source xApps by O-RAN Software Community	2023
(Lacava vd., 2023)	Gerçek zamanlıya yakın gerçek bir üretim kalitesini RAN Akıllı Denetleyicisini (RT RIC'ye yakın) ns-3 üzerinde 3GPP tabanlı bir simülasyon ortamıyla entegre eder	ns-3	2023
(Mahrez vd., 2023b)	Hücre değişimini tahmin etmek için birkaç anomali tespiti yapan ML tekniği ile O-RAN trafik yönlendirme çalışması	O-RAN SC Ric-App-Ad	2023

(Garey vd., 2023)	O-RAN mimarisinde örnek bir LTE olayı üzerinde ML uygulaması	ns-3	2023
(Polese vd., 2023a)	Yeni nesil RAN'lar için ML çözümlerini eğitmek ve test etmek için açık, büyük ölçekli, deneysel bir O-RAN çerçevesi	ColO-RAN	2023
(Lee vd., 2024)	Ns-3 ile 5G-Lena ve openRAN Gym entegre edildiği bir ağ ortamı	ns-3	2024
(H. Cheng vd., 2024)	5G ağ dilimle fonksiyonu için simülasyon tasarımı ORANSlice	ORANSlice	2024
(Natanzi ve Tang, 2024)	Gelecek nesillerde komplike hücre değişim durumlarına çözüm olması için simülasyon	RANFusion	2024
(Polese vd., 2024)	O-RAN dijital ikiz çalışması		2024

4. O-RAN MİMARİSİ İÇİN ÖNERİLEN HÜCRE DEĞİŞİM YÖNTEMİ

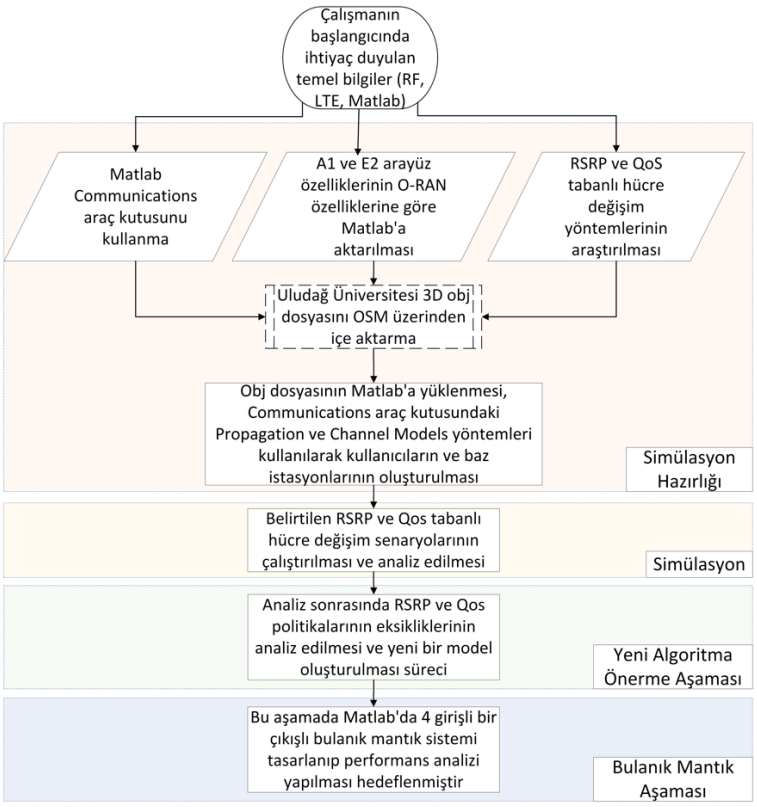
Bu tez çalışmasında O-RAN mimarisi için hücre değişim yöntemleri geliştirilmiş ve performansları analiz edilmiştir. Şekil 4.1'de tez kapsamındaki yol haritamız gösterilmiştir. İlk aşamada O-RAN mimarisinin bileşenleri, Matlab araçları ve çeşitli hücre değişim tipleri analiz edilmiştir. O-RAN topluluğunun odaklandığı konular ve yayınlanan spesifikasyonlar incelenmiştir. Bu çalışmalar ışığında, özellikle O-RAN'daki A1 ve E2 arayüzlerinin kullanımı için gerekli olan teknik bilgiler analiz edilmiştir. A1 arabirimi, iki RIC arasındaki iletişimi sağlarken, politika yönetimi, veri aktarımını ve makine öğrenimi yönetimini de desteklemektedir. O-RAN mimarisindeki Near-RT RIC, E2 arabirimi ile O-CU, O-DU ve O-eNB'ye bağlanmaktadır. Bu arayüzlerin benzetimi tez çalışması kapsamında Matlab ortamında gerçekleştirilmiştir. Bu arayüzler, RAN tasarımı için gerekli olan baz istasyonları ve kullanıcılar Matlab ortamında oluşturulmuştur. Matlab "İletişim Araç Kutusu", birden fazla alıcıyı, vericiyi, sinyal işlemlerini ve hesaplamaları kolaylaştıran işlevleriyle birlikte, yeni bir xApp uygulaması geliştirmek için kullanılmıştır.

Şekil 4.1'de verildiği üzere, O-RAN mimarisindeki arayüzler ve çeşitli altyapılar oluşturulduktan sonra ikinci aşamada simülasyon bölümüne geçilmiştir. Simülasyon aşamasında ilk olarak iki tip hücre değişim yöntemi çalıştırılmıştır. İlk hücre değişim türü mobil operatörlerin de sıkça kullandığı geleneksel RSRP temelli hücre değişim yöntemidir. Bu yöntemde kullanıcılar en iyi sinyal aldıkları istasyona bağlanmak için girişimde bulunmaktadır. Diğer hücre değişim sistemi ise bu tez çalışmasında geliştirilen QoS tabanlı hücre değişim yöntemidir. Bu yöntemde ise kullanıcılar aldıkları servis tipine göre mikro hücre ya da makro hücreye bağlanmak için girişimde bulunmaktadır. Bu iki hücre değişim yöntemlerinin simülasyonları için iki farklı senaryo geliştirilmiştir.
Senaryo seçiminde hücresel ağlarda en temel 2 tip kullanıcı profili baz alınmıştır. Bunlar hareket halindeki kullanıcılar ve konumu değişmeyip sabit olan kullanıcılardır. Bu 2 durumdaki kullanıcıların ağ tarafından yönetimi farklı parametreler ve yöntemler ile gerçekleştirilmektedir. Senaryolardan ilki hareketli bir kullanıcının kampüs ortamı içerisinde bir noktadan başka bir noktaya hareket etmesidir. Diğer senaryo ise kampüs ortamında 40 adet sabit kullanıcının servis aldığı senaryodur. Bu hücre değişim türlerinin

performansları her iki senaryoda da yürütülmüş ve sonuçları karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

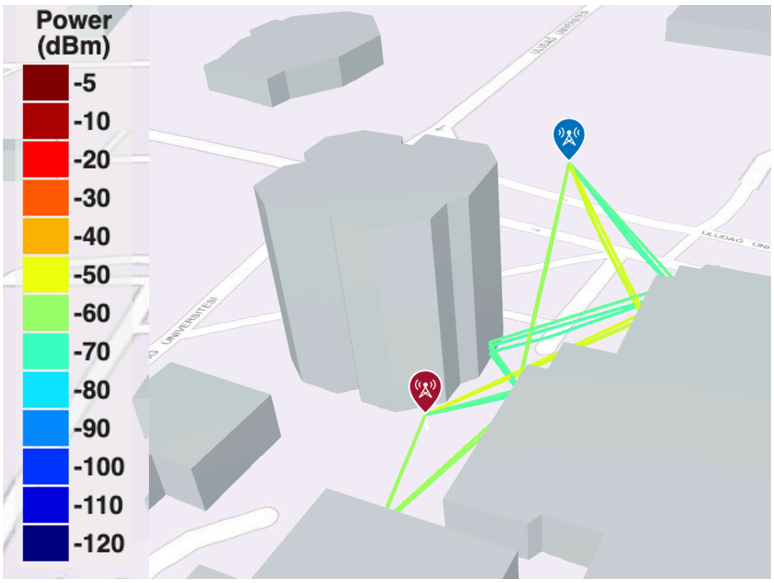
Sadece RSRP ve sadece QoS tabanlı hücre değişim yöntemlerinin tek başına etkileri görüldükten sonra Şekil 21'in üçüncü aşaması olan yeni bir algoritma önerme aşamasına geçilmiştir. RSRP ve QoS tabanlı hücre değişim yöntemlerine bazı özellikler ve karar modelleri eklenerek yeni bir hibrit hücre değişim yöntemi geliştirilmiş ve performansları analiz edilmiştir.

Şekil 4.1'in ve tezimizin son aşamasında ise Bulanık mantık yönteminin hücre değişim algoritmalarına olan etkileri ele alınmış ve analizler yapılmıştır. RSRP, QoS, Hibrit ve bulanık mantık tabanlı hücre değişim yöntemleri birbirleriyle karşılaştırılarak performans sonuçlar değerlendirilmiştir. Bu sayede bu tez kapsamında O-RAN mimarisinde hücre değişim yöntemleri geniş bir biçimde ele alınarak literatüre katkı sağlanmaya çalışılmıştır.



Şekil 4.1. Tez çalışmasında kullanılan yol haritası

Radyo frekansları ile ilgili bir simülasyon geliştirilirken veya teknik açıklamalar yapılırken en çok karşılaşılan problem, RF sinyal yayılımının soyut kalmasıdır. Matlab yazılımında yer alan ışın izleme (Ray tracing) modeli sayesinde vericiden çıkan sinyalin alıcıya ulaşma rotası şematize edilebilmektedir. Işın izleme modelleri, üç boyutlu ortam geometrisini kullanarak yayılma yollarını hesaplamaktadır. Bir sinyalin yayılma yolu boyunca yatay ve dikey polarizasyonlarının izlenmesi de dahil olmak üzere elektromanyetik analiz kullanılarak her bir ışının yol kaybını ve faz kaymasını hesaba katabilmektedir. Bu amaçla Matlab'da bir Işın İzleme nesnesi bulunmakta ve MaxNumReflections, BuildingsMaterial, BuildingsMaterialConductivity, SurfaceMaterial gibi birçok özelliği barındırmaktadır. Sahip olduğu özellikler sayesinde, yansıyan zeminin iletkenlik, yansıma katsayısı gibi birçok özelliği kullanılarak gerçeğe yakın simülasyon ortamları geliştirmek mümkündür. Ancak gerçeğe yakın ortamlar tasarlamaya çalıştıkça, beraberinde işlemcideki hesaplama yükü de artacak ve bu da simülasyonun daha uzun süre çalışması ile sonuçlanacaktır. Bu sebeple bina içi analizler için bu yöntem ile çalışmanın daha uygun olacağı düşünülmüştür. Bu tez çalışmasında ise yoğun hesaplama yükleri ve bina içi simülasyonundan ziyade bina dışındaki kullanıcılara odaklanıldığı için farklı bir yayılım modeli olan Longley-Rice kullanılmıştır. Şekil 4.2'de, 3D kampüs ortamında Matlab yazılımında uygulanan örnek bir vericiden alıcıya giden Işın İzleme senaryosu gösterilmektedir.



Şekil 6. Matlab'da ışın izleme (Ray Tracing)

Bina dışı simülasyonu için konum olarak Bursa Uludağ Üniversitesi kampüsü ele alınmıştır. Bursa Uludağ Üniversitesi kampüsünün üç boyutlu modeli OpenStreetMap'ten alınan osm dosyası ile çalışmada kullanılmak üzere kaydedilmiştir. Simülasyon için 8 çekirdekli CPU ve 8 GB birleşik belleğe sahip Apple M2 işlemcili bir bilgisayar kullanılmıştır. Simülasyonda, bir mobil kullanıcı için bir rota belirlenip o rota üzerinde bir dizi konum oluşturulmuştur. Mobil kullanıcı bu konumlarda hareket edebilmektedir. Simülasyon boyunca hem baz istasyonları hem de kullanıcılar için iki farklı sınıf ele alınmıştır. Tablo 4.1'de bu sınıflarda kullanılan özellikler verilmiştir. İlk sınıf, bir baz istasyonu ait temel yükseklik, konum, üretilen sinyal gücü ve frekansı gibi bilgileri içermektedir. Ayrıca baz istasyonu sınıfının içerisinde O-RAN'da RIC çalıştırmak için ihtiyaç duyulan A1 sınıfının özellikleri, O-RAN topluluğunun teknik dökümanları dikkate alınarak eklenmiştir (O-RAN ALLIANCE, 2023). İkinci sınıf ise kullanıcıları temsil etmektedir. Kullanıcı sınıfında kullanıcıların konumları, servis tipleri ve servis alırken bağlı olduğu servis politika türü, bağlantı kurduğu hücre bilgisi gibi bu çalışma için kritik öneme sahip özellikler bulunmaktadır.

Tablo 4.1. O-RAN için sınıflar ve özellikler

Baz İstasyonlarının sınıfları ve özellikleri	**Kullanıcı sınıfları ve özellikleri**
Konum (enlem, boylam)	Konum (enlem, boylam)
Anten yükseliği (m)	Servis tipi (ses, data)
Verici sinyal gücü (dBm)	Servis Politikası
Verici sinyal gücü frekansı (Hz)	Bağlantılı hücre bilgisi
	Kullanıcı yükseklik (m)

Baz istasyonları ve kullanıcılar arasındaki sinyalleşmenin benzetimi için gerekli parametreler Matlab Communications Toolbox aracılığıyla belirlenmiştir. Tablo 4.2'de önemli iki obje olan baz istasyonları (Tx Site) ve kullanıcılar (Rx Site) için belirlenen simülasyon parametreleri görülmektedir. Tabloda görüldüğü gibi kullanıcılar için yükseklik 180 cm, makro hücrelerin referans sinyal gücü 10 mW ve mikro hücrelerin referans sinyal gücü 5 mW'dir. Simülasyon ortamında sinyal yayılım modeli olarak Longley-Rice yayılım modeli seçilmiştir. Ortalama insan boyunun ~170-180 cm aralığında olduğu düşünüldüğünde, 180 cm değeri benzetim için gerçekçi bir kullanıcı yüksekliği sağlar. Makro hücreler, tipi yüksek güçle (10 mW) geniş alanları kapsar. Bu

sebepten ötürü bu değer simülasyonlar için tercih edilmiştir. Tipik mikro hücreler ise düşük güçle (5 mW) ile enerji verimliliği sağlayıp küçük alanlara hizmet vermek için kullanılmaktadır. Bu neden benzetim ortamında mikro hücreler için bu değer tercih edilmiştir.

Tablo 2.2 Baz istasyonlarının ve kullanıcıların benzetim parametreleri

Baz İstasyonu Parametreleri	**Parametre Değerleri**	**Kullanıcı Parametreleri**	**Parametre Değeri**
Enlem, Boylam	([enlem, boylam Uü kampüsü])	Enlem, Boylam	rastgele([enlem,boylam Uü kampüsü])
Anten Yüksekliği	12 metre (mikro hücreler için 8 metre)	Anten Yüksekliği	1.8 metre
Verici Gücü	10mW (mikro hücreler için 5mW)	Alıcı Hassasiyeti	-103 dBm
CoordinateSystem	geographic	Servis tipi	rasgele([ses,data])
		Alınan sinyal yayılım yöntemi	longley-rice

Simülasyonda mikro hücre ve makro hücre olmak üzere iki tip baz istasyonu oluşturulup kullanılmıştır. Bu iki tip istasyona ait temel özellikler, kullanım alanları ve farkları Tablo 4.3'de karşılaştırılmalı olarak verilmiştir.

Tablo 4.3 Mikro Hücre ve Makro Hücre karşılaştırması

Özellik	**Mikro Hücre**	**Makro Hücre**
Kapsama Alanı	Sınırlı kapsama alanı (onlarca, yüzlerce metre)	Daha geniş kapsama alanı (birkaç kilometre)
Güç	Düşük güç çıkışı (birkaç watt)	Yüksek güç çıkışı (onlarca ila yüzlerce watt)
Hücre Kapasitesi	Düşük kapasite, yüksek kullanıcı yoğunluğu olan ortamlar için tasarlanmış	Daha yüksek kapasite, geniş alanlar ve her hücre için daha az kullanıcı

4.1 O-RAN Mimarisinde RSRP, QoS ve Hibrit Hücre Değişim Algoritmaları

Geleneksel RAN mimarilerinde, ses ve veri kullanıcıları genellikle hizmet türlerine (ses veya veri hizmeti) bağlı olarak farklı baz istasyonlarına yönlendirilmez. Mobil operatörler 3GPP standartlarını göz önünde bulundurarak RSRP, RSRQ ve SINR bazlı yönlendirmeler yaparlar. Bu metriklerden anlaşılacağı üzere kullanıcı bağlantılarını yönetmek ve onları belirli baz istasyonlarına yönlendirmek için tek kriter genellikle radyo

koşulları ve ağ optimizasyonuna dayalı parametrelerdir. Kullanıcı yönlendirmede kullanılan bu üç metrik içerisinden ise büyük çoğunlukla bir baz istasyonundan alınan sinyal gücünün bir ölçümü olan RSRP tercih edilmektedir. RSRP, mobil cihaz ile baz istasyonu arasındaki radyo bağlantısının sinyal gücünü temsil eden bir büyüklük birimidir. RSRQ ise alınan tüm sinyaller ve bağlı olunan hücre üzerinden kullanılan PRB sayısı ile bağlantılı kalite göstergesidir (Petrut vd., 2015). Yoğun ortamlarda ise birden fazla istasyondan gelen sinyal ortamda gürültü oluşturmakta ve RSRQ değerini düşürmektedir. Bu durum RSRQ parametresine değişken olma özelliği katmaktadır. Aniden değişen kalite değerleri nedeniyle hücre değişimlerinde RSRQ ve SINR parametreleri çok tercih edilmemektedir. Denklem 4.1'de hücrenin bağlı olduğu hücreden gelen referans sinyali gücünden ortamdaki toplam gürültüyü çıkarttığımızda RSRP (Xian vd., 2011) değerini bulduğumuz gösterilmiştir. Denklem 4.2'de RSRQ (Xian vd., 2011) hesaplanmasın ait denklem verilmiştir. N kullanılan PRB sayısını ifade etmektedir. Denklem 4.3'te SINR (Silalahi vd., 2021) parametresine ait formül verilmiştir. Burada S hizmet veren hücreden alınan, istenen sinyal gücünü temsil etmektedir. I diğer hücrelerden (eş kanal paraziti) veya komşu LTE/diğer teknoloji hücrelerden gelen istenmeyen sinyalleri temsil eder. N ise sistemdeki termal gürültüyü ve diğer arka plan gürültülerini temsil eder.

$$RSRP = G\text{üç}_{BG} - G\text{üç}_{TG} \tag{4.1}$$

$$RSRQ = N \times {}^{RSRP}/_{Alınan\ Toplam\ Sinyal(RSSI)} \tag{4.2}$$

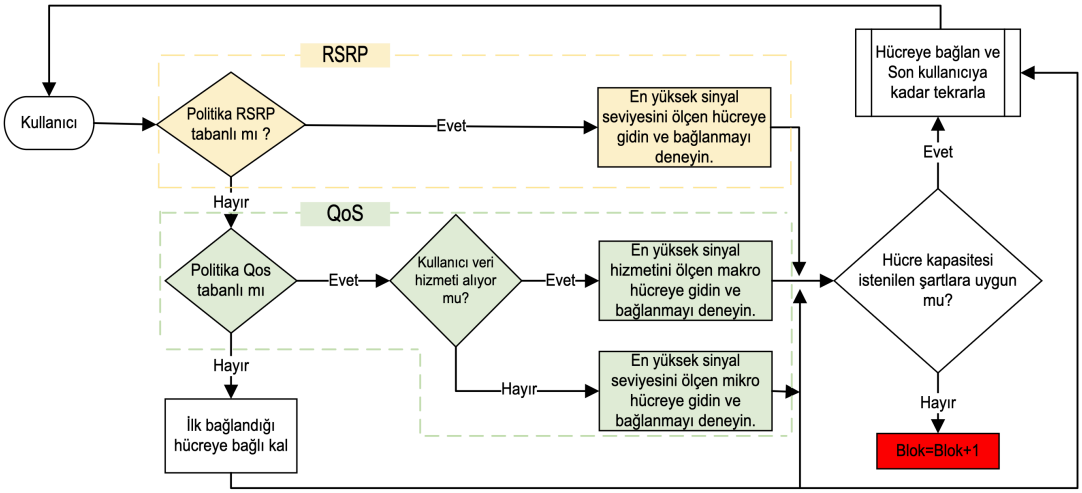
$$SINR = {}^{S}/_{I+N} \tag{4.3}$$

Mevcut LTE ağlarında operatörler tarafından belirlenen eşik değerlere göre kullanıcı tarafında Tablo 6'daki olaylar tetiklenmekte ve hücre değişim süreci başlamaktadır. Tablo 4.4, LTE mimarisinde hücre değişimi için tetiklenmesi gereken olayları göstermektedir (Cai vd., 2020b). Bu olaylar, LTE ağlarında hücre değişiminin ne zaman başlatılacağını belirlemek, hücreler veya farklı radyo erişim teknolojileri arasında sorunsuz geçişleri sağlamak için gereklidir.

Tablo 4.4. LTE ölçüme dayalı olay tablosu

Olay Tipi	Tanım
A1	Hizmet veren hücre sinyalinin belirlenen eşik değerinden daha iyi hale gelmesi olayı
A2	Hizmet veren hücre sinyalinin belirlenen eşik değerinden daha kötü hale gelmesi olayı
A3	Komşu hücre sinyali, hizmet verenden daha iyi bir şekilde ofsetlenir
A4	Komşu hücre sinyali belirtilen eşik değerinden daha iyi hale gelmesi olayı
A5	Hizmet veren hücre belirlenen eşik1'den daha kötü hale gelir ve komşu hücre belirlenen eşik2'den daha iyi hale gelir
A6	Komşu hücre, hizmet veren hücreden daha iyi ofset haline gelir (Taşıyıcı Toplama)
B1	Farklı RAT arası bir komşu hücre belirlenen eşikten daha iyi hale gelir ise tetiklenir
B2	Hizmet veren hücre belirlenen eşik1'den daha kötü hale gelir ve RAT arası komşu belirlenen eşik2'den daha iyi hale gelir

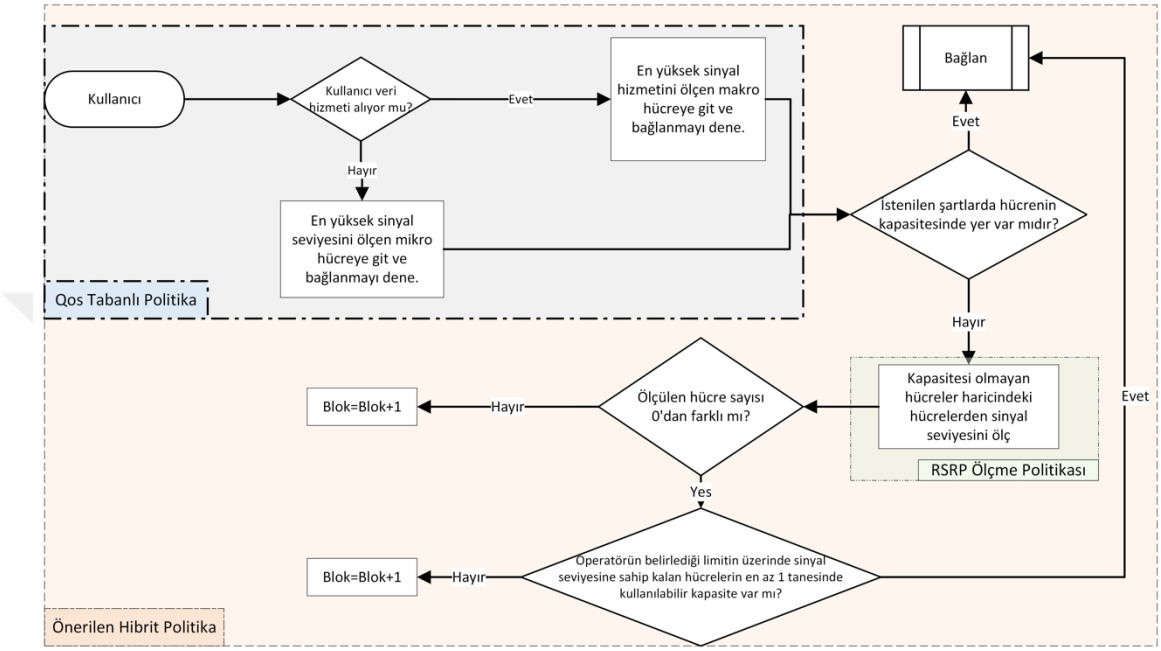
Bu veriler ışığında bu tez çalışmasında ilk olarak geleneksel hücre değişim yönteminin analizi için RSRP tabanlı hücre değişimi ele alınmıştır. RSRP tabanlı hücre değişim politikasında, kullanıcılar en iyi sinyali aldıkları hücreye makro hücre ya da mikro hücre olup olmadığı fark etmeksizin bağlanma girişiminde bulunmaktadır. Bu yaklaşım geleneksel hücresel haberleşmesinde sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. RSRP tabanlı hücre değişiminden sonra ise tez kapsamında O-RAN mimarisi için geliştirilen QoS tabanlı hücre değişim yöntemi tasarlanmıştır. Bu algoritma, Tablo 4.3'te verilen makro hücre ve mikro hücre istasyonların kapasite ve kapsama özellikleri baz alınarak geliştirilmiştir. QoS tabanlı hücre değişim yönteminde, kullanıcılar servis tipleri (ses, veri) hesaba katılarak hücrelere yönlendirilmektedir. Veri servisi alan kullanıcılar en iyi sinyali aldıkları makro hücreye bağlanırken, ses servisi alan kullanıcılar ise en iyi sinyali aldıkları mikro hücreye bağlanması hedeflenmiştir. Bu iki hücre değişim yönteminde de kullanıcılar ölçtüğü hücrelerde boş kapasite yok ise ağ tarafından bloklanmakta ve talep ettikleri hizmeti alamamaktadır. Şekil 4.3'te hem RSRP hem de QoS tabanlı hücre değişim yöntemlerini içeren akış şeması görülmektedir.



Şekil 7. RSRP/QoS politikalarının simülasyon akış şeması

Bu tez çalışmasında, O-RAN mimarisinde RSRP ve QoS temelli hücre değişim algoritmalarının yanı sıra her iki yöntemin avantajlarını birleştiren yeni bir hibrit hücre değiştirme algoritması geliştirilmiştir. RSRP temelli hücre değişim politikası kullanıcıların servis tiplerini göz ardı etmektedir. QoS tabanlı hücre değişimi ise, tamamen kullanıcıların servis tipini baz alarak yönlendirme yapmaktadır. Fakat bu yöntemde de servis tipi güçlü olmasına rağmen sinyal seviyesi düşük olan bir istasyona yönlendirilme durumu oluşabilmektedir. Bu iki hücre değişim politikasının göz ardı ettiği ve servis bloklarına yol açtığı durumlarda hibrit algoritma ile beraber yeni bir karar alma algoritması geliştirilmiştir. Şekil 4.4'te, O-RAN mimarisi için RSRP ve QoS tabanlı hücre değişim politikalarını birleştirerek geliştirilen hibrit hücre değişimi algoritmasının akış şeması gösterilmektedir. Bu algoritmada kullanıcının servis tipinden dolayı ölçtüğü baz istasyonlarında önceden belirlenen bir eşik değerden daha yüksek olan tüm hücreler listelenir. Bu şartlara uyan birden fazla hücre listeleyen kullanıcılar sinyal seviyesi en iyi olandan en kötü olana doğru bağlanma isteği göndermektedir. Kapasitesi ve sinyal seviyesi uygun olan ilk hücreye bağlanılmaktadır. Hibrit hücre değişim algoritmasında, listelenen tüm hücrelerin kapasite ve sinyal seviyesi açısından uygun olmaması durumunda, kullanıcının talep ettiği hizmet engellenmektedir. Sonuç olarak, RSRP tabanlı politikada, eğer kullanıcı en güçlü sinyali aldığı istasyonun kapasitesi yetersizse, bağlantı sağlanamamaktadır. QoS tabanlı politikada ise servis türüne bağlı olarak, kullanıcının en iyi sinyali aldığı makro hücre veya mikro hücrede yeterli kapasite bulunmuyorsa hizmet sunulmamaktadır. Ancak geliştirilen hibrit algoritma sayesinde,

belirlenen sinyal seviyesinin üzerinde olup en yüksek boş kapasiteye sahip hücreye yönlendirme yapılabilmektedir. Böylece, RSRP ve QoS tabanlı hücre değişim algoritmalarında karşılaşılan sorunların, önerilen hibrit hücre değişim algoritması ile azaltılması amaçlanmaktadır.



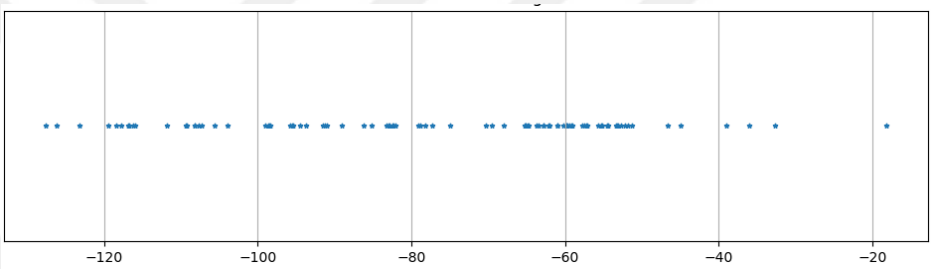
Şekil 8. Önerilen hibrit hücre değişim algoritması

4.2 O-RAN Mimarisinde Bulanık Mantık Tabanlı Hücre Değişimi

O-RAN mimarisinde RSRP, QoS ve hibrit hücre değişim algoritmaları incelendikten sonra, bu bölümde literatürde karar verme yöntemlerinden biri olarak sıklıkla tercih edilen bulanık mantık yaklaşımına dayalı yeni bir hücre değişim algoritması açıklanmaktadır. İlk olarak geleneksel mimarilerde kullanılan RSRP tabanlı hücre değişim algoritmasına, kullanıcıların servis tiplerini baz alan QoS tabanlı bir hücre değişim algoritması geliştirildi. Daha sonra bu iki politikanın üzerine istasyonların kapasite durumunu da baz alarak yönlendirme yapabilen hibrit hücre değişim algoritması önerildi. Ancak O-RAN mimarisinde hücre değişimi kararı verirken, ağın karşılaştığı belirsizlikler ve sinyal gücü, kullanıcı yoğunluğu, ağ yükü, QoS gibi çok sayıda dinamik parametreler nedeniyle kesin, matematiksel modellere dayalı kararlar yeterince esnek

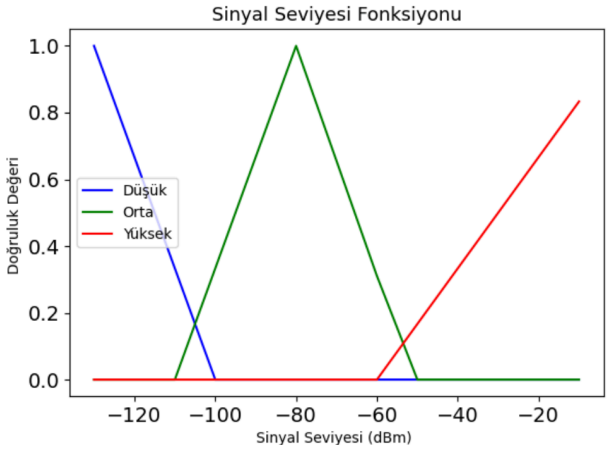
olmadığı görülmüştür. Bu nedenle O-RAN hücre değişim sürecinde bulanık mantık yöntemi kullanılarak, ortamın karmaşıklığına ve belirsizliklerine uygun, daha doğru ve adaptif kararlar alınmasını mümkün kılacak yeni bir algoritma önerilmiş Bölüm 4.1'de geliştirilen algoritmalarla karşılaştırılmıştır.

Geliştirilen bulanık mantık algoritmasında her bir istasyon için 4 adet giriş ve bir adet 0-1 aralığında çıkış değeri üreten bir model tasarlanmıştır. Kullanıcı en iyi çıkış değeri olan istasyona bağlanmak için girişimde bulunmaktadır. Şekil 4.5'te Matlab simülasyonunda hareketli bir kullanıcının bir rota boyunca her adımda ölçtüğü sinyal seviyeleri gösterilmiştir. Simülasyon sonuçları göz önünde bulundurulduğunda -60 dBm ve üstü en iyi sinyal olarak kabul edilirken, -110 dBm ve aşağısı ise haberleşme için kötü sinyal seviyeleri olarak sınıflandırılmaktadır.



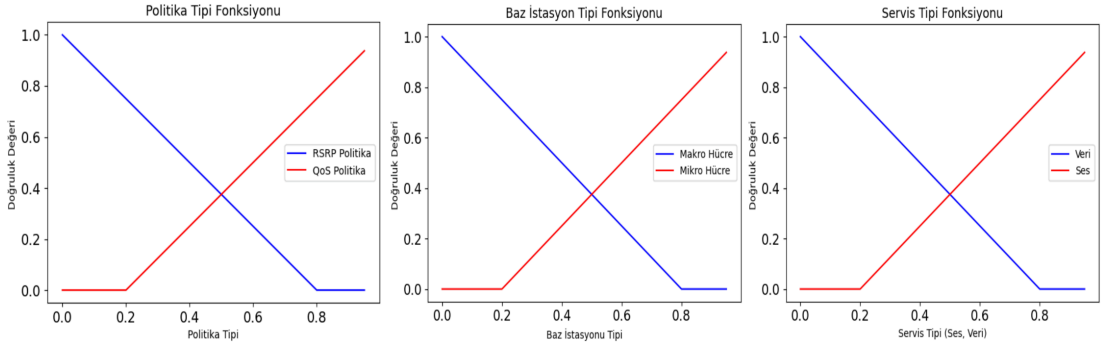
Şekil 9. Rota boyunca ölçülen sinyallerin dağılımı

Bu veriler doğrultusunda, bulanık mantığın ilk girişi olan sinyal seviyesi için Şekil 4.6'da gösterilen üçgen (Triangular) tipi bir üyelik fonksiyonu oluşturulmuş ve sinyal seviyeleri düşük, orta ve yüksek olarak -110 ile -60 dB aralığında tanımlanmıştır.



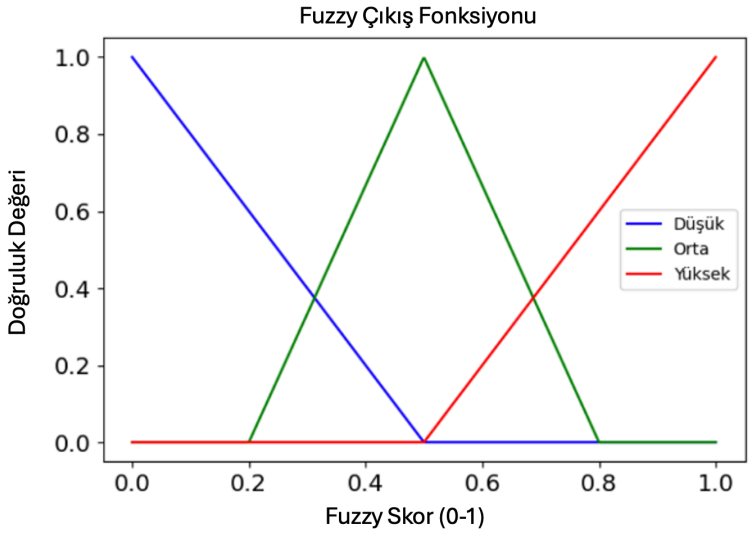
Şekil 10. Giriş sinyali üyelik fonksiyonu

Diğer girişler olan politika tipi, baz istasyonu tipi ve kullanıcı servis tipi değişkenleri de Şekil 4.7'de görüldüğü üzere üçgen üyelik fonksiyonları ile tanımlanmıştır.



Şekil 11. Politika tipi, Baz İstasyonu ve Servis Tipi için üyelik fonksiyonları

Son olarak modelin çıkışı olarak bulanık (fuzzy) skoru verecek olan üyelik fonksiyonu ise 0-1 aralığında düşük, orta ve yüksek olacak şekilde Şekil 4.8'deki gibi tanımlanmıştır.



Şekil 12. Bulanık skoru çıkış fonksiyonu

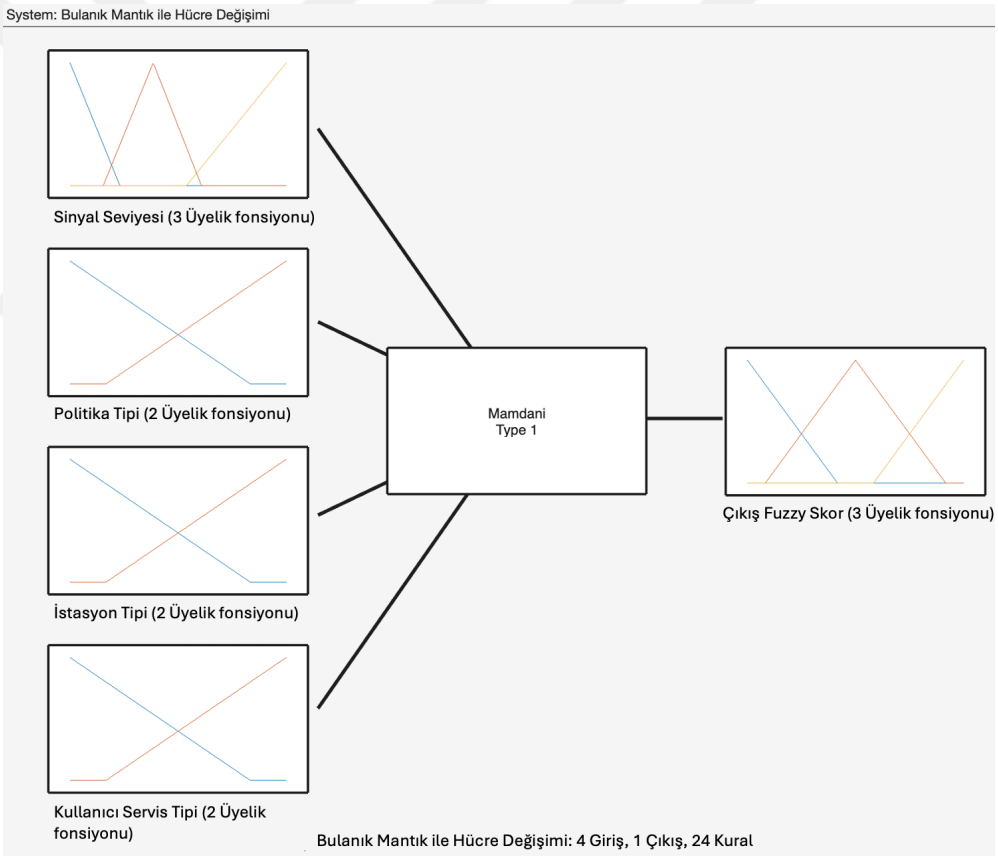
Bulanık mantık üyelik fonksiyonlarına ek olarak uzmanlık gerektiren aşağıdaki gibi 24 adet kural dizisi oluşturulmuştur. Tablo 4.5'de bu kural dizilerine ait detaylar ve tanımlamalar verilmiştir.

Tablo 4.5 Hücre değişim kararı için bulanık mantık kural setleri

Kural Numarası	**Sinyal Seviyesi**	**Politika Tipi**	**İstasyon Tipi**	**Kullanıcı Servis tipi**	**Puan**
1	Yüksek	RSRP	Makro Hücre	Data	Yüksek
2	Yüksek	RSRP	Mikro Hücre	Data	Yüksek
3	Yüksek	RSRP	Makro Hücre	Ses	Yüksek
4	Yüksek	RSRP	Mikro Hücre	Ses	Yüksek
5	Orta	RSRP	Makro Hücre	Data	Orta
6	Orta	RSRP	Mikro Hücre	Data	Orta
7	Orta	RSRP	Makro Hücre	Ses	Orta
8	Orta	RSRP	Mikro Hücre	Ses	Orta
9	Düşük	RSRP	Makro Hücre	Data	Düşük
10	Düşük	RSRP	Mikro Hücre	Data	Düşük
11	Düşük	RSRP	Makro Hücre	Ses	Düşük
12	Düşük	RSRP	Mikro Hücre	Ses	Düşük
13	Yüksek	Qos	Makro Hücre	Data	Yüksek
14	Yüksek	Qos	Mikro Hücre	Data	Düşük
15	Yüksek	Qos	Makro Hücre	Ses	Orta
16	Yüksek	Qos	Mikro Hücre	Ses	Yüksek

17	Orta	Qos	Makro Hücre	Data	Orta
18	Orta	Qos	Mikro Hücre	Data	Düşük
19	Orta	Qos	Makro Hücre	Ses	Düşük
20	Orta	Qos	Mikro Hücre	Ses	Orta
21	Düşük	Qos	Makro Hücre	Data	Düşük
22	Düşük	Qos	Mikro Hücre	Data	Düşük
23	Düşük	Qos	Makro Hücre	Ses	Düşük
24	Düşük	Qos	Mikro Hücre	Ses	Düşük

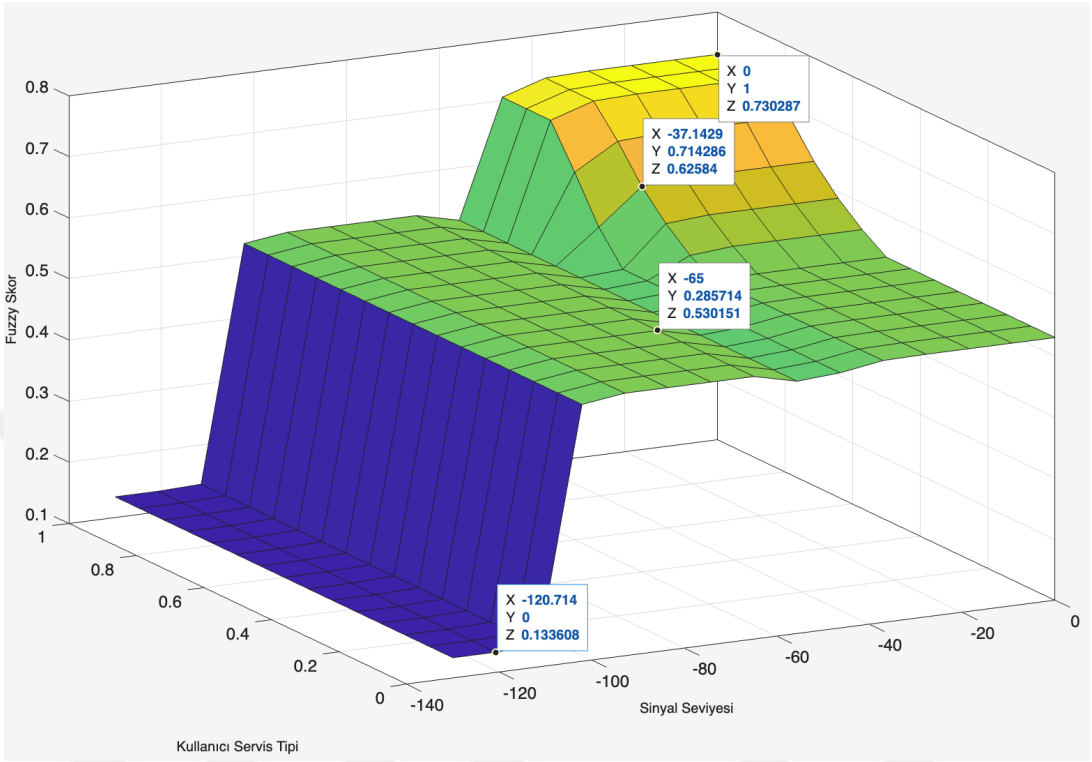
Tüm giriş fonksiyonları, çıkış fonksiyonu ve kural dizilerimiz ile tasarlanan bulanık mantık sistemi şekil 4.9'daki gibi 4 girişli 1 çıkışlı ve 14 adet kuralı bulunan bir yapıdan oluşmaktadır.



Şekil 13. Bulanık mantık tabanlı hücre değişimi

Oluşturulan sistemin üç boyutlu yüzeyi, X ekseninde sinyal seviyesini, Y ekseninde kullanıcı servis tipini ve Z ekseninde bulanık (fuzzy) skoru göstermekte olup, Şekil

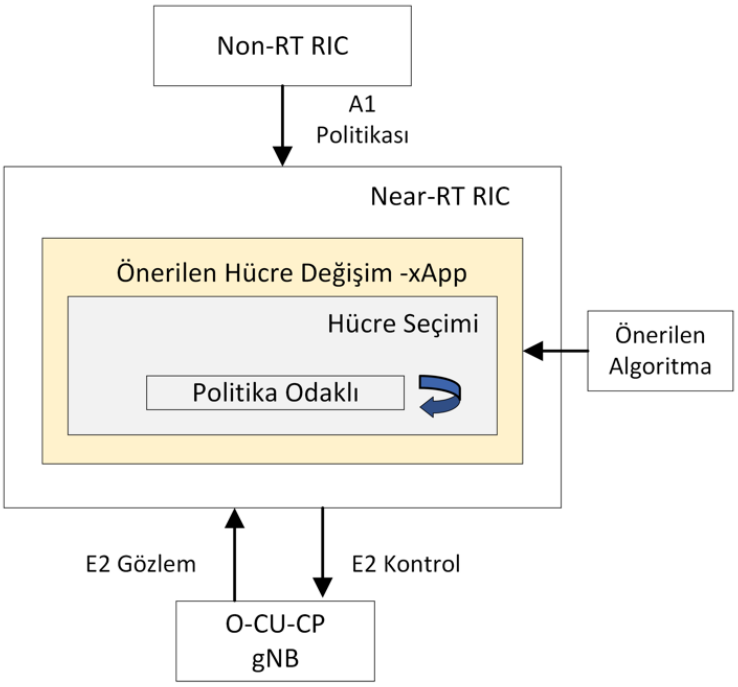
4.10'da sunulmuştur. Bu arayüz, özellikle yüksek sinyal seviyesine sahip veri kullanıcılarının fuzzy skorlarının beklendiği gibi daha yüksek olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 14. Üç boyutlu kontrol arayüzü

Şekil 4.11, önerilen hücre değişim algoritmalarının (Handover-xApp) O-RAN mimarisi içinde nerede konumlandığını göstermektedir. Kullanıcı ilişkilendirmesi, O-RAN tanımlı hücre değişim kontrol mekanizmaları kullanılarak E2 arayüzü aracılığıyla yapılmaktadır. Bir Handover-xApp, Non-RT RIC tarafından A1 arabirimi aracılığıyla gönderilen ilkelere dayalı olarak kullanıcıların hücreler arasında değişimine olanak tanımaktadır. Bu politikalar, xApp hücre tercihlerini belirten kurallar içermektedir. Bu hücre tercihleri kullanıcı merkezli veya dilim odaklı olabilir. Non-RT RIC tarafından A1 arayüzü aracılığıyla sağlanan hücre tercihlerini kullanan Handover-xApp mekanizması ve E2 arayüzünden elde edilen RSRP değerleri, uygun hücre değişim kararlarını verebilmektedir. Geliştirilen Handover-xApp bağımsız olarak kurulabilir, güncellenebilir veya değiştirilebilir; bu işlemlerin diğer uygulamaları etkilememesi gibi avantajları

vardır. Operatörler, özel ihtiyaçlarına göre (örneğin, mobilite yönetimi, yük dengeleme, enterferans azaltma) farklı xApp'ler seçebilir ya da geliştirebilir.



Şekil 15. Önerilen hücre değişim algoritmalarının (Handover-xApp) O-RAN mimarisindeki konumu

4.3 Senaryo 1 (Hareketli Kullanıcı)

Matlab yazılımında geliştirilen simülasyon ortamında altı adet baz istasyonu oluşturulmuştur. Bu istasyonların ikisi mikro hücre, dördü ise makro hücre olarak tanımlanmıştır. Mikro hücreler, makro hücrelere kıyasla daha düşük kapasiteye, küçük kapsama alanına ve düşük güce sahiptir. Çalışmada oluşturulan mobil kullanıcı kampüs içerisinde önceden belirlenmiş bir noktadan başka bir noktaya hareket etmektedir. Hareket sırasında, kullanıcının ses veya veri servis türü değişebilmekte, kullanıcı politika türüne göre hücreler arasında geçiş yapmaktadır. Çalışmamızda Politikasız (herhangi bir hücre değişim algoritması kullanılmadığı), RSRP, QoS ve bulanık mantık tabanlı olmak üzere 4 tür hücre değişim algoritması kullanılmıştır. Geliştirilen hibrit hücre değişim algoritması kapasite problemlerine yönelik tasarlandığı için sadece Senaryo 2'de analiz edilmiştir.

İlk senaryoda, 15 adımda hareket eden kullanıcı aldığı hizmet türüne (ses, veri) göre her yeni konumunda hücre değişimini gerçekleştirmiştir. Dört farklı hücre değişim stratejisi (RSRP, QoS, Bulanık mantık tabanlı ve Politikasız) analiz edilmiştir. İkinci senaryoda ise, kapasite açısından daha gerçeğe yakın bir analiz yapılabilmesi adına Senaryo 1'deki gibi Bursa Uludağ Üniversitesi kampüsü temel alınarak, rastgele konumlandırılmış statik 40 kullanıcı üzerinden baz istasyonlarının kapasite değerleri ve hizmet erişilebilirlik oranlarındaki değişiklikler analiz edilmiştir.

4.3.1 Politikasız Yaklaşım

Şekil 4.12'de 4 makro hücre ve 2 mikro hücre içeren senaryoda, kullanıcı önceden tanımlı bir dizi hareket gerçekleştirir. Şekildeki siyah telefon noktaları hareket noktalarını, kırmızı konumlar ise mikro hücreleri temsil etmektedir. Büyük anten sembollerine sahip konumlar ise, makro hücre konumlarını göstermektedir. Mikro hücre ve makro hücre arasındaki farklı özellikler Tablo 5'te verilmiştir. Kullanıcılardan istasyona giden farklı renkteki çizgiler, kablosuz bağlantının kurulduğu istasyonu temsil etmektedir. Bu senaryoda kullanıcı şekilde belirtilen yönde hareket etmektedir. Görüldüğü gibi kullanıcı, rota boyunca ilk bağlanılan baz istasyonuna (şeklin en solunda yer alan baz istasyonu) bağlı kalmaktadır. Bu senaryoda kullanıcı, düşük bir sinyal düzeyine sahip olsa ve/veya uzak bir konumda olsa bile sürekli ilk hücreye bağlanmaktadır. Bu durum doğal olarak haberleşme performansını olumsuz etkilemektedir. Baz istasyonundan uzakta olan ve hizmet almaya devam eden kullanıcılar daha fazla kaynak tüketebilmekte ve aynı istasyondan hizmet alan diğer kullanıcıların başarımını olumsuz etkilemektedir. Mobil haberleşmenin doğası gereği kullanıcıların gerekli durumlarda hücre değişimi yapması gereklidir.



Şekil 16. Politikasız senaryosu

4.3.2 RSRP Tabanlı Hücre Değişim Senaryosu

Şekil 4.13'te ise RSRP tabanlı hücre değişim senaryosunda hareket eden kullanıcıyı göstermektedir. Kullanıcı, her adımda, altı baz istasyonunun hepsinden gelen sinyalleri değerlendirip ve en iyi sinyal gücüne sahip istasyona bağlanma kuralına uymaktadır. Bu sayede kullanıcı, rota boyunca her zaman iyi sinyal seviyelerine sahip hizmet alacaktır. Bu senaryoda kullanıcı, mikro hücrenin yakınından geçerken yüksek bir sinyal seviyesi ölçtüğü için uzaklaşana kadar o hücreden hizmet almaktadır. Bu durum ortamda birden fazla kullanıcı olduğunda, mikro hücrenin kapasitesinin ve gücünün yetersizliği sebebiyle haberleşme performansının düşmesine sebep olacaktır.



Şekil 17. RSRP tabanlı hücre değişimi senaryosu

4.3.3 QoS Tabanlı Hücre Değişim Senaryosu

Şekil 4.14'te QoS tabanlı hücre değişimine göre hareket eden kullanıcı senaryosu gösterilmektedir. Hareketli kullanıcı rota boyunca hareket ederken, bazı anlarda ses hizmetleri alırken, bazı anlarda veri türünde hizmet almaktadır. QoS tabanlı hücre değişim politikası servis tiplerini baz alarak ses kullanıcılarının mikro hücreye, veri kullanıcılarının ise mikro hücreye yönlendirilmesi için geliştirdiğimiz algoritmadır. Bu yönteme göre ses hizmeti alan kullanıcılar, en iyi sinyali aldığı mikro hücreye bağlanır. Veri hizmeti alan kullanıcılar ise, en iyi sinyali aldıkları makro hücrelere bağlanır. Bu yaklaşım sayesinde yüksek kapasite gerektiren veri kullanıcıları makro hücrelerde toplanırken düşük kapasite tüken ses kullanıcıları ise mikro hücrelerde toplanmaktadır. Bu durum bize kapasite yönetimi bakımından pozitif etki sunmaktadır. Bu politikada makro hücreye yakın olan ses kullanıcısı ve mikro hücreye yakın veri kullanıcısı servis tiplerinden dolayı yakındaki istasyona değil daha uzaktaki istasyona bağlanmaktadır. Bu durumdan dolayı, baz istasyonlarının kaynak kullanım verimliliğini artırsa da kullanıcıların uzaktaki istasyonlarla haberleşebilmesi için daha yüksek pil tüketimine sebep olabilmektedir.

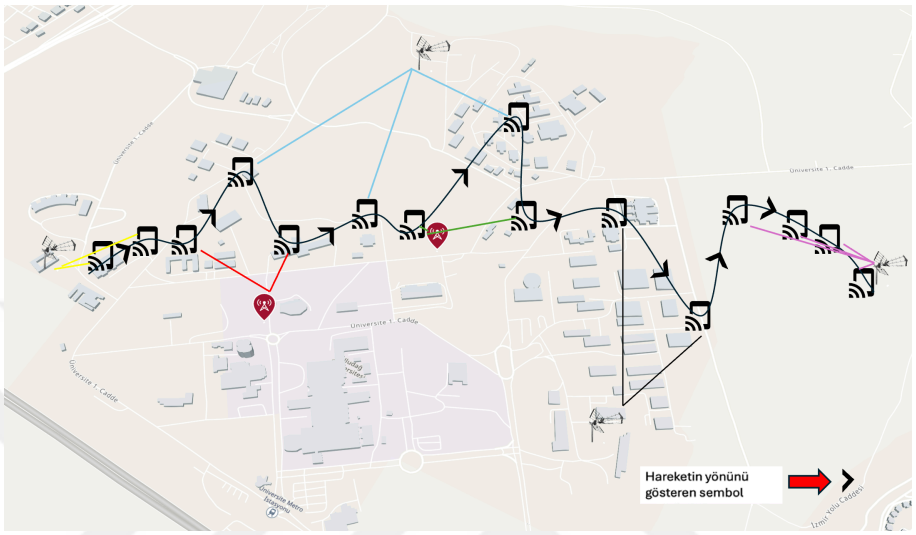


Şekil 18. QoS temelli hücre değişimi senaryosu

4.3.4 Bulanık Mantık Tabanlı Hücre Değişim Senaryosu

Şekil 4.15'de ise bulanık mantık tabanlı hücre değişim stratejisine göre hareket eden kullanıcıya ait senaryo verilmiştir. Bulanık mantık tabanlı hücre değişim yöntemi, RSRP, QoS ve hibrit tabanlı hücre değişim algoritmalarının özelliklerini bir araya getirerek entegre bir yapı sunmaktadır. Bu yöntem ile beraber kullanıcı her adımda tüm istasyonlar

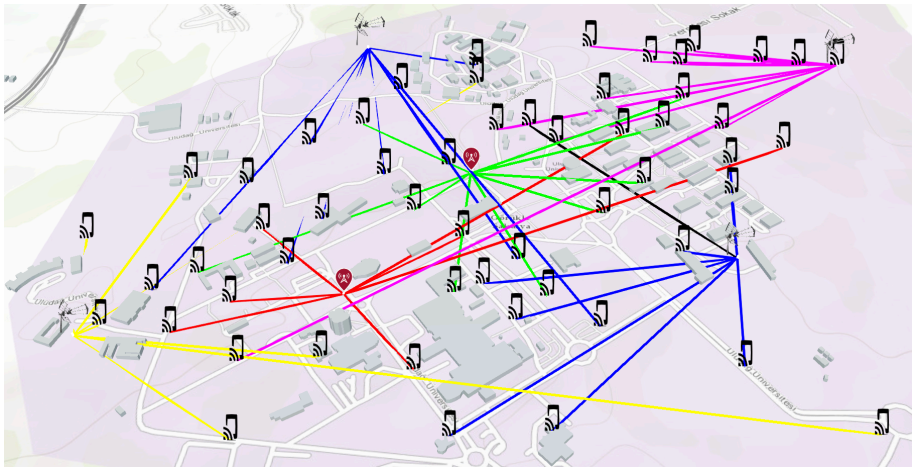
için fuzzy skoru çıkartıp en iyi skora sahip istasyona bağlanmaktadır. Geliştirilen bu hücre değişim yöntemi ile daha dinamik bir karar alma mekanizması geliştirilmiştir. Tasarlanan bu mekanizma ile birlikte özellikle QoS yönteminde gerçekleşen çok sayıdaki hücre değişimin sayısının azaltılması hedeflenmiştir.



Şekil 19. Bulanık mantık tabanlı hücre değişim senaryosu

4.4 Senaryo 2 (Sabit Kullanıcılar)

Senaryo 1'de hareketli kullanıcılara göre RSRP, QoS, Hibrit ve Bulanık mantık tabanlı hücre değişim algoritmaları uygulandığında ağ başarımının değişimini gözlemlemek için tasarlanmıştır. Senaryo 2 hareket halinde olmayan kullanıcılarda hücre değişim algoritmalarının davranışlarını gözlemlemek için geliştirilmiştir. Şekil 4.16'da görüldüğü üzere 40 adet sabit kullanıcı kampüs ortamı içerisine rastgele yerleştirilmiştir. Ortamdaki rastgele kullanıcılara rastgele şekilde ses ve veri hizmeti türlerinde atamalar yapılmıştır. Senaryo 1'de dikkate alınmayan baz istasyonlarının kapasitelerindeki değişim bu senaryoda gözlemlenmiştir. Bu senaryoda ortama daha çok kullanıcı ekleyerek istasyonlarda kapasite problemleri oluşturularak farklı hücre değişim yöntemlerinin etkileri gözlenmiştir. Kullanıcıların hareketli olmadığı, hücre değişim ihtiyacının göz ardı edildiği bu senaryoda analiz için RSRP, QoS, hibrit ve bulanık mantık tabanlı hücre değişim politikaları uygulanmış ve incelenmiştir.



Şekil 20. Kampüs içi sabit kullanıcı dağılımı

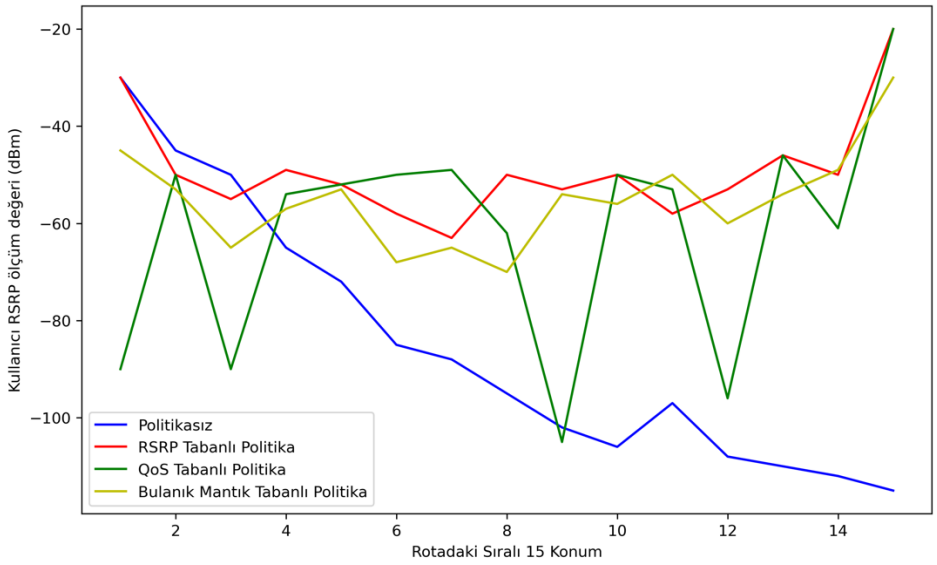
5. O-RAN MİMARİSİNDE HÜCRE DEĞİŞİM YÖNTEMLERİNİN PERFORMANS ANALİZLERİ

Bu bölümde, Bölüm 4'te detaylıca açıklanan senaryoların performans analizleri ve sonuçları detaylı bir şekilde incelenecektir. Her senaryo için yapılan analizler, sinyal seviyesi sonuçları, hücre değişim sayıları ve blok oranları gibi önemli performans göstergeleri açısından ayrıntılı olarak ele analiz edilmiştir. Bu analizler, geliştirilip uygulanan çözümlerin verimliliğini öne çıkarmak, gelecekte çalışılması olası olan optimizasyon ve yeni geliştirme konularına rehberlik etmek açısından önem arz etmektedir. Geliştirilen algoritmalar O-RAN mimarisinde geleneksel ağlara kıyasla daha esnek ve dinamik bir hücre değişim karar mekanizmasına olanak sağlamıştır. O-RAN mimarisine uygun hücre değişim xApp'lerine yeni bir bakış açısı kazandırılması amaçlanmıştır. Bu bakış açısı ile O-RAN sistemlerdeki istasyonlarda hem yük dengeleme optimizasyonu sağlanmış hem de hücre değişim sayısı azaltılarak gereksiz hücre değiştirmelerin (ping-pong etkisi) önüne geçilmiştir. Bu sorunlara çözümler üretilmesi yoğun kullanıcılı ortamlarda müşteri deneyimlerini (QoE) de pozitif etkileyecektir.

5.1 Senaryo 1 (Hareketli Kullanıcı) Sonuç

Bu bölümde farklı hücre değişim politikalarının performans sonuçları Senaryo 1'e göre incelenmiştir. Önerilen hibrit algoritma sabit kullanıcıların bulunduğu ortamlardaki kapasite problemlerine istinaden tasarlandığı için bu senaryoda uygulanmamıştır. Şekil 5.1'de Senaryo 1'de hareket eden kullanıcının rota boyunca farklı konumdaki sinyal seviyeleri tüm hücre değişim politikaları için gösterilmiştir. Tablo 5.1'de ise kullanıcının rota boyunca (15 konum) ortalama RSRP değerleri verilmiştir. Görüldüğü üzere RSRP temelli hücre değişim politika tipi her adımda ölçülen en iyi sinyale göre ilgili baz istasyonuna bağlanma eğilimi göstermektedir. Bu nedenle RSRP tabanlı politikada kullanıcı, rota boyunca her adımda en güçlü sinyal alınan istasyonlarla bağlantı kurmuştur. Bu nedenle her adımda daha iyi bir baz istasyonu yeni bir hücre değişimine sebep olmuştur. Bir diğer taraftan herhangi bir hücre değişim algoritması kullanılmayan politikasız yaklaşımda ise kullanıcı ilk bağlantı kurduğu istasyona bağlı kalmıştır. Bu durum kullanıcının rota boyunca ilgili istasyondan uzaklaşması beraberinde bağlantı kalitesinin düşmesine sebep olmuştur. QoS tabanlı yaklaşımda ise Şekil 5.1'de de görüldüğü üzere bazı adımlarda RSRP politika ile aynı sinyal seviyesinde hizmet

vermiştir. Çünkü bazı konumlarda tercih edilen istasyon tipi iki politikada da aynıdır. Tablodaki değerler, birçok etkinin göz ardı edildiği ideal bir ortamda simüle edildiğinden, gerçek hayatta bina içi ortamlarda her politika türü için bu değerlerin ortalama 10-15 dBm kadar daha düşük olması beklenmektedir. Bu durum göz önüne alındığında, operatörlerin kapasite sorunu yaşanan lokasyonlardan ziyade kapsama problemi bulunan bölgelerde sinyal seviyesini ön planda tutarak, politikasız bir sistem yerine sırasıyla RSRP, Bulanık Mantık veya QoS tabanlı hücre değişim politikalarını kullanması ağ başarımını olumlu yönde etkilyecektir. Böylece operatörler, doğru politikaların uygulanmasıyla kullanıcı deneyimlerini daha etkin ve olumlu bir şekilde yönetebilecektir.



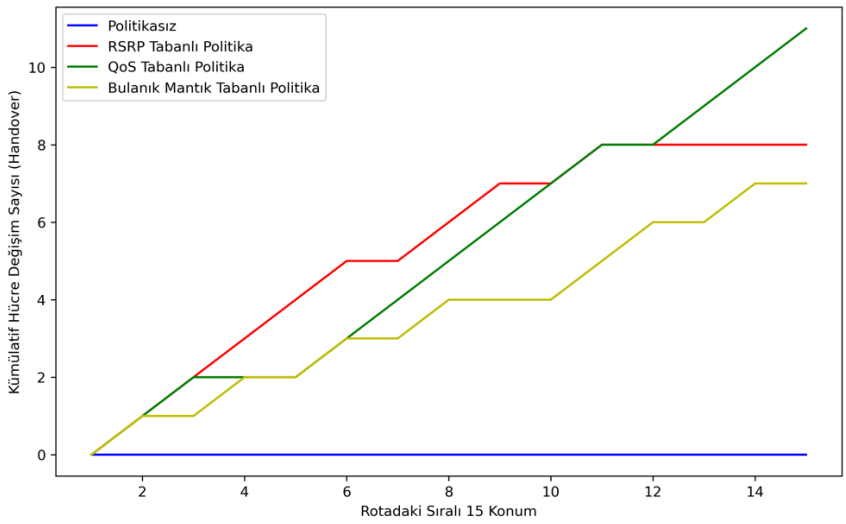
Şekil 211. Hücre değişim algoritmalarının karşılaştırmalı sinyal güçleri

Tablo 5.1. Mobil kullanıcının hücre değişim algoritmasına göre ortalama sinyal gücü

Rota Boyunca Ortalama RSRP Değeri (dBm)			
Politikasız	**QoS Tabanlı**	**RSRP Tabanlı**	**Bulanık Mantık Tabanlı**
-85.33	-62.86	-49.13	-65.35

Şekil 5.2'de mobil kullanıcının rota boyunca kümülatif olarak hücre değişim sayıları farklı hücre değişim algoritmalarına göre bir arada verilmiştir. Politikasız senaryoda kullanıcı, yolculuk boyunca ilk hücreye bağlı kaldığı için hücre değişimi gerçekleştirmemiştir. Öte yandan, QoS tabanlı hücre değişim politikasındaki kullanıcı 15 adımın 11'inde hücre değişimi gerçekleştirirken, RSRP tabanlı hücre değişim

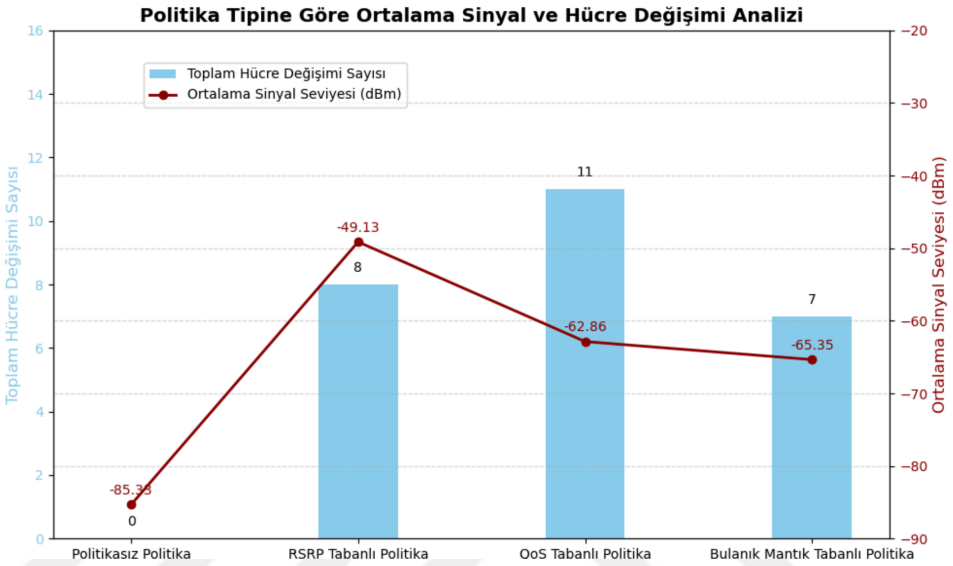
politikasında kullanıcı 8 defa hücre değişimi gerçekleştirmiştir. Bulanık mantık tabanlı politikada ise kullanıcı 15 adımın 7'sinde hücre değişimi gerçekleştirmiştir. Her hücre değişimi işlemi bağlantı yönlerinde belirli veri akış prosedürlerinin uygulanmasını gerektirdiğinden, kullanıcı tarafında kalite problemlerine yol açma ihtimalini arttırmaktadır. Bu sebeple kullanıcılara olabildiğince az hücre değişimi yaptırmak ağ optimizasyonu açısından oldukça önemlidir. Bu sonuçlar ışığında bulanık mantık tabanlı hücre değişim algoritmasının diğer tüm hücre değişim algoritmalarına göre hücre değişim sayısı açısından daha başarılı olduğu tespit edilmiştir. Ancak tez kapsamında yapılan analizler O-RAN mimarisinde sadece hücre değişiminin birçok açıdan ele alınması gerektiğini göstermektedir. Bu nedenle geliştirilen her hücre değişim algoritmasının başarılı olduğu senaryolar adaptif olarak uygulanabilir.



Şekil 5.2 Mobil kullanıcının rotası boyunca kümülatif hücre değişikliği sayısı

Şekil 5.3'de Bölüm 4.1'de detayları verilip geliştirilen bulanık mantık tabanlı hücre değişim yöntemi ile beraber RSRP ve QoS tabanlı hücre değişimi yöntemlerinin toplam hücre değişimi sayıları ve ortalama sinyal seviyeleri bir arada verilmiştir. Ağ operatörlerinin ağ optimizasyonu için düşük hücre değişim sayısı ve yüksek sinyal seviyesi olan yöntemi seçmesi gerekmektedir. Şekilde görüldüğü üzere her ne kadar RSRP politika sinyal seviyesi açısından en iyi sinyali verse de hücre değişimi açısından Bulanık mantık tabanlı politikanın gerisinde kalmıştır. Bulanık mantık tabanlı politika sinyal seviyesi açısından QoS tabanlı politikadan, hücre değişimi performansı açısından ise RSRP politikasından daha iyi sonuçlar vermiştir. Bu iki politikanın eksikliklerine

Bulanık mantık tek başına çözüm bulduğu için en başarılı yöntem olarak değerlendirilebilir. Bu sebeplerden hareketli kullanıcıların yoğun olarak bulunduğu bölgelerde ya da hareketli kullanıcılar için Bulanık mantık tabanlı hücre değişim yönteminin tercih edilmesi mobil operatörler için daha uygun olacaktır.



Şekil 5.3 Senaryo 1 için toplam hücre değişimi sayıları ve ortalama sinyal seviyeleri

5.2 Senaryo 2 (Sabit Kullanıcılar) Sonuç

Sabit sayıda fazla sayıda kullanıcıların olduğu Senaryo 2'de RSRP, QoS Hibrit ve Bulanık mantık tabanlı hücre değişim politikaları analiz edilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Tablo 5.2'de ilk olarak RSRP ve QoS tabanlı hücre değişim politikalarına göre baz istasyonlarının kapasite durumlarındaki değişimler verilmiştir. Tabloda yer alan renkler doluluk oranlarını en yüksekten en düşüğe doğru Kırmızı, Turuncu, Sarı ve Yeşil olarak kategorize ederek baz istasyonlarının kapasite durumunu göstermektedir. Simülasyon sonuçlarına göre RSRP tabanlı hücre değişim politikasında makro hücrelerde kapasite açısından yoğunluk oluşmadığı görülmüştür. Fakat mikro hücrelerde ise durumun tam tersi olduğu tespit edilmiştir. Bu sonucun oluşmasında en önemli etken kullanıcıların tek şart olarak en iyi sinyali ölçtüğü hücreye bağlanmasıdır. Örneğin iyi sinyal seviyelerine sahip, mikro hücrelerin yakınındaki yüksek kapasite ihtiyacı olan veri kullanıcıları, RSRP tabanlı algoritmanın belirlediği koşullar doğrultusunda mikro hücrelere bağlanarak kapasitelerinin tükenmesine neden olmuştur.

QoS tabanlı hücre değişim politkasında ise kapasite açısından, mikro hücrelerde olumlu etki görülmüştür. Fakat bu politikada veri kullanıcılarının tamamının makro hücrelere yönlendirilmesi bazı makro hücrelerdeki kapasite durumu üzerinde yoğunluk etkisi oluşturmuştur.

Tablo 5.2. RSRP-QoS hücre değişim politikalarına göre baz istasyonlarının kapasite durumları

Baz İstasyonu	Doluluk oranı % (RSRP-tabanlı politika)	Doluluk Oranı % (QoS-tabanlı politika)	RSRP-QoS Farkı
Makro1	84.62	87.31	-2.69
Makro2	57.69	87.31	-29.62
Makro3	50	76.92	-26.92
Makro4	88.46	92.31	-3.85
Mikro1	100	61.54	38.46
Mikro2	92.31	57.5	34.81

Tablo 5.3'de ise RSRP ve QoS tabanlı hücre değişim politikalarının ses ve veri servislerine göre blok oranlarına ait sonuçlar verilmiştir. Tabloda görüldüğü üzere QoS tabanlı hücre değişim politikası ses servisinde blok oluşturmamıştır. Ancak veri hizmetinde %9.17'lik bir blok oluşturduğu görülmüştür. QoS tabanlı hücre değişim politikasındaki blok oranlarının RSRP tabanlı hücre değişim stratejisine göre hem ses hem de veri servislerine göre iyileştiği tespit edilmiştir. Bu iyileşmenin temel sebebi, mikro hücrelerin veri yoğunluğunun makro hücrelere yönlendirilmesi ve ses kullanıcıları için mikro hücrelerde kapasite boşluğu açılmasıdır. Bu sayede yüksek boyutta veriye ihtiyaç duyan veri kullanıcılarının yükünden kurtulup mikro hücrelerde ses hizmetine sahip kullanıcılar için yer açılmıştır. Fakat QoS tabanlı politikada da veri servisindeki sorunların oransal olarak azalsa da devam ettiği görülmektedir. Çünkü veri kullanıcıları artık mikro hücrelerde değil belirli makro hücrelerde yoğunlaşarak kapasitif problemler oluşturmuştur.

Tablo 5.3. Ses ve veri servislerinde hücre değişim algoritmalarına göre blok oranları

Servis Tipi	Blok Oranı % (RSRP-tabanlı)	Blok Oranı % (QoS-tabanlı)	RSRP-QoS Farkı
Ses	6.66	0	6.66
Veri	16.23	9.17	7.06

RSRP ve QoS tabanlı hücre değişim politikalarının ardından bu tez kapsamında önerilen hibrit hücre değişim algoritması Senaryo 2'de yürütülmüş ve sonuçları analiz edilmiştir. Tablo 5.4'de RSRP, QoS ve hibrit tabanlı hücre değişim politikalarına ait baz istasyonlarının doluluk oranları gösterilmektedir. Bu sonuçlar ışığında, hibrit hücre değişim algoritmasının QoS tabanlı hücre değişim algoritmasına göre yoğunluk oluşan bazı makro hücrelerdeki trafiği diğer istasyonlara dağıttığı görülmüştür. Hibrit hücre değişim algoritmasının bu dağıtım stratejisi, ağda hem RSRP hem de QoS tabanlı hücre değişim politikalarına göre daha homojen bir trafik dağılımı yarattığı, QoS tabanlı algoritmada blok problemi ile karşılaşan veri kullanıcılarının engellenmek yerine komşu hücrelere yönlendirilmesini sağladığını göstermiştir. Bu homojen dağılımın sinyalleşme verimliliğini arttırma, kullanıcıların daha kolay ve hızlı hücre değiştirmesi sayesinde sinyal zayıf (dead zone) alanını azaltma, kapasitenin daha adil ve eşit bir biçimde dağıtılması ile baz istasyonlarının optimum güç seviyelerinde çalışabilmesi ve enerji tüketimini azaltması gibi birçok olumlu etkisi bulunmaktadır. Aşırı yüklü hücreler genellikle fazla trafiği idare etmek için daha fazla güç gerektirirken, kapasitesi diğer hücrelere göre daha boş kalan hücreler enerjilerini boşa harcamaktadır. Bu enerji yönetimi daha yeşil ve daha sürdürülebilir ağ operasyonları sürecine de katkıda bulunacaktır.

Tablo 5.4. Hücre değişim algoritmalarına göre baz istasyonlarının kapasite durumları

Baz İstasyonu	**Doluluk oranı % (RSRP-tabanlı algoritma)**	**Doluluk Oranı % (QoS-tabanlı algoritma)**	**Doluluk Oranı % (Önerilen hibrit algoritma)**
Makro1	84.62	87.31	80.35
Makro2	57.69	87.31	85.2
Makro3	50	76.92	68.4
Makro4	88.46	92.31	86.31
Mikro1	100	61.54	77.6
Mikro2	92.31	57.5	66.7

Tablo 5.5'de ise RSRP, QoS ve hibrit tabanlı hücre değişim politikalarına ait blok oranları verilmiştir. Veri servis tipi için blok oranı; RSRP tabanlı yaklaşımda %16.23, QoS tabanlı yaklaşımda ise %9.17 olarak bulunmuştu. Bu tez kapsamında önerilen hibrit hücre değişim algoritmasında (Şekil 24) ise veri servis tipi için blok oranı %7.15'e kadar düşmüştür. Bu sayede, kullanıcıların özellikle veri servis tipinde bloklarla karşılaşma

durumları azaltılarak ağ başarımı daha iyi hale gelmiştir. Blok oranlarının düşmesi ağ trafiğinin istasyonlar arasında homojen olarak dağıtılması ile doğru orantılıdır. Bir ağda blok oranların düşürülmesi verimli haberleşme ve ağın performansı için kritik öneme sahiptir.

Tablo 5.5 Ses ve veri servislerinde hücre değişim algoritmalarına göre blok oranları

Servis Tipi	Blok Oranı % (RSRP-tabanlı politika)	Blok Oranı % (QoS tabanlı politika)	Blok Oranı % (Önerilen hibrit algoritma)
Ses	6.66	0	0
Veri	16.23	9.17	7.15

RSRP, QoS ve hibrit hücre değişim politikalarının simülasyon sonuçları elde edilip, sonuçlar karşılaştırmalı olarak analiz edildikten sonra tamamen çözüme kavuşmayan blok oranları ve bazı istasyonlarda devam eden yoğunluk problemlerine çözüm olarak Bölüm 4.2'de geliştirilen bulanık mantık tabanlı hücre değişim politikası simüle edilmiştir. Bu bölümde de Senaryo 2'deki statik kullanıcılar için bulanık mantık tabanlı hücre değişim algoritmasının performans analizleri yapılmış ve diğer hücre değişim algoritmaları ile karşılaştırılmıştır. Tablo 5.6'da RSRP, QoS, hibrit ve bulanık mantık tabanlı hücre değişim algoritmalarının yoğunluk durumları verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, bulanık mantık tabanlı yaklaşımının simülasyon sonuçları hibrit yaklaşıma göre daha dengeli bir şekilde dağıldığı görülmüştür. Hibrit yaklaşımdaki Makro2 ve Makro4 istasyonlarına ait doluluk oranlarının bulanık mantık yaklaşımında azaldığı belirlenmiştir. Bu iki istasyondaki kullanıcıların komşu makro hücrelere bağlandığı anlaşılmaktadır. Sonuç olarak bulanık mantıkla beraber kapasite yönetiminde daha olumlu bir yaklaşım oluşturulabildiği görülmüştür.

Tablo 5.6 Bulanık mantık ile RSRP, QoS ve hibrit tabanlı hücre değişim yöntemlerinin baz istasyonu kapasitesi açısından karşılaştırılması

Baz İstasyonu	Doluluk oranı % (RSRP)	Doluluk Oranı % (QoS)	Doluluk Oranı % (Hibrit)	Doluluk Oranı % (Bulanık Mantık)
Makro1	84.62	87.31	80.35	78.9
Makro2	57.69	87.31	85.2	84.2
Makro3	50	76.92	68.4	75.1
Makro4	88.46	92.31	86.31	82.31
Mikro1	100	61.54	77.6	73.3
Mikro2	92.31	57.5	66.7	70.7

Tablo 5.7'de ise kullanılan tüm hücre değişim algoritmalarının Senaryo 2'ye ait blok oranları bir arada verilmiştir. Bulanık mantık temelli hücre değişim yaklaşımı ile beraber kapasitenin daha homojen şekilde dağılması beraberinde istasyonların doluluk oranlarına da olumlu yansımıştır. İstasyonlardaki yoğunluğun dengelenmesi açısından bulanık mantık temelli politikanın hibrit yaklaşıma göre daha iyi performans gösterdiği bulunmuştur. Bu iki politika arasındaki %0,9'luk fark 5G ve 6G gibi gelecekte daha küçük alanlarda oluşacak yoğun kullanıcı senaryolarında önemli bir etki yaratacaktır.

Tablo 5.7 Ses ve veri servislerinde hücre değişim algoritmalarına göre blok oranları

Servis Tipi	**Doluluk oranı % (RSRP)**	**Doluluk Oranı % (QoS)**	**Doluluk Oranı % (Hibrit)**	**Doluluk Oranı % (Bulanık Mantık)**
Ses	6.66	0	0	0
Veri	16.23	9.17	7.15	6.25

Sonuç olarak bu tez çalışmasında, O-RAN temelli bir kampüs ağı için dört farklı hücre değişim yaklaşımı kullanılarak hücre değişim algoritmalarının ağ başarımına etkisi incelenmiştir. Her bir algoritma, sinyal gücü, hizmet kalitesi ve belirsizlik altında dinamik karar verme gibi ağ performansındaki belirli zorlukları ele almak üzere tasarlanmıştır. Kapsamlı simülasyonlar ve analizler yoluyla, bu algoritmaların hücre değişim kararlarını optimize etme, kullanıcı deneyimini iyileştirme konusundaki etkililiği gösterilmiştir. Bulgular, geliştirilen bulanık mantık ve hibrit temelli hücre değişim modellerinin entegrasyonunun O-RAN mimarilerinde sistemin verimliliğini artırma potansiyelini göstermiştir. Bu çalışma, yeni nesil ağlarda kesintisiz ve akıllı hücre değişim yöntemi için yenilikçi çözümler sunarak O-RAN mimarisinin gelişimine katkıda bulunmayı hedeflemiştir.

6. SONUÇ

Bu tez çalışmasında, O-RAN mimarisinin detaylı bir incelemesi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca Matlab simülasyon yazılımı kullanılarak çeşitli hücre değişim stratejilerinin analizleri yapılmıştır. Simülasyonda, O-RAN mimarisi ve A1 arayüz kuralları takip edilerek kullanıcıların hücre değişim davranışları incelenmiştir. O-RAN mimarisine dayalı çeşitli ağ senaryoları ve kullanıcı iletişim ortamları tasarlanarak, QoS ve RSRP ölçümlerine dayalı geliştirilen hücre değişim algoritmaları ayrıntılı bir şekilde analiz edilmiştir. Geleneksel hücre değişim politikalarının sınırlamalarının üstesinden gelebilmek için yeni hücre değişim algoritmaları geliştirilmiştir. Önerilen hücre değişim algoritmaları, yapılan benzetim sonuçlarına göre, kullanıcıların hizmetlere erişme yeteneğini yansıtan ve "Anahtar Performans Göstergesi" (KPI) olan blok oranı parametresini azaltmada üstün performans göstermiştir. RSRP tabanlı yöntemde, veri kullanıcılarını makro hücrelere yönlendirirken, yakındaki veri kullanıcılarına hizmet veren mikro hücrelerde de kapasite sorunlarına neden olmuştur. Bir diğer taraftan QoS tabanlı yöntem, RSRP tabanlı yönteme kıyasla kapasite yönetimi için daha etkili bir yaklaşım olarak ortaya çıkmaktadır. Bu iki yöntemden farklı olarak önerilen hibrit algoritma, QoS tabanlı yöntemin sınırlamalarını ele alan ve kaynak kullanımını optimize ederek kullanıcı erişim oranlarını arttıran bir çözüm olduğu gözlemlenmiştir. RSRP tabanlı yöntem, mikro hücreler ve dağınık makro hücreler içermeyen ağlar için daha uygun olabilirken, önerilen hibrit algoritmanın mikro hücreler içeren ağlarda uygulanması, mobil operatörler tarafından etkili ağ yönetimi için daha uygun olduğunu kanaatine varılmıştır. Çalışmada son olarak kullanıcı bazlı kod bloklarına göre karar veren yapıdan farklı olarak bulanık mantık temelli hücre değişim yöntemi de geliştirilip analiz edilmiştir. Bulanık mantıktaki giriş ve çıkış fonksiyonları için uygun üyelik fonksiyonları belirlenip, saha tecrübesi ve simülasyon çıktılarına dayanarak kural dizileri oluşturulmuştur. Geliştirilen tüm hücre değişim algoritmaları iki farklı senaryo üzerinde yürütülmüş ve sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu yöntemlerle beraber özellikle veri kullanıcılarının yoğun kaynak tükettiği makro hücrelerde trafik dengeleme işleminin yapılabileceği görülmüştür. Günümüzde, hücre değişimi için kural tabanlı olmayan makine öğrenmesi algoritmaları yaygın olarak kullanılmakta olup, bulanık mantığın da hücresel ağ dünyasındaki birçok gerçek dünya problemine etkili bir çözüm sunabileceği görülmüştür.

KAYNAKLAR

Akyildiz, I. F., Wang, P., Lin, S.-C. 2015. "SoftAir: A software defined networking architecture for 5G wireless systems". Computer Networks, *85*, 1-18.

Alam, M. J., Hossain, M. R., Azad, S., Chugh, R. 2023. "An overview of LTE/LTE-A heterogeneous networks for 5G and beyond". Transactions on Emerging Telecommunications Technologies, *34*(8).

Alavirad, M., Hashmi, U. S., Mansour, M., Esswie, A., Atawia, R., Poitau, G., Repeta, M. 2023. "O-RAN architecture, interfaces, and standardization: Study and application to user intelligent admission control". Frontiers in Communications and Networks, *4*.

Alhaj, N. A., Jamlos, M. F., Manap, S. A., Bakhit, A. A., Mamat, R. 2022. "A Review of Multiple Access Techniques and Frequencies Requirements towards 6G". Içinde *2022 IEEE International RF and Microwave Conference (RFM)* (ss. 1-4). IEEE.

Alraih, S., Nordin, R., Shayea, I., Abdullah, N. F., Alhammadi, A. 2021. "Ping-Pong Handover Effect Reduction in 5G and Beyond Networks". Içinde *2021 IEEE Microwave Theory and Techniques in Wireless Communications (MTTW)* (ss. 97-101). IEEE.

Baransel, C., Dobosiewicz, W., Gburzynski, P. 1995. "Routing in multihop packet switching networks: Gb/s challenge". IEEE Network, *9*(3), 38-61.

Beerten, R., Ranjbar, V., Guevara, A. P., Pollin, S. 2023. "Cell-Free Massive MIMO in the O-RAN Architecture: Cluster and Handover Strategies". Içinde *GLOBECOM 2023 - 2023 IEEE Global Communications Conference* (ss. 5943-5948). IEEE.

Birla, N., Gautam, N., Patel, J., Balaji, P. 2014. "A novel QPSK Modulator". Içinde *2014 IEEE International Conference on Advanced Communications, Control and Computing Technologies* (ss. 653-656). IEEE.

Bonati, L., Polese, M., D'Oro, S., Basagni, S., Melodia, T. 2023. "OpenRAN Gym: AI/ML development, data collection, and testing for O-RAN on PAWR platforms". Computer Networks, *220*, 109502.

Cai, X., Wu, C., Sheng, J., Zhang, J., Wang, Y. 2020a. "A Parameter Optimization Method for LTE-R Handover Based on Reinforcement Learning". Içinde *2020 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC)* (ss. 1216-1221). IEEE.

Cai, X., Wu, C., Sheng, J., Zhang, J., Wang, Y. 2020b. "A Parameter Optimization Method for LTE-R Handover Based on Reinforcement Learning". Içinde *2020 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC)* (ss. 1216-1221). IEEE.

Cheng, H., D'Oro, S., Gangula, R., Velumani, S., Villa, D., Bonati, L., … Melodia, T. 2024. "ORANSlice: An Open-Source 5G Network Slicing Platform for O-RAN".

Cheng, N. F., Pamuklu, T., Erol-Kantarci, M. 2022. "Reinforcement Learning Based Resource Allocation for Network Slices in O-RAN Midhaul".

Chopra, A. 2023. "The Fronthaul Interface". Içinde *Open RAN* (ss. 91-104). Wiley.

Cox, C. 2014. "*An Introduction to LTE*". Wiley.

Cox, C. 2021. "*An Introduction to 5G*". Wiley.

De Simone, L., Di Mauro, M., Natella, R., Postiglione, F. 2024. "Performance and Availability Challenges in Designing Resilient 5G Architectures". IEEE Transactions on Network and Service Management, *21*(5), 5291-5303.

D’Oro, S., Bonati, L., Polese, M., Melodia, T. 2024. "OrchestRAN: Orchestrating Network Intelligence in the Open RAN". IEEE Transactions on Mobile Computing, *23*(7), 7952-7968.

Dryjański, M. 2021. "Open RAN White Paper". Geliş tarihi 20 Ekim 2023, gönderen https://rimedolabs.com/blog/the-o-ran-whitepaper/

Dzaferagic, M., Xavier, B. M., Collins, D., D’Onofrio, V., Martinello, M., Ruffini, M. 2024. "ML-Based Handover Prediction Over a Real O-RAN Deployment Using RAN Intelligent Controller". IEEE Transactions on Network and Service Management, 1-1.

Eberspächer, J., Vögel, H., Bettstetter, C., Hartmann, C. 2008. "*GSM – Architecture, Protocols and Services*". Wiley.

ETSI. 2013. "LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Resource Control (RRC); Protocol specification (3GPP TS 36.331 version 8.18.0 Release 8)". Geliş tarihi 30 Ekim 2023, gönderen https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136300_136399/136331/08.18.00_60/ts_136331v081800p.pdf

Faruque, S. 2019. "*Radio Frequency Multiple Access Techniques Made Easy*". Cham: Springer International Publishing.

Feamster, N., Rexford, J., Zegura, E. 2014. "The Road to SDN: An Intellectual History of Programmable Networks". ACM Sigcomm Computer Communication, *44*(2), 87-98.

Garey, W., Ropitault, T., Rouil, R., Black, E., Gao, W. 2023. "O-RAN with Machine Learning in ns-3". Içinde *Proceedings of the 2023 Workshop on ns-3* (ss. 60-68). New York, NY, USA: ACM.

Gupta, A., Jha, R. K. 2015. "A Survey of 5G Network: Architecture and Emerging Technologies". IEEE Access, *3*, 1206-1232.

Habibi, M. A., Nasimi, M., Han, B., Schotten, H. D. 2019. "A Comprehensive Survey of RAN Architectures Toward 5G Mobile Communication System". IEEE Access, *7*, 70371-70421.

Halawa, T. N., Fathy, R. A., Zekry, A. 2016. "Performance analysis of LTE-A with 256-QAM". Içinde *2016 Sixth International Conference on Digital Information Processing and Communications (ICDIPC)* (ss. 141-145). IEEE.

Haryo Prananto, B., Iskandar, Kurniawan, A. 2022. "O-RAN Intelligent Application for Cellular Mobility Management". Içinde *2022 International Conference on ICT for Smart Society (ICISS)* (ss. 01-06). IEEE.

Jamalipour, A., Wada, T., Yamazato, T. 2005. "A tutorial on multiple access technologies for beyond 3G mobile networks". IEEE Communications Magazine, *43*(2), 110-117.

Kazemifard, N., Shah-Mansouri, V. 2021. "Minimum delay function placement and resource allocation for Open RAN (O-RAN) 5G networks". Computer Networks, *188*, 107809.

Kreutz, D., Ramos, F. M. V., Verissimo, P. E., Rothenberg, C. E., Azodolmolky, S., Uhlig, S. 2015. "Software-defined networking: A comprehensive survey". Proceedings of the IEEE, *103*(1), 14-76.

Kumar, H., Sapru, V., Jaisawal, S. K. 2020. "O-RAN based proactive ANR optimization". Içinde *2020 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps* (ss. 1-4). IEEE.

Lacava, A., Bordin, M., Polese, M., Sivaraj, R., Zugno, T., Cuomo, F., Melodia, T. 2023. "ns-O-RAN: Simulating O-RAN 5G Systems in ns-3". Içinde *Proceedings of the 2023 Workshop on ns-3* (ss. 35-44). New York, NY, USA: ACM.

Lacava, A., Polese, M., Sivaraj, R., Soundrarajan, R., Bhati, B. S., Singh, T., … Melodia, T. 2022. "Programmable and Customized Intelligence for Traffic Steering in 5G Networks Using Open RAN Architectures".

Lee, J., Jung, S., Hong, S.-E., Lee, H. 2024. "Development on Open-RAN Simulator with 5G-LENA". Içinde *2024 International Conference on Information Networking (ICOIN)* (ss. 176-178). IEEE.

Lin, X., Lee, N. (Ed.). 2021. "*5G and Beyond*". Cham: Springer International Publishing.

Madankar, M. M., Ashtankar, P. S. 2016. "Performance analysis of BPSK modulation scheme for different channel conditions". Içinde *2016 IEEE Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science (SCEECS)* (ss. 1-5). IEEE.

Mahamod, U., Mohamad, H., Shayea, I., Othman, M., Asuhaimi, F. A. 2023. "Handover parameter for self-optimisation in 6G mobile networks: A survey". Alexandria Engineering Journal, *78*, 104-119.

Mahrez, Z., Driss, M. Ben, Sabir, E., Saad, W., Driouch, E. 2023a. "Benchmarking of Anomaly Detection Techniques in O-RAN for Handover Optimization". Içinde *2023 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC)* (ss. 119-125). IEEE.

Mahrez, Z., Driss, M. Ben, Sabir, E., Saad, W., Driouch, E. 2023b. "Benchmarking of Anomaly Detection Techniques in O-RAN for Handover Optimization". Içinde *2023 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC)* (ss. 119-125). IEEE.

MATLAB. t.y. "Matlab". Geliş tarihi gönderen https://ch.mathworks.com/products/matlab.html

Muhammad Imran Sarwar, K. N. I. ud D. 2020. "LTE-Advanced – Interference Management in OFDMA Based Cellular Network: An Overview". University of Sindh Journal of Information and Communication Technology, Vol 4, Iss 3, Pp 96-103 (2020).

Natanzi, S. B. H., Tang, B. 2024. "RANFusion: A Comprehensive Tool for Simulating Handover In Next-G RAN".

Navita, Amandeep. 2016. "Performance analysis of OFDMA, MIMO and SC-FDMA technology in 4G LTE networks". Içinde *2016 6th International Conference - Cloud System and Big Data Engineering (Confluence)* (ss. 554-558). IEEE.

O-RAN ALLIANCE. t.y.-a. "O-RAN ALLIANCE WG1. 2022. Use Cases Detailed Specification, v09.00. Technical Report. O-RAN ALLIANCE. ". Geliş tarihi 18 Ekim 2023, gönderen https://orandownloadsweb.azurewebsites.net/specifications

O-RAN ALLIANCE. t.y.-b. "O-RAN ALLIANCE WG2. 2022. A1 Interface: Type Definitions, v04.00. Technical Report. O-RAN ALLIANCE". Geliş tarihi 18 Ekim 2023, gönderen https://orandownloadsweb.azurewebsites.net/specifications

OSM. t.y. "Openstreetmap". Geliş tarihi 20 Ekim 2023, gönderen https://www.openstreetmap.org

Parallelwireless. t.y. "Parallelwireless". Geliş tarihi 15 Şubat 2024, gönderen https://www.parallelwireless.com/wp-content/uploads/1-OpenRAN-101-Series-What-Why-How-When.pdf

Petrut, I., Otesteanu, M., Balint, C., Budura, G. 2015. "HetNet handover performance analysis based on RSRP vs. RSRQ triggers". Içinde *2015 38th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP)* (ss. 232-235). IEEE.

Pinem, M., Syafrudin, N., Zulfin, M. 2019. "Analysis and Optimization of Inter Band Handover Parameter by layering in LTE networks". Içinde *2019 3rd International Conference on Electrical, Telecommunication and Computer Engineering (ELTICOM)* (ss. 130-133). IEEE.

Polese, M., Bonati, L., D'Oro, S., Basagni, S., Melodia, T. 2023a. "ColO-RAN: Developing Machine Learning-Based xApps for Open RAN Closed-Loop Control on Programmable Experimental Platforms". IEEE Transactions on Mobile Computing, *22*(10), 5787-5800.

Polese, M., Bonati, L., D'Oro, S., Basagni, S., Melodia, T. 2023b. "Understanding O-RAN: Architecture, Interfaces, Algorithms, Security, and Research Challenges". IEEE Communications Surveys & Tutorials, *25*(2), 1376-1411.

Polese, M., Bonati, L., D'Oro, S., Basagni, S., Melodia, T. 2023c. "Understanding O-RAN: Architecture, Interfaces, Algorithms, Security, and Research Challenges". IEEE Communications Surveys & Tutorials, *25*(2), 1376-1411.

Polese, M., Bonati, L., D'Oro, S., Johari, P., Villa, D., Velumani, S., … Melodia, T. 2024. "Colosseum: The Open RAN Digital Twin". IEEE Open Journal of the Communications Society, *5*, 5452-5466.

Prananto, B. H., Iskandar, Kurniawan, A. 2023. "Handover improvement using O-RAN near-RT RIC for network with coverage hole". IEICE Communications Express, *12*(1), 2022XBL0144.

Queirós, G., Correia, P., Coelho, A., Ricardo, M. 2024. "Autonomous Control and Positioning of a Mobile Radio Access Node Employing the O- RAN Architecture". Içinde *2024 19th Wireless On-Demand Network Systems and Services Conference (WONS)* (ss. 25-28). IEEE.

Rahnema, M. 1993. "Overview of the GSM system and protocol architecture". IEEE Communications Magazine, *31*(4), 92-100.

Ranjbar, V., Girycki, A., Rahman, M. A., Pollin, S., Moonen, M., Vinogradov, E. 2022. "Cell-Free mMIMO Support in the O-RAN Architecture: A PHY Layer Perspective for 5G and Beyond Networks". IEEE Communications Standards Magazine, *6*(1), 28-34.

Rastogi, E., Maheshwari, M. K., Jeong, J. P. 2023. "Intelligent O-RAN-Based Proactive Handover in Vehicular Networks". Içinde *2023 14th International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)* (ss. 481-486). IEEE.

Rimeod Labs. t.y. "Open RAN White Paper". Geliş tarihi 20 Ekim 2023, gönderen https://rimedolabs.com/blog/tag/open-ran/

Salman, H. A., Ibrahim, L. F., Fayed, Z. 2014. "Overview of LTE-Advanced Mobile Network Plan Layout". Içinde *2014 5th International Conference on Intelligent Systems, Modelling and Simulation* (ss. 585-590). IEEE.

Salvat, J. X., Ayala-Romero, J. A., Zanzi, L., Garcia-Saavedra, A., Costa-Perez, X. 2023. "Open Radio Access Networks (O-RAN) Experimentation Platform: Design and Datasets". IEEE Communications Magazine, *61*(9), 138-144.

Sarikaya, E., Onur, E. 2021. "Placement of 5G RAN Slices in Multi-tier O-RAN 5G Networks with Flexible Functional Splits". Içinde *2021 17th International Conference on Network and Service Management (CNSM)* (ss. 274-282). IEEE.

Silalahi, L. M., Budiyanto, S., Silaban, F. A., Simanjuntak, I. U. V., Rochendi, A. D. 2021. "Improvement Of Quality And Signal Coverage LTE In Bali Province Using Drive Test Method". Içinde *2021 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA)* (ss. 376-380). IEEE.

Singh, H., Gupta, M. M., Meitzler, T., Hou, Z.-G., Garg, K. K., Solo, A. M. G., Zadeh, L. A. 2013. "Real-Life Applications of Fuzzy Logic". Advances in Fuzzy Systems, *2013*, 1-3.

Thaliath, J., Niknam, S., Singh, S., Banerji, R., Saxena, N., Dhillon, H. S., … Roy, A. 2022. "Predictive Closed-Loop Service Automation in O-RAN based Network Slicing".

UMTS Architecture and Functionality. 2009. Içinde *UMTS Networks and Beyond* (ss. 33-43). Wiley.

UMTS Terrestrial Radio Access Network—Architecture and Protocols. 2009. Içinde *UMTS Networks and Beyond* (ss. 73-80). Wiley.

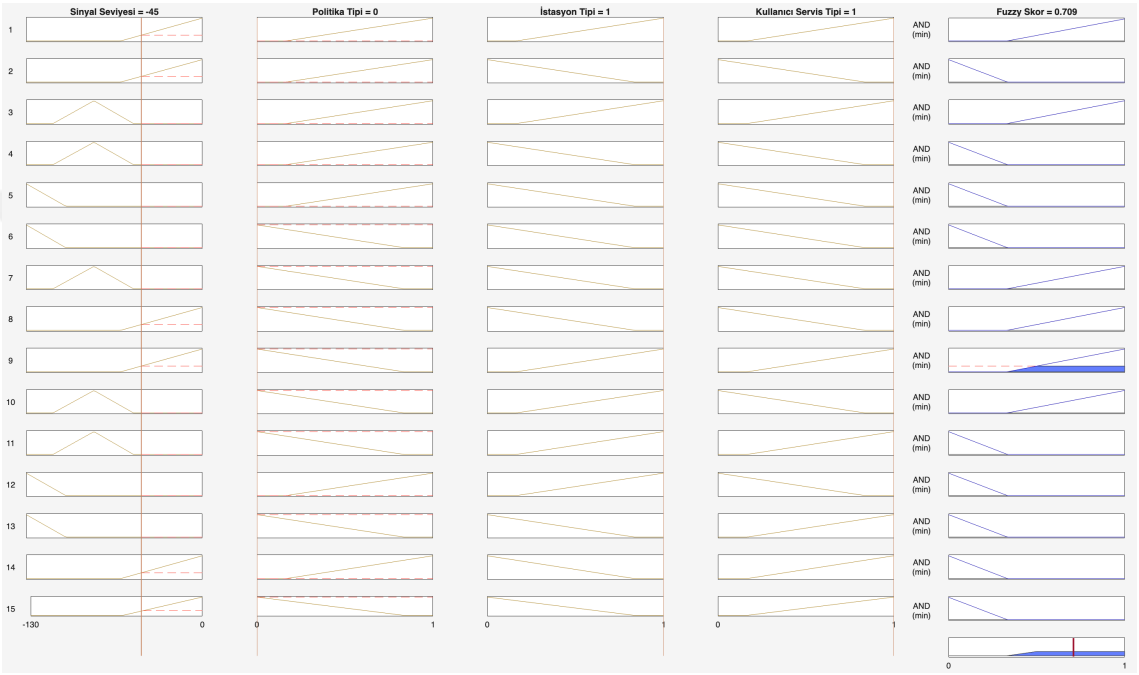
Upadhyaya, P. S., Abdalla, A. S., Marojevic, V., Reed, J. H., Shah, V. K. 2022. "Prototyping Next-Generation O-RAN Research Testbeds with SDRs".

Xian, H., Muqing, W., Jiansong, M., Cunyi, Z. 2011. "The impact of channel environment on the RSRP and RSRQ measurement of handover performance". Içinde *2011 International Conference on Electronics, Communications and Control (ICECC)* (ss. 540-543). IEEE.

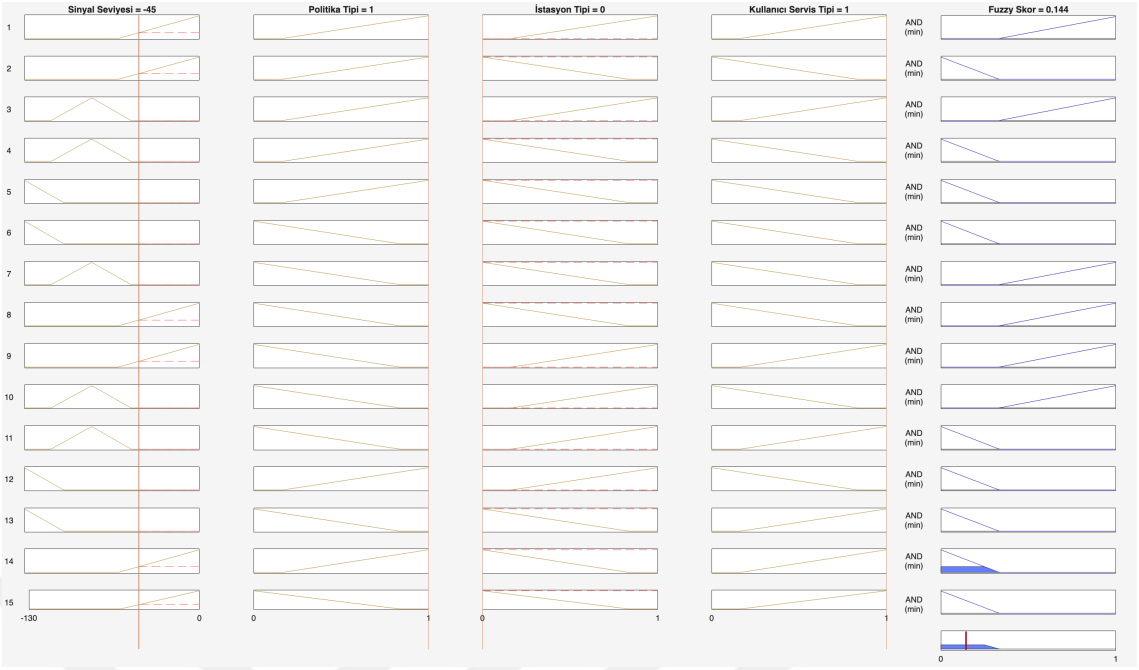
Zadeh, L. A. 1965. "Fuzzy sets". Information and Control, *8*(3), 338-353.

EKLER

EK 1 Şekil 31'de iyi sinyal seviyesine sahip olan, RSRP politika tipindeki macro hücreyi ölçümleyen yüksek fuzzy skor beklenen veri kullanıcısının ve şekilde 32' de ise iyi sinyal seviyesine sahip olan, QoS politika tipinde, mikro hücreyi ölçümleyen düşük fuzzy skoru beklenen veri kullanıcısına ait kurallar dizisinin çıkarımı görülmektedir.



Şekil 1. Yüksek sinyal, RSRP, Macro, data kullanıcısı



Şekil 22. Yüksek sinyal, RSRP, Mikro hücre, data kullanıcısı