KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GELECEK NESİL KABLOSUZ AĞLARDA RADYO ERİŞİM AĞI DİLİMLEMENİN GECİKME VE VERİM ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ

AYKUT ÇUBUKÇU

KOCAELİ 2024

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GELECEK NESİL KABLOSUZ AĞLARDA RADYO ERİŞİM AĞI DİLİMLEMENİN GECİKME VE VERİM ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ

AYKUT ÇUBUKÇU

Prof. Dr. Kerem KÜÇÜK **Danışman, Kocaeli Üniversitesi**	.....
Prof. Dr. Adnan KAVAK **Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi**	.....
Dr. Öğr. Üyesi Nur Banu ALBAYRAK **Jüri Üyesi, Kocaeli Sağlık ve Teknoloji Üniversitesi**	.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 24.06.2024

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ

Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında,

- Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu,
- Çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı,
- Bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi,
- Bu çalışmanın Kocaeli Üniversitesi'nin abone olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun olduğunu,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı,

beyan ederim.

■ Bu tez çalışmasının herhangi bir aşaması hiçbir kurum/kuruluş tarafından maddi/alt yapı desteği ile desteklenmemiştir.

☐ Bu tez çalışması kapsamında üretilen veri ve bilgiler ..... tarafından ..... no'lu proje kapsamında maddi/alt yapı desteği alınarak gerçekleştirilmiştir.

Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Aykut ÇUBUKÇU

YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI

Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda belirtilen koşullarla kullanıma açma izninin Kocaeli Üniversitesi'ne verdiğimi beyan ederim. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet hakları bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki makale, kitap, tebliğ, lisans, patent gibi çalışmalarda kullanımı, danışmanımın isim hakkı saklı kalmak koşuluyla ve her iki tarafın bilgisi dâhilinde bana ait olacaktır.

Tezin kendi özgün çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim kurulu tarafından yayınlanan ***"Lisanüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge"*** kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricinde YÖK Ulusal Tez Merkezi/ Kocaeli Üniversitesi Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

☐ Enstitü yönetim kurulu kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.

☐ Enstitü yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 6 ay ertelenmiştir.

■ Tezim ile ilgili gizlilik kararı verilmemiştir.

Aykut ÇUBUKÇU

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Teknolojinin hızlı ilerleyişi, iletişim alanında yeni olanaklar sunarken, aynı zamanda ağların yönetimini ve optimize edilmesini de zorlaştırıyor. Bu zorlukların üstesinden gelmek için, mobil iletişimde RAN (Radyo Erişim Ağı) dilimleme kavramı önemli bir rol oynamaktadır. RAN dilimleme, ağ kaynaklarını farklı hizmet türleri arasında bölme ve yönetme yeteneğini sağlayarak, ağ performansını artırmak için etkili bir araç sunar. Bu tez, RAN dilimlemenin temel prensiplerinden başlayarak, güncel uygulamalarına ve gelecekteki potansiyeline kadar geniş bir yelpazede bilgi sunmayı amaçlamaktadır.

Tez çalışmamda bana desteğini esirgemeyen, çalışmalarıma yön veren değerli hocam Prof. Dr. Kerem KÜÇÜK'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, akademik çalışmalarım boyunca bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım Prof. Dr. Adnan KAVAK'a, yüksek lisans çalışmam boyunca bana güç veren, inanan ve destekleyen başta sevgili eşim Özlem ÇUBUKÇU olmak üzere, hayatım boyunca bana desteklerini esirgemeyen aileme içten teşekkürlerimi sunarım.

Haziran – 2024 Aykut ÇUBUKÇU

İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ i
YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR iii
İÇİNDEKİLER iv
ŞEKİLLER DİZİNİ v
TABLOLAR DİZİNİ vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ viii
ÖZET ix
ABSTRACT x
1. GİRİŞ 1
1.1. Araştırmanın Önemi ve Motivasyonu 1
1.2. Problem Tanımı 3
1.3. Tezin Organizasyonu 5
2. LİTERATÜR ÖZETİ 6
3. TEORİK TEMELLER VE TEKNİK ARKA PLAN 11
3.1. Genel Ağ Dilimleme Mimarisi, Faydalar ve Zorluklar 11
3.2. Ağ Dilimleme Kullanım Senaryoları 13
3.2.1. Gelişmiş Mobil Geniş Bant Uygulamaları 13
3.2.2. Ultra Güvenilir ve Düşük Gecikmeli İletişim Uygulamaları 14
3.2.3. Toplu Makine Tipi İletişim Uygulamaları 14
3.2.4. Özel Ağlar ve Endüstriyel Uygulamalar 14
3.2.5. Kritik Altyapı ve Kamu Güvenliği Uygulamaları 14
3.2.6. Eğlence ve Medya Uygulamaları 14
3.3. Verim ve Gecikme Kavramları 15
3.3.1. Verimlilik 15
3.3.2. Gecikme 15
3.3.3. Radyo Erişim Ağında Verimlilik ve Gecikmenin Yönetimi 16
3.4. Ağ Dilimleme Etkileştirici Teknolojileri 18
3.4.1. Ağ Fonksiyonlarının Sanallaştırılması 18
3.4.2. Yazılım Tanımlı Ağ 20
3.4.3. Mobil Uç Bilişim 21
3.4.4. Yönetim ve Orkestrasyon 23
3.5. Çekirdek Şebeke ve Ağ Dilimlemedeki Rolü 25
3.6. Radyo Erişim Ağı ve Ağ Dilimlemedeki Rolü 25
3.7. 5G RAN Ağ Dilimleme 26
3.8. Ağ Dilimi Farklında Bulut Temelli Fiziksel Katman Mimarisi 28
4. ARAŞTIRMA METODOLOJİSİ 32
4.1. Araştırma Tasarımı ve Test Senaryoları 32
4.1.1. RAN Ağ Dilimleme – QoS İlişkisi 32
4.1.2. RAN Ağ Dilimleme – Bant Genişliği İlişkisi 32
4.1.3. RAN Ağ Dilimleme – Nümeroloji İlişkisi 33
4.2. Simülasyon Araçları 34
4.2.1. NS-3 (Network Simulator 3) Ağ Simülatorü 35
5. SİMÜLASYON SONUÇLARI VE ANALİZ 37
5.1.1. QoS Değişimi Test Sonuçları 37
5.1.2. Bant Genişliği Değişimi Test Sonuçları 38

5.1.3. Nümeroloji Değişimi Test Sonuçları 40
6. TARTIŞMA 42
6.1. Teorik ve Pratik Çıkarımlar 42
7. SONUÇ 44
KAYNAKLAR 45
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER 47
ÖZGEÇMİŞ 48

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. Halka açık ağda, ağ dilimleme ile fabrikaya özel ağ oluşturulması 11
Şekil 3.2. Ağ dilimlerine göre paylaşımlı fiziksel kaynak bloğu kullanımı 26
Şekil 3.3. Uçtan uca 5G ağ dilimleme mimarisi 27
Şekil 3.4. Ağ dilimi farklında O-RAN bulut temelli fiziksel katman mimarisi 29
Şekil 3.5. 5G'de Açık RAN fonksiyonel ayrıştırma seçenekleri 29
Şekil 3.6. Ağ dilimlerine ayrıştırılmış bireysel fiziksel kaynak blokları 30
Şekil 5.1. QoS tiplerinin veri hızındaki etkisi 38
Şekil 5.2. Uygulamaların bant genişliği kullanımı 39
Şekil 5.3. Kullanıcı sayısının veri hızı ve gecikme üzerindeki etkisi 40
Şekil 5.4. Nümeroloji değişiminin veri hızındaki etkisi 41

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 3.1. Verim ve gecikmenin yönetimi ve optimizasyon noktaları 17
Tablo 3.2. Nümerolojiye göre 5G çerçeve yapısı 25
Tablo 4.1. 5G Lena Özellik Tablosu 35
Tablo 5.1. QoS tipi test senaryosu ve sonuçlar 38
Tablo 5.2. 4 UE-12 farklı trafik akış konfigürasyonu 39
Tablo 5.3. Nümeroloji konfigürasyonu 40
Tablo 6.1. QoS tipleri ve açıklamaları 43

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Kısaltmalar

3GPP : 3rd Generation Partnership Project (3. Nesil Ortaklık Projesi)
4G : Forth-Generation (Dördüncü Nesil)
5G : Fifth-Generation (Beşinci Nesil)
5GC : 5G Core Network (Beşinci Nesil Çekirdek Şebeke)
5QI : 5G QoS Identifier (Beşinci Nesil Servis Kalitesi Tanımlayıcısı)
6G : Sixth-Generation (Altıncı Nesil)
AF : Application Function (Uygulama Fonksiyonu)
AMF : Access and Mobility Management Function (Erişim ve Hareketlilik Yönetimi Fonksiyonu
API : Application Programming Interface (Uygulama Programlama Arayüzü)
ARP : Allocation and Retention Priority (Tahsis ve Tutma Önceliği)
AUSF : Authentication Server Function (Kimlik Doğrulama Sunucusu Fonksiyonu)
DN : Data Network (Veri Ağı)
DNN : Data Network Name (Veri Ağı Adı)
eMBB : Enhanced Mobile Broad Band (Geliştirilmiş Mobil Geniş Bant)
ETSI : European Telecommunications Standards Institute (Avrupa Telekomünikasyon Standartları Enstitüsü)
FQDN : Full Qualified Domain Name (Tam Nitelikli Alan Adı)
GBR : Guaranteed Bit Rate (Garanti Edilmiş Bit Hızı)
GTP-U : GPRS Tunneling Protocol - User Plane (GPRS Tünelleme Protokolü)
GUTI : Globally Unique Temporary Identifier (Geçici Kullanıcı Tanımlayıcı)
HTTP : Hypertext Transfer Protocol (Hiper Metin Transfer Protokolü)
HTTP 2 : Hypertext Transfer Protocol Sürüm 2 (Hiper Metin Transfer Protokolü Sürüm 2)
IMSI : International Mobile Subscriber Identity (Uluslararası Mobil Abone Kimliği)
IoT : Internet-of-Things (Nesnelerin İnterneti)
IP : Internet Protocols (İnternet Protokolleri)
MANO : Management and Orchestration (Yönetim ve Orkestrasyon)
MAC : Medium Access Control (Orta Erişim Kontrolü)
MCC : Mobile Country Code (Mobil Ülke Kodu)
MNC : Mobile Network Code (Mobil Şebeke Kodu)
MEC : Mobile Edge Computing (Mobil Uç Bilişim)
MBR : Maximum Bit Rate (Maksimum Bit Hızı)
MIMO : Multi Input Multi Output (Çoklu Giriş Çoklu Çıkış)
mMTC : Massive Machine Type Communications (Yoğun Makine Tipi İletişim)
NAS : Non-Access Stratum (Erişim Dışı Katman)
NF : Network Function (Ağ Fonksiyonu)
NFV : Network Function Virtualization (Ağ Fonksiyonu Sanallaştırma)
NFVI : Network Function Virtualization Infrastructure (Ağ Fonksiyonu Sanallaştırma Altyapısı)
NFVO : Network Function Virtualization Orchestrator (Ağ Fonksiyonu Sanallaştırma Orkestratörü)
NGAP : Next Generation Application Protocol (Gelecek Nesil Uygulama Protokolü)

NRF : Network Repository Function (Ağ Depolama Fonksiyonu)
NSSF : Network Slice Selection Function (Ağ Dilimi Seçme Fonksiyonu)
ONF : Open Network Foundation (Açık Ağ Oluşturma Vakfı)
ORAN : Open-Radio Access Network (Açık radyo erişim ağı)
PCF : Policy Control Function (Politika Kontrol Fonksiyonu)
PDR : Packet Delay Budget (Paket Gecikme Bütçesi)
PDU : Protocol Data Unit (Protokol Veri Birimi)
PER : Packet Error Rate (Packet Hata Oranı)
PFCP : Packet Forwarding Control Protocol (Paket Yönlendirme Kontrol Protokolü)
PLMN : Public Land Mobile Network (Kamu Alanı Mobil Ağı)
QFI : QoS Flow Identifier (Servis Kalitesi Akış Tanımlayıcısı)
QoS : Quality of Service (Servis Kalitesi)
RAN : Radio Access Network (Radyo Erişim Ağı)
RLC : Radio Link Control (Radyo Link Kontrol)
SCTP : Stream Control Transmission Protocol (Akış Kontrollü İletim Protokolü)
SDN : Software-Defined Network (Yazılım Tanımlı Ağ)
SIM : Subscriber Identity Module (Abone Kimlik Modülü)
SMF : Session Management Function (Oturum Yönetim Fonksiyonu)
SMSC : Short Message Service Center (Kısa Mesaj Servisi Merkezi)
SUCI : Subscription Concealed Identifier (Abone Gizli Kimliği)
TCP : Transmission Control Protocol (İletim Kontrol Protokolü)
TN : Transport Network (İletim Ağı)
UE : User Equipment (Kullanıcı Ekipmanı)
UDP : User Datagram Protocol (Kullanıcı Datagram Protokolü)
UDR : Unified Data Repository (Birleşik Veri Deposu)
UDM : Unified Data Management (Birleşik Veri Yönetimi)
URLLC : Ultra-Reliable Low Latency Communication (Ultra Güvenilir ve Düşük Gecikmeli İletişim
UPF : User Plane Function (Kullanıcı Düzlemi Fonksiyonu)
VIM : Virtualized Infrastructure Manager (Sanal Altyapı Yöneticisi)
VLAN : Virtual Local Area Network (Sanal Yerel Alan Ağı)
VNF : Virtual Network Function (Sanal Ağ Fonksiyonu)
VNFM : Virtual Network Function Manager (Sanal Ağ Fonksiyonu Yöneticisi)
VR : Virtual Reality (Sanal Gerçeklik)

GELECEK NESİL KABLOSUZ AĞLARDA RADYO ERİŞİM AĞI DİLİMLEMENİN GECİKME VE VERİM ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Beşinci Nesil (5G) ve ötesi haberleşme sistemlerinde, ağa bağlanan cihaz sayısının artmasıyla birlikte, sistemdeki kullanıcıların farklı bant genişliği ve gecikme ihtiyacı olacağı değerlendirilmektedir. Son yıllarda gelişen sanallaştırma ve bulut teknolojileri ile birbirinden izole Ağ Dilimleri (Network Slice) oluşturularak daha iyi Servis Kalitesi (Quality of Service, QoS) sağlanabileceği bilinmektedir. Ağ dilimlemenin gerçeklenmesi çekirdek şebeke tarafında kısmen daha kolay olmasına rağmen Radyo Erişim Ağı (Radio Access Network, RAN) tarafındaki ağ dilimleme oldukça karmaşıktır. Bu çalışmada, RAN ağ dilimlemenin mevcut mimaride uygulanabilirliği ağ dilimi-QoS ilişkisi, ağ dilimi-bant genişliği ve ağ dilimi-nümeroloji ilişkisi açısından incelenmiştir. Fiziksel kaynak kullanımı açısından 5G RAN ağ dilimleme performası, sistemdeki veri hızı ve gecikme değerlerine göre QoS tipi, bant genişliği ve nümeroloji parametreleri kullanılarak analiz edilmiştir. Garanti edilen servis kalitesinin sağlanabilmesi için fiziksel kaynak bloğunun ağ dilimi farkında mimarilerle dinamik olarak yönetilmesi gerektiği simülasyon sonuçlarıyla gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: 5G Radyo Erişim Ağı, Ağ Dilimleme, Bant Genişliği, Fiziksel Kaynak Yönetimi, Servis Kalitesi.

ANALYSIS OF RADIO ACCESS NETWORK SLICING ON LATENCY AND THROUGHPUT IN NEXT-GENERATION WIRELESS NETWORKS

ABSTRACT

In fifth generation (5G) and beyond communications systems, it is estimated that as the number of devices connected to the network increases, users in the system will require different bandwidth and delay. It is known that better quality of service (QoS) can be achieved by creating isolated network slices using virtualisation and cloud technologies that have been developed in recent years. Although network slicing is somewhat easier to implement on the core network side, network slicing on the Radio Access Network (RAN) side is quite complex. In this study, the applicability of RAN network slicing in the current architecture was investigated in terms of network slice-QoS relationship, network slice-bandwidth relationship and network slice-numerology relationship according to throughput and latency parameters in the system. The performance of 5G RAN network slicing was analysed in terms of physical resource utilisation according to QoS type, bandwidth and numerology. Simulation results showed that the physical resource block must be dynamically managed with network slice-aware architectures to ensure guaranteed quality of service.

Keywords: 5G Radio Access Network, Network Slicing, Bandwidth, Physical Resource Management, Quality of Service.

1. GİRİŞ

1.1. Araştırmanın Önemi ve Motivasyonu

Mobil iletişim teknolojileri hızla gelişmekte ve 5G ile ötesi ağlar, mevcut ve gelecekteki iletişim ihtiyaçlarını karşılamak üzere tasarlanmaktadır. Bu yeni nesil ağlar, yalnızca yüksek hız ve geniş bant genişliği sunmakla kalmayıp, aynı zamanda çeşitli endüstriyel, ticari ve kullanıcı odaklı uygulamaları destekleyerek, esneklik ve performans optimizasyonu sağlamaktadır. Radyo erişim ağları (RAN) ve ağ dilimleme (network slicing) teknolojileri, bu bağlamda kritik bir rol oynamaktadır. Tez genelinde bu iki kavram RAN ağ dilimleme olarak ifade edilerek kullanılmıştır.

Uçtan uca UE' den çıkan veri yolu ele alındığında sırasıyla radyo erişim ağı, iletim ağı ve çekirdek şebekeden geçerek veri ağına ulaşmaktadır. Ağ dilimleme, bu yol üzerinde her bileşen üzerinde aynı altyapıyı kullanarak birden fazla farklı trafik tipi için izole sanal ağlar oluşturup, son kullanıcıya daha iyi servis kalitesi sunmayı amaçlamaktadır. Çekirdek şebeke ağ dilimleme, ağ fonksiyonlarının sanallaştırması üzerine tasarlandığı için kısmen daha kolay olmasına rağmen radyo erişim ağındaki ağ dilimleme, fiziksel kaynakların dinamik olarak her ağ dilimine optimize olarak sunulması açısından daha karmaşıktır.

Bu çalışmada, RAN ağ dilimlemenin mevcut mimaride uygulanabilirliği ağ dilimi-QoS ilişkisi, ağ dilimi-bant genişliği ve ağ dilimi-nümeroloji ilişkisi açısından incelenmiştir. Fiziksel kaynak kullanımı açısından 5G RAN ağ dilimleme performansı, sistemdeki veri hızı ve gecikme değerlerine göre QoS tipi, bant genişliği ve nümeroloji parametreleri kullanılarak analiz edilmiştir. Garanti edilen servis kalitesinin sağlanabilmesi için fiziksel kaynak bloğunun ağ dilimi farkında mimarilerle dinamik olarak yönetilmesi gerektiği simülasyon sonuçlarıyla gösterilmiştir. Bu tez aşağıdaki başlıklar altında incelenerek, gelecek nesil 5G ve ötesi haberleşme teknolojosi çalışmalarına katkı sağlamayı hedeflemektedir.

1. Çeşitli Hizmet Gereksinimlerinin Karşılanması: 5G ve ötesi ağlar, IoT (Internet of Things) cihazlarından otonom araçlara, akıllı şehir uygulamalarından yüksek çözünürlüklü video akışlarına kadar geniş bir yelpazedeki hizmetleri desteklemek

zorundadır. RAN ağ dilimleme teknolojisi, bu farklı hizmetlerin her birinin spesifik gereksinimlerini karşılamak için ağ kaynaklarını dinamik olarak tahsis edebilme yeteneği sunar.

2. Performans Optimizasyonu: Gecikme (latency) ve verim (throughput) gibi ağ performansının temel metrikleri, kullanıcı deneyimini doğrudan etkiler. Düşük gecikme ve yüksek verim, özellikle gerçek zamanlı uygulamalar ve kritik görevler için elzemdir. RAN ağ dilimlemenin bu metrikler üzerindeki etkilerinin anlaşılması, performansın optimize edilmesi için gereklidir.
3. Kaynak Verimliliği ve Esneklik: 5G ve ötesi ağlarda kaynakların verimli kullanımı ve esnek yapılandırma yetenekleri hem ekonomik hem de operasyonel açıdan önemlidir. Ağ dilimleme teknolojisi, kaynakların en verimli şekilde kullanılmasını sağlayarak, operatörlerin maliyetlerini düşürmesine ve hizmet kalitesini artırmasına yardımcı olur.

Tez aşağıda sıralanmış maddelere katkı sağlama motivasyonuyla ele alınmıştır.

- Geleceğe Yönelik Hazırlık: Mobil iletişim teknolojilerinin hızla gelişmesi, gelecekte daha karmaşık ve çeşitli kullanım senaryolarının ortaya çıkmasına neden olmaktadır. 5G ve ötesi ağların farklı ihtiyaçları karşılayabilmesi için, ağ altyapılarının esnek, dinamik ve ölçeklenebilir olması gerekmektedir. RAN ağ dilimleme teknolojisi, bu ihtiyaçları karşılamak üzere geliştirilmiş yenilikçi bir çözümdür. Bu araştırmanın motivasyonu, gelecekteki ağ gereksinimlerini öngörmek ve bu gereksinimlere uygun, ileriye dönük çözümler sunmaktır. Böylece, geleceğin iletişim ağları daha sağlam ve adaptif bir yapıya kavuşacaktır.
- Akademik Katkılar ve Bilgi Birikiminin Artırılması: RAN ağ dilimleme, mobil iletişim ve ağ yönetimi alanlarında henüz tam anlamıyla keşfedilmemiş bir araştırma konusudur. Bu çalışma, akademik literatüre katkı sağlayarak, RAN ağ dilimleme teknolojisinin farklı yönlerini ve uygulama senaryolarını aydınlatmayı amaçlamaktadır. Bu araştırma, ağ performansını artırmak için yeni yöntemler ve stratejiler sunarak, akademik camianın bu alandaki bilgi birikimini genişletecektir. Ayrıca, gelecekteki araştırmalara temel oluşturacak ve yeni çalışma alanlarının açılmasına katkıda bulunacaktır.
- Endüstriyel Uygulamalar ve Yenilikçi Çözümler: Mobil ağ operatörleri ve teknoloji sağlayıcıları, artan kullanıcı taleplerini karşılamak ve rekabet avantajı elde etmek için

sürekli olarak yenilikçi çözümler aramaktadır. RAN ağ dilimleme, ağ kaynaklarının verimli kullanımı ve performans optimizasyonu açısından büyük bir potansiyele sahiptir. Bu araştırma, endüstriye yönelik pratik çözümler ve stratejiler geliştirerek, operatörlerin ağlarını daha etkili bir şekilde yönetmelerine, maliyetleri düşürmelerine ve hizmet kalitesini artırmalarına yardımcı olacaktır. Bu da, sektördeki rekabeti artıracak ve yeni iş modellerinin gelişmesine olanak tanıyacaktır.

- Kullanıcı Deneyiminin İyileştirilmesi: Modern mobil ağ kullanıcıları, düşük gecikme süresi ve yüksek veri hızları gibi yüksek performans beklentilerine sahiptir. RAN ağ dilimleme, kullanıcıların bu beklentilerini karşılayarak, daha hızlı, güvenilir ve kesintisiz bir iletişim deneyimi sunmayı hedeflemektedir. Bu araştırma, çeşitli hizmet gereksinimlerini en iyi şekilde karşılayarak, kullanıcı memnuniyetini artıracak ve mobil hizmetlerin benimsenmesini hızlandıracaktır. Daha iyi bir kullanıcı deneyimi, uzun vadede mobil ağlara olan talebi artıracak ve sektörün genel büyümesine katkıda bulunacaktır.
- Teknolojik Gelişim ve İnovasyonun Teşviki: RAN ağ dilimleme teknolojisi, mobil iletişimde yenilikçi yaklaşımlar ve çözümler sunma potansiyeline sahiptir. Bu araştırma, teknoloji geliştirme sürecinde yenilikçiliği teşvik ederek, daha ileri teknolojilerin geliştirilmesine olanak tanıyacaktır. Ayrıca, yeni nesil mobil ağların daha esnek ve uyarlanabilir olmasını sağlayacak yöntemler sunarak, teknolojik gelişimin hızlanmasına katkıda bulunacaktır. Bu da mobil iletişim alanında sürekli yenilik ve ilerlemenin önünü açacaktır.

Bu motivasyonlar ışığında, araştırma, 5G ve ötesi ağlarda RAN ağ dilimlemenin gecikme ve verim üzerindeki etkilerini derinlemesine inceleyerek, mobil iletişim teknolojilerinin geleceği için önemli bilgiler ve çözüm önerileri sunmayı amaçlamaktadır. Bu çalışma hem akademik hem de endüstriyel düzeyde değerli katkılar sağlayacak ve geleceğin ağlarını şekillendirmede önemli bir rol oynayacaktır.

1.2. Problem Tanımı

Gelecek nesil kablosuz ağlar (5G ve ötesi), yüksek veri hızları, düşük gecikme süreleri ve geniş cihaz bağlantı kapasitesi ile modern iletişim teknolojisinin temelini oluşturacaktır. Bu ağların başarısı, çeşitli servis taleplerini karşılayabilme yeteneklerine bağlıdır. Bu

bağlamda, ağ dilimleme ve özellikle RAN ağ dilimleme, fiziksel ve mantıksal ağ kaynaklarının dinamik ve esnek bir şekilde bölümlenerek farklı hizmet sınıflarına tahsis edilmesini sağlayan kritik teknolojiler olarak öne çıkmaktadır.

Ağ dilimleme, aynı fiziksel ağ altyapısını kullanarak farklı servis gereksinimlerini karşılayabilmek için ağ kaynaklarının sanal dilimlere ayrılması sürecidir. RAN dilimleme ise, bu dilimlemenin Radyo Erişim Ağı seviyesinde uygulanmasıdır. Bu sayede, düşük gecikme süresi gerektiren endüstriyel uygulamalar, yüksek bant genişliği gerektiren multimedya servisleri ve geniş bağlantı kapasitesi gerektiren IoT uygulamaları, aynı ağ üzerinde farklı RAN ağ dilimleri kullanılarak desteklenebilir. Ancak, RAN ağ dilimlemenin etkin bir şekilde yönetilmesi ve optimize edilmesi gerekmektedir. Aksi takdirde, ağ performansı olumsuz etkilenebilir ve istenen hizmet kalitesine ulaşılamayabilir.

Ağ dilimleme çekirdek şebeke tarafında daha kolay olmasına rağmen RAN tarafında daha karmaşık ve zordur. Bu çalışma kapsamında RAN ağ dilimlemenin hayata geçebilmesi için QoS, Bant genişliği ve nümeroloji değişiklikleri durumda fiziksel kaynak bloğunun, sistemde oluşturulmuş ağ dilimlerindeki gecikme ve verim üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. Sonuçların gelecekteki kablosuz ağların tasarımı ve yönetimi için önemli bilgiler sunmayı hedeflemektedir.

Tez kapsamında aşağıdaki sorulara yanıt aranacaktır:

1. Paylaşımlı fiziksel kaynak kullanımı ile hayata geçirilen RAN ağ dilimleme mimarisi, ağ gecikme sürelerini nasıl etkiler?
2. Paylaşımlı fiziksel kaynak kullanımı ile hayata geçirilen RAN ağ dilimleme mimarisi, ağ veri verimliliğini nasıl etkiler?
3. Uçtan uca ağ dilimi performansı açısından QoS, Bant Genişliği ve Nümeroloji değişimlerinin RAN tarafında gecikme ve verimlilik üzerindeki karşılaştırmalı etkileri nelerdir?
4. Optimum RAN ağ dilimleme yöntemleri belirlenebilir mi ve bu yöntemler ağ performansını nasıl iyileştirir?
5. Hangi etkileştirici teknolojiler kullanılarak RAN ağ dilimlemenin hayata geçebilmesi mümkün olabilir?

Bu sorulara yanıt bulunması hem akademik hem de endüstriyel alanda gelecekteki kablosuz ağların daha etkili bir şekilde planlanması ve yönetilmesine katkı sağlayacaktır.

1.3. Tezin Organizasyonu

Bu çalışma giriş bölümünde belirtilen motivasyon ve problem tanımı üzerine odaklanarak, gelecek nesil kablosuz haberleşme sitemeler için uçtan uca ağ dilimlemenin nasıl hayata geçebileceğini radyo erişim ağı açısından ele alarak, buradaki zorlukları ve avantajları açıklamaktadır. Bölüm 2' de son yıllarda genel ağ dilimleme, dinamik kaynak yönetimi ve RAN ağ dilimlemeyle ilgili yapılan çalışmaları içermektedir. RAN ağ dilimleme birçok kolaylık getirmesine rağmen uygulanması karmaşıktır. Aynı bölümde literatürdeki bu karmaşıklıktan ortaya çıkan akademik ve endüstriyel açıdan açık olan konular ele alınmıştır.

Bölüm 3' te teorik temeller ve RAN ağ dilimleme için kullanılan teknik arka plan anlatılmıştır. Bölüm 4' te tezde kullanılan araştırma metodolojisi ve kullanılan simülasyon araçları anlatılmıştır. Bölüm 5' te elde edilen simülasyon sonuçları analiz edilmiştir. Bölüm 6' da bu çalışma kapsamında elde edilen bulgular literatürdeki çıkarımlar ile karşılaştırılarak, önerilen ağ dilim farklında bulut temelli RAN ağ dilimlemenin pratikte uygulanabilirliği tartışılmıştır. Bölüm 7'de gelecek nesil haberleşme sistemlerinde kullanıcı tarafından istenen servis kalitesinin ağ dilimleme kullanılarak sağlanabileceği vurgulanarak, bunun hayata geçmesinde ayrık bireysel kaynakların kullanması önerilmiştir. Dinamik ve bulut temelli baz istasyonu tasarımının altı çizilmiştir.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

5G teknolojisi, farklı kullanım senaryolarının gerektirdiği çeşitli hizmet kalitesi, gecikme, güvenlik ve bant genişliği gereksinimlerini karşılamak için yeni ağ yönetim tekniklerine ihtiyaç duymaktadır. Bu bağlamda, RAN ağ dilimleme, 5G'nin önemli bir bileşeni olarak öne çıkmaktadır. RAN ağ dilimleme, tek bir fiziksel ağ altyapısı üzerinde birden fazla sanal ağ oluşturmayı mümkün kılarak, her bir dilimin belirli bir hizmet veya uygulama türü için optimize edilmesini sağlar. Bu teknoloji, ağ operatörlerinin kaynakları daha esnek ve verimli bir şekilde tahsis etmesine olanak tanırken, aynı zamanda hizmet seviyesini garanti altına alır. RAN ağ dilimleme, yüksek hızda veri iletimi, ultra düşük gecikme süresi ve geniş ölçekli cihaz bağlantısı gibi 5G'nin sunduğu temel avantajları en üst düzeye çıkarmak için kritik öneme sahiptir. Literatürde, RAN ağ dilimlemenin uygulanabilirliği, performans optimizasyonu, güvenlik önlemleri ve kaynak yönetimi gibi çeşitli yönler detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu girişimler, 5G ve sonrasındaki ağların dinamik ve çok yönlü doğasına yanıt vermek için stratejik çözümler sunmaktadır.

Radyo kaynak yönetiminin efektif kullanmasına yönelik yapılan bir çalışmada (Dryjanski ve diğ., 2020), 5G ve sonrasında mobil ağların radyo kaynak yönetimi ile ilgili karşılaştığı karmaşıklıklara çözümler sunulmaktadır. Mobil ağlar, çok sayıda spektrum bandı, kullanım durumu, sistem özelliği, lisanslama düzeni, radyo teknolojisi ve ağ katmanlarını içerdiği için yönetimi oldukça zorlaşmıştır (Han ve diğ., 2018). Bu karmaşıklığı yönetmek için, hiyerarşik ve modüler bir radyo kaynak yönetimi mimarisi önerilmektedir. Bu mimari sayesinde, mobil ağlar daha esnek ve ölçeklenebilir bir yapıya kavuşarak, farklı kullanım senaryoları ve teknolojik yeniliklere daha kolay uyum sağlayabileceklerdir. Makale, ayrıca önerilen mimarinin çeşitli kullanım durumlarındaki uygulanabilirliğini örneklerle açıklamaktadır.

Veri temelli kaynak yönetim mekanizmaları ile radyo erişim ağ dilimlemenin hayata geçmesi önerilmektedir (Hao ve diğ., 2019). Uçtan uca ağ dilimleme değerlendirildiğinde, radyo erişi ağı tarafında bazı optimizasyonlar yapılması servis kalitesini arttırabilir (Papa ve diğ., 2019). Radyo kaynaklarının artan kullanıcı sayısına göre sanal olarak önetilmesi gelecek nesil kablosuz haberleşme sistemleri için oldukça kritik bir öneme sahiptir (Song ve diğ., 2020).

Ağ dilimlemenin radyo erişim ağındaki kullanımı inceleyen (Elayoubi ve diğ., 2019) yaptıkları çalışmada, 5G ağlarında dilimleme konseptini ve bu konseptin radyo erişim ağı seviyesinde uygulanmasıyla ilgili zorlukları ve araştırma problemlerini incelemektedir. Makalenin temel amacı, mobil ağ operatörlerinin, dikey sektörlerin ihtiyaçlarını karşılayabilmek için RAN seviyesinde dilimleme konseptini nasıl uygulayabileceklerine dair olası seçenekleri belirlemektir. Çalışma, RAN'da dilimleme granülerliğini ve dilimlerin nasıl tanımlanabileceğini tartışarak başlar. Ardından, 5G yeni radyo özelliklerinin dilimleme uygulamasını kolaylaştırmak için nasıl kullanılabileceği ve farklı dilim türleri için teknoloji ve RAN mimarisi açısından tipik yapılandırmaları sunar. Ayrıca, aynı spektrum bandını paylaşan dilimler arasında kaynak tahsisi problemleri gibi RAN dilimlemesinin ana zorlukları ele alınır. Çalışma, ağın üçüncü taraflara açıklığı ve çok kiracılı dilimleme uygulaması konularını da inceleyerek, bu durumun dikey oyuncuların kendi altyapılarını dağıtmak yerine operatörlerin ağlarını kullanma yönündeki teşviklerini nasıl artırabileceğini tartışmaktadır.

Farklı kullanım senaryoları için ağ dilimlemenin, radyo erişim ağındaki performans etkisi farklı açılardan ele alınmıştır (Silva ve diğ., 2016). Endüstriyel uygulamalar açısından gecikme ve verim önemli performans metrikleri olarak kabul edilmektedir. Yapılan bir çalışmada (Garcia-Morales ve diğ., 2019), gecikme duyarlı sistemler ağ dilimleme açısından incelenmiştir. Diğer bir çalışmada (Ojaghi ve diğ., 2022), servis farkında radyo erişim ağ dilimleri oluşturularak kullanıcıların servis kalitesinin arttırılması hedeflenmektedir.

Uç bilişim uygulamalarını içeren bir çalışmada (Vo ve diğ., 2018), uç bilişim uygulamaların ağ dilimlerine göre kaynak tahsisini incelemektedir. Dinamik kaynak yönetim mekanizmaları kullanılarak kullanıcılara en iyi servis kalitesi sağlanması amaçlanmaktadır.

Ağ dilimlerinin fiziksel kaynak üzerinde dağıtımı söz konusu olduğunda, en büyük zorluklardan biri RAN ağ dilimlemedir (Guo ve Suarez, 2019). Etkinleştirilmiş ağ dilimlerini farklı gereksinimlerini karşılamak için yapılan bir çalışmada (Bakri ve diğ., 2021), ağ kaynaklarının dinamik bir şekilde kullanarak ağ performansını iyileştirmeyi ve ağ kaynaklarını esnek olarak kullanılması amaçlamaktadır. Araştırmacılar yöntem olarak,

dilim orkestratörü çalışan bir kaynak paylaşım algoritmasına dayalı, veri odaklı bir RAN ağ dilimleme mekanizması önermektedir.

5G RAN ağ dilimleme, 5G ağlarının önemli bir yeniliği olarak öne çıkmaktadır ve ağ kaynaklarının sanal olarak ayrılması anlamına gelir. Bu teknoloji, çeşitli kullanıcı ve hizmet gereksinimlerine göre optimize edilmiş sanal ağ dilimlerinin oluşturulmasını sağlar (Zhang, 2019). RAN dilimleme, kaynakların daha verimli kullanılmasını, ağ esnekliğini artırmayı ve farklı hizmetlerin (örneğin, düşük gecikmeli endüstriyel uygulamalar ve yüksek bant genişlikli medya akışları) aynı fiziksel altyapı üzerinden eş zamanlı olarak desteklenmesini mümkün kılar (Kaloxylos, 2018). Yapılan bir çalışmada (Zhang ve diğ., 2017), ağ dilimleme tabanlı 5G sistemleri için mantıksal bir mimari tanıtmakta ve farklı erişim ağları arasındaki hareketliliği yönetmek için bir planın yanı sıra hem eş katmanlı girişimin hem de çapraz katmanlı girişimin dikkate alındığı ağ dilimlemeye dayalı spektrum paylaşımlı iki katmanlı sistemlerde ortak bir güç ve alt kanal tahsis şeması sunmaktadır. Yazarlar, ağ dilimleme tabanlı 5G sistemleri için mantıksal bir mimari sunmakta ve farklı erişim ağları arasındaki hareketliliği yönetmek için bir planın yanı sıra hem eş katmanlı girişimin hem de çapraz katmanlı girişimin dikkate alındığı ağ dilimlemeye dayalı spektrum paylaşımlı iki katmanlı sistemlerde ortak bir güç ve alt kanal tahsis şeması sunmaktadır.

5G ağları için ağ dilimleme teknolojisini ve bu teknolojinin getirdiği fırsatlarla ilgili yapılan çalışmada (Li ve diğ., 2017), karşılaşılan zorlukları ele alıyor. 5G ağlarının, farklı kullanım senaryolarına göre birden fazla sanal ağ oluşturulmasına olanak tanıyan bir hizmet olarak ağ (NaaS) modeli sunduğunu vurguluyor. Ağ dilimleme, hizmet sağlayıcıların farklı hizmet gereksinimlerini karşılamak için uygulamalarını esnek ve hızlı bir şekilde dağıtmalarını sağlar.

Makale, ağ dilimlemenin 5G ağları için neden gerekli olduğunu ve bu teknolojinin nasıl uygulanabileceğini tartışıyor. 5G ağlarının, çeşitli performans gereksinimlerini (yüksek hız, düşük gecikme, yüksek güvenilirlik vb.) destekleyebilmesi için ağ dilimlemenin önemli bir rol oynayacağını belirtir. Yazıda, ağ dilimlemenin SDN ve NFV gibi teknolojilerle nasıl entegre edileceği ve bu entegrasyonun sağlayacağı avantajlar ele alınmıştır. Ayrıca, ağ dilimlemenin karmaşıklığını yönetmek için otomatik yönetim şemalarının tasarlanması gerektiği vurgulanmaktadır. Makale, 5G ağ dilimleme için üç

katmanlı bir çerçeve öneriyor ve bu çerçevenin çeşitli ağ uygulamalarının tek bir altyapı üzerinde esnek bir şekilde dağıtılmasını ve yönetilmesini nasıl destekleyebileceğini açıklıyor. Son olarak, gelecekteki araştırma yönleri ve mevcut endüstri çalışmalarının durumu hakkında bilgi vermektedir.

Esnek ve ölçeklenebilir ağ mimarisiyle ilgili yapılan bir çalışmada (Su ve diğ., 2017), 5G telekomünikasyon ağlarında ağ dilimleme için kaynak tahsisi konusunu ele alıyor. 5G ağlarının çeşitli gereksinimleri karşılamak için esnek, ölçeklenebilir ve dayanıklı iletişim ve ağ hizmetleri sağlaması beklenmektedir. Ağ dilimleme, farklı hizmet kalite ve servis seviyesi anlaşmaları gereksinimlerini karşılamak amacıyla özel uçtan uca mantıksal ağlar oluşturmak için umut verici bir teknoloji olarak öne çıkıyor. Bu makale, ağ dilimlemede kaynak tahsisinin yük dengeleme, kaynak kullanımı ve ağ performansı açısından oynadığı kritik rolü vurguluyor. Makale, SDN ve NFV temelinde kaynak tahsis algoritmalarının ilkelerine ve modellerine odaklanıyor. SDN ve NFV'nin ağ dilimlemedeki rollerini inceleyerek, radyo erişim ağı ve çekirdek ağ dilimleme ile ilgili kaynak türlerini ve izolasyon seviyelerini analiz etmektedir. Ayrıca, kaynak tahsis algoritmalarının matematiksel modellerini, hedeflerine göre sınıflandırarak detaylandırıyor. Çalışma, ağ dilimleme konusunda açık araştırma konularını da belirleyerek olası çözümler sunmaktadır.

Ağ dilimlemedeki yönetim ve orkestrasyon algoritmaları üzerine yapılan çalışmada (Debbabi ve diğ., 2020), dinamik ağ dilimi yönetim algoritmalar üzerine yoğunlaşmaktadır. Makalede, 5G ve sonrasındaki ağlarda ağ dilimleme konusuna odaklanılmaktadır. Makale, ağ dilimlemenin algoritmik ve modelleme yönlerini detaylı bir şekilde ele alır. Özellikle, ağ dilimleme mimarisinin nasıl yapılandırıldığı, dilimlerin yönetimi ve orkestrasyonu için kullanılan yaklaşımlar ve algoritmalar üzerinde durulmaktadır (Jiang ve diğ., 2016). Ayrıca, bu teknolojinin karşılaştığı zorluklar, mevcut çözümler ve gelecekteki araştırma yönleri de tartışılmaktadır. Bu çalışma, ağ dilimleme konusunda derinlemesine bir analiz sunarak, bu alandaki bilgi birikimini özetlemekte ve gelecekteki çalışmalara ışık tutmaktadır. Bu, 5G ağlarının daha etkili bir şekilde yönetilmesi ve optimize edilmesi için önemli bir kaynaktır. Yapılan diğer bir çalışmada (Maule ve diğ., 2021), ağ dilimlemenin hayata geçmesinin en önemli basamaklarından biri olarak yönetim ve orkestrasyon olduğu vurgulanmaktadır.

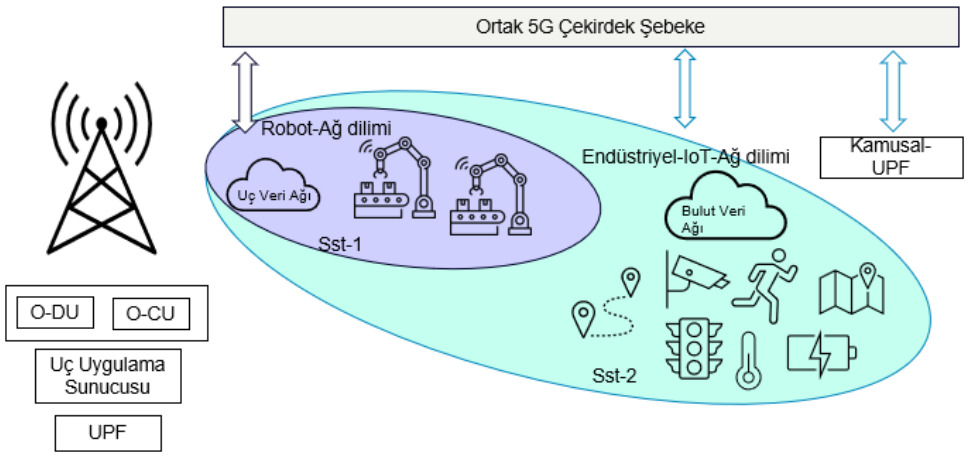
Yapılan bir çalışmada (Yan ve diğ., 2019), yapay zeka tekniklerini kullanarak kaynak yönetimi için çalışmalar yapmaktadır. Makalede, 5G RAN dilimleme için "Akıllı Kaynak Zamanlaması" (Intelligent Resource Scheduling) stratejisinin geliştirilmeye çalışmışlardır. Makalede, 5G ağlarının çok çeşitli hizmet gereksinimlerini karşılamak için ağ dilimleme kullanarak farklı dilimlere kaynak tahsisinin nasıl optimize edileceğini ele alınmaktadır. Önerilen strateji, Derin Öğrenme (Deep Learning, DL) ve Pekiştirmeli Öğrenme'yi (Reinforcement Learning, RL) birlikte kullanarak, ağın büyük ve küçük zaman ölçeklerinde dinamiklerini yönetmeyi hedefleyerek, kaynakların daha verimli kullanılmasını sağlarken, dilimler arasında performans izolasyonunu da garanti etmişlerdir. Yapılan bir diğer çalışmada (Li ve diğ., 2018), yapay zeka metotlarını kullanarak ağ dilimlemesinde kaynak yönetimi için derin pekiştirmeli öğrenmenin potansiyelini incelemektedir. 5G teknolojisinin etkin hizmet sunabilmesi için ağ dilimlemesi gerekmekte olup, bu süreçte kaynak yönetimi önemli bir zorluk teşkil eder. Makale, DRL'in bu zorlukları aşmada etkili bir çözüm sunabileceğini tartışmakta ve DRL tabanlı yöntemlerin, radyo kaynaklarının dilimlenmesi ve yönetilmesi gibi kritik alanlarda nasıl uygulanabileceğini ele almaktadır. Bu sayede, ağ dilimlemesi daha verimli ve esnek hale getirilebilir. Literatürdeki benzer diğer bir çalışma (Bin ve diğ., 2020), yapay zeka kullanılarak radyo kaynaklarının kullanıcı ihtiyaçlarına göre dinamik olarak atanması ele almaktadır.

Literatürde, RAN ağ dilimlemenin performans iyileştirmeleri, güvenlik endişeleri ve uygulama senaryoları gibi konulara da odaklanılmaktadır. Ayrıca, makine öğrenimi ve yapay zeka tekniklerinin RAN ağ dilimlemede etkin yönetim ve optimizasyon sağlamak için nasıl kullanılabileceği de sıkça incelenen konular arasındadır. Bu teknolojinin, telekomünikasyon endüstrisinde dijital dönüşümü hızlandırarak yeni iş modelleri ve hizmet yenilikleri sunma potansiyeli üzerinde durulmaktadır.

3. TEORİK TEMELLER VE TEKNİK ARKA PLAN

3.1. Genel Ağ Dilimleme Mimarisi, Faydalar ve Zorluklar

Uçtan uca 5G ağ dilimleme, 5G ağının çeşitli bileşenlerinin (erişim ağı, taşıma ağı, çekirdek ağ ve hizmet platformları) sanal dilimler halinde organize edilmesi ve yönetilmesi sürecidir. Bu mimari, farklı hizmet ve uygulama gereksinimlerine göre optimize edilmiş, izole edilmiş ve özelleştirilmiş ağ dilimlerinin oluşturulmasına olanak tanır. Şekil 3.1'de halka açık bir ağda, ağ dilimleme özelliğini kullanarak fabrika için oluşturulan özel ağ topolojisi gösterilmektedir.



Şekil 3.1. Halka açık ağda, ağ dilimleme ile fabrikaya özel ağ oluşturulması

5G özel ağları fabrikalar için düşük gecikme süresi, yüksek güvenilirlik, gelişmiş güvenlik ve verimlilik gibi birçok avantaj sunar. Bu teknolojiler, fabrikaların operasyonlarını optimize etmelerine, maliyetleri düşürmelerine ve yeni teknolojilere daha kolay uyum sağlamalarına olanak tanır. Ağ dilimleme kullanılarak oluşturulan özel ağlar düşük gecikme süresi sağlayarak endüstriyel otomasyon sistemlerinin daha hızlı ve hassas bir şekilde çalışmasını sağlar. Bu, robotik sistemlerin ve üretim makinelerinin daha senkronize ve etkili çalışmasına yardımcı olur. Aynı zamanda bu özel ağlar kullanılarak süreçlerin anlık olarak izlenmesini ve kontrol edilmesini sağlanır. Bu, üretim sürecinde daha hızlı müdahaleler ve kararlar alınmasına yani gerçek zamanlı çalışmasına yardımcı olur.

Güvenlik açısında ele alırsak, fabrikalarda kritik uygulamalar için ağ izolasyonu sağlayarak, diğer ağ faaliyetlerinin bu uygulamaları etkilemesini önler. Bu, üretim sürecindeki kesintileri azaltır. 5G özel ağları, yüksek güvenilirlik ve sürekli bağlantı sağlar. Bu, üretim hattında kesintilerin minimuma indirilmesini ve operasyonların kesintisiz bir şekilde sürdürülmesini sağlar.

Kaynak yönetimi açısında da kaynakların fabrikadaki cihazlar için optimize edilmesi ve ihtiyaç durumunda dinamik ölçeklendirilmesine olanak sağlar. Bu durum bant genişliği ve diğer ağ kaynaklarının daha verimli kullanılmasını sağlar. Böylece fabrikalar için istenen servis kalitesini daha izole bir şekilde garanti etmiş olur. Böylece fabrikanın genel üretkenliğini artırılmış olur.

Ağ dilimleme birden fazla 5G etkileştiricisinin teknolojinin bir araya gelmesiyle hayata geçebilir. Bu teknoloji bileşenler başlıca aşağıdaki gibi sıralanabilir.

1. Sanallaştırma: Ağ kaynaklarının sanallaştırılması, fiziksel altyapının sanal dilimlere bölünmesini sağlar. Bu, ağın farklı bölümlerinin birbirinden bağımsız olarak çalışmasına olanak tanır.
2. Yönetim ve Orkestrasyon: Ağ dilimlerinin dinamik olarak yönetilmesi ve orkestrasyonu, dilimlerin gereksinimlere göre ayarlanmasını sağlar. Bu, ağ operatörlerinin hizmet kalitesini optimize etmesine ve kaynakları verimli bir şekilde kullanmasına yardımcı olur.
3. Güvenlik ve İzolasyon: Her ağ dilimi, diğer dilimlerden izole edilmiştir ve belirli güvenlik politikaları ile korunur. Bu, bir dilimdeki güvenlik ihlalinin diğer dilimleri etkilemesini engeller.

Ağ dilimlemenin getirdiği önemli avantajlar ve hayata geçmesinde karşılaşılabilecek zorluklar sırasıyla aşağıdaki gibi sıralanabilir.

Avantajlar;

- Esneklik: Farklı hizmet gereksinimlerine uygun ağ dilimleri oluşturulabilir. Bu, ağın çeşitli uygulama senaryolarına hızlı ve etkin bir şekilde uyum sağlamasını mümkün kılar.

- Verimlilik: Ağ kaynaklarının optimize edilmesi, daha iyi performans ve düşük maliyet sağlar. Kaynakların verimli kullanılması, ağ operatörlerinin operasyonel maliyetlerini düşürür.
- Güvenlik ve İzolasyon: Her dilim, belirli bir hizmet için güvenli ve izole edilmiş bir ortam sunar. Bu, ağın güvenlik seviyesini artırır ve hizmet sürekliliğini sağlar.

Zorluklar;

- Yönetim ve Orkestrasyon: Ağ dilimlerinin dinamik yönetimi ve orkestrasyonu karmaşık olabilir. Bu, gelişmiş yönetim araçları ve yetenekli personel gerektirir.
- Standartlaşma: Farklı üreticilerin cihazları ve ağ bileşenleri arasında uyumluluk sorunları olabilir. Bu, ağın farklı bileşenlerinin entegrasyonunu zorlaştırabilir.
- Kaynak Tahsisi: Dinamik olarak değişen gereksinimlere göre kaynakların verimli tahsisi zor olabilir. Bu, ağ performansını olumsuz etkileyebilir ve hizmet kalitesini düşürebilir.

5G ağ dilimleme, ağ operatörlerine ve hizmet sağlayıcılarına büyük esneklik ve verimlilik sunar. Ancak, bu teknolojinin başarılı bir şekilde uygulanabilmesi için yönetim, güvenlik ve kaynak tahsisi gibi zorlukların dikkatlice ele alınması gerekmektedir. Bu şekilde, 5G ağlarının potansiyelinden tam anlamıyla yararlanılabilir ve çeşitli sektörlerde inovasyon teşvik edilebilir.

3.2. Ağ Dilimleme Kullanım Senaryoları

5G ağ dilimleme, fiziksel bir ağ altyapısının sanal olarak bölümlere ayrılarak her bölümün (dilim) belirli bir hizmet veya uygulama gereksinimlerine göre optimize edilmesi anlamına gelir. Bu teknoloji, farklı hizmetlerin özel gereksinimlerini karşılamak için esneklik sağlar ve bu da çeşitli kullanım senaryolarında büyük avantajlar sunar.

3.2.1. Gelişmiş Mobil Geniş Bant Uygulamaları

Gelişmiş Mobil Geniş Bant, yüksek veri hızı ve geniş bant genişliği gerektiren uygulamalar için tasarlanmış bir dilimleme türüdür. Bu senaryo, 4K/8K video akışı, sanal gerçeklik (VR) ve artırılmış gerçeklik (AR) uygulamaları gibi yoğun veri tüketimi

gerektiren alanlarda kullanılır. Ayrıca, yoğun kentsel alanlarda yüksek hızlı internet erişimi sağlayarak kullanıcı deneyimini artırır.

3.2.2. Ultra Güvenilir ve Düşük Gecikmeli İletişim Uygulamaları

Ultra Güvenilir ve Düşük Gecikmeli İletişim, düşük gecikme süresi ve yüksek güvenilirlik gerektiren uygulamalar için optimize edilmiştir. Otonom araçlar, endüstriyel otomasyon, uzaktan cerrahi ve akıllı ulaşım sistemleri gibi kritik uygulamalarda kullanılır. Bu senaryoda, milisaniye seviyesinde gecikme ve sürekli güvenilir bağlantılar sağlanır.

3.2.3. Toplu Makine Tipi İletişim Uygulamaları

Masif Makine Tipi İletişim, büyük ölçekte cihaz bağlantısı ve düşük enerji tüketimi gerektiren uygulamalar için tasarlanmıştır. Nesnelerin İnterneti (IoT), akıllı şehirler, akıllı tarım ve çevre izleme gibi uygulamalarda kullanılır. Bu senaryo, geniş kapsama alanı ve çok sayıda cihazın eşzamanlı olarak bağlanabilmesi için optimize edilmiştir.

3.2.4. Özel Ağlar ve Endüstriyel Uygulamalar

Özel ağlar ve endüstriyel uygulamalar için ağ dilimleme, yüksek güvenlik, özel yapılandırma ve özel bant genişliği gereksinimlerini karşılar. Fabrika otomasyonu, özel işyeri ağları ve enerji sektörü uygulamaları gibi alanlarda kullanılır. Bu senaryo, belirli endüstriyel ihtiyaçlara yönelik özelleştirilmiş ağ çözümleri sunar.

3.2.5. Kritik Altyapı ve Kamu Güvenliği Uygulamaları

Kritik altyapı ve kamu güvenliği uygulamaları, kesintisiz hizmet, yüksek güvenilirlik ve öncelikli erişim gerektirir. Acil durum iletişimi, kamu güvenliği ağları ve kritik altyapı izleme ve kontrol uygulamalarında kullanılır. Bu senaryo, yüksek güvenilirlik ve kesintisiz bağlantı sağlamak için tasarlanmıştır.

3.2.6. Eğlence ve Medya Uygulamaları

Eğlence ve medya uygulamaları, yüksek bant genişliği ve düşük gecikme gerektirir. Canlı yayınlar, bulut oyunları ve interaktif medya içerikleri gibi alanlarda kullanılır. Bu

senaryo, kullanıcı deneyimini artırmak için optimize edilmiş yüksek hızlı bağlantılar sağlar.

3.3. Verim ve Gecikme Kavramları

5G ağlarında verimlilik (throughput) ve gecikme (latency), kullanıcı deneyimi ve hizmet kalitesi açısından kritik öneme sahiptir. Radyo erişim ağı tarafında bu iki parametrenin etkileri ve yönetimi, 5G teknolojisinin temel özelliklerini ve hedeflerini gerçekleştirmek için büyük önem taşır.

3.3.1. Verimlilik

Verimlilik, bir ağın belirli bir zaman diliminde iletebildiği veri miktarını ifade eder. 5G RAN tarafında verimliliği artırmak için çeşitli teknolojiler ve teknikler kullanılır:

- Geniş Bant Genişliği**:** 5G, 4G'ye kıyasla çok daha geniş frekans spektrumlarına erişim sağlar. Özellikle milimetrik dalga (mmWave) bantları, yüksek verimlilik elde etmek için kullanılır. Bu geniş bant genişlikleri, daha yüksek veri hızlarına olanak tanır.
- MIMO: Çoklu anten teknolojileri, aynı anda birden fazla veri akışını ileterek verimliliği artırır. Massive MIMO, 5G'de kullanılan en ileri teknolojilerden biridir ve daha fazla veri akışının aynı anda iletilmesini sağlar.
- Gelişmiş Modülasyon Teknikleri: Yüksek verimlilik sağlamak için QAM (Quadrature Amplitude Modulation) gibi gelişmiş modülasyon teknikleri kullanılır. Bu teknikler, daha yüksek veri hızlarını mümkün kılar.
- Küçük Hücreler ve Heterojen Ağlar: 5G ağlarında, makro hücrelere ek olarak mikro, pico ve femto hücreler kullanılarak hücre yoğunluğu artırılır. Bu, daha fazla kullanıcıya hizmet verilmesini sağlar ve verimliliği artırır.

3.3.2. Gecikme

Gecikme, bir veri paketinin kaynak ile hedef arasında geçirdiği süreyi ifade eder. 5G RAN tarafında düşük gecikme sağlamak için çeşitli teknikler uygulanır:

- Uç Bilişim (Edge Computing): Verilerin merkezi veri merkezleri yerine ağın uç noktalarında işlenmesi, gecikmeyi önemli ölçüde azaltır. Bu mimari, kullanıcıya daha yakın noktalarda veri işlemeyi mümkün kılar ve gecikmeyi minimize eder.
- Yeni RAN Mimarileri: 5G RAN, daha kısa ve hızlı veri yolları kullanarak gecikmeyi azaltır. Bu, özellikle URLLC uygulamaları için kritik öneme sahiptir.
- TDD (Time Division Duplex) ve FDD (Frequency Division Duplex): Zaman ve frekans tabanlı çift yönlü iletişim yöntemleri, veri iletiminin daha hızlı ve verimli bir şekilde yapılmasını sağlar. TDD ve FDD, uygun senaryolara göre kullanılarak gecikmenin minimize edilmesine katkıda bulunur.
- Yeni Çerçeve Yapıları**:** 5G, daha kısa çerçeve sürelerine (frame duration) sahiptir, bu da veri iletim süresini kısaltır ve gecikmeyi azaltır. Bu kısa çerçeve yapıları, hızlı veri iletimi ve işlem sürelerini mümkün kılar. Özellikle URLLC uygulamalarında oldukça kritik öneme sahiptir.

3.3.3. Radyo Erişim Ağında Verimlilik ve Gecikmenin Yönetimi

Verimlilik ve gecikme, 5G RAN tarafında dikkatle yönetilmesi gereken iki önemli parametredir. Bu yönetim, çeşitli algoritmalar ve protokoller aracılığıyla gerçekleştirilir:

- Kaynak Planlama ve Yönetim: Dinamik kaynak planlama algoritmaları, kullanıcı taleplerine göre kaynakları optimize eder. Bu hem verimliliği artırır hem de gecikmeyi azaltır.
- Hızlı Handover Mekanizmaları: Kullanıcıların bir hücreden diğerine geçişi (handover) sırasında kesintisiz hizmet sağlanması, gecikmeyi minimize eder ve verimliliği korur.
- Adaptif Modülasyon ve Kodlama: Adaptif modülasyon ve kodlama teknikleri, kanal koşullarına göre veri iletim hızını ve hata düzeltme kapasitesini ayarlar. Bu hem verimliliği hem de güvenilirliği artırır.
- QoS Yönetimi: Farklı hizmetlerin farklı gecikme ve verimlilik gereksinimleri vardır. QoS yönetimi, bu gereksinimlerin karşılanmasını sağlar ve hizmet kalitesini optimize eder.

5G RAN tarafında verimlilik ve gecikmenin yönetimi, 5G teknolojisinin sunduğu yüksek performans ve düşük gecikme hedeflerine ulaşmak için kritik öneme sahiptir. Geniş bant genişlikleri, MIMO teknolojileri, gelişmiş modülasyon teknikleri, uç bilişim, yeni RAN

mimarileri ve dinamik kaynak yönetimi gibi teknikler, bu hedeflere ulaşılmasını sağlar. Etkili yönetim ve orkestrasyon mekanizmaları, ağın verimliliğini artırırken gecikmeyi minimize eder ve 5G'nin sunduğu potansiyelin tam anlamıyla gerçekleştirilmesini mümkün kılar. Tablo 3.1'de verim ve gecikmenin kablosuz ağlarda yönetimi ve optimizasyon teknikleri gösterilmektedir.

Tablo 3.1. Verim ve gecikmenin yönetimi ve optimizasyon noktaları

Kriter	**Etki**	**Yönetim ve Optimizasyon Teknikleri**
Verimlilik	Yüksek Verimlilik Sağlama	Geniş Bant Genişliği: 5G'nin geniş frekans spektrumları kullanması.
	- Daha yüksek veri hızları.	MIMO: Çoklu anten teknolojileri ile aynı anda birden fazla veri akışı.
	- Kullanıcı başına daha fazla veri aktarımı.	Gelişmiş Modülasyon Teknikleri: QAM gibi tekniklerle yüksek veri hızları.
	- Ağ kaynaklarının etkin kullanımı.	Küçük Hücreler ve Heterojen Ağlar: Hücre yoğunluğunu artırarak daha fazla kullanıcıya hizmet.
Gecikme	Düşük Gecikme Sağlama	Uç Bilişim: Verilerin merkezi yerine uç noktalarda işlenmesi.
	- Gerçek zamanlı uygulamalarda iyileşme.	Yeni RAN Mimarileri: Kısa ve hızlı veri yolları ile düşük gecikme.
	- Kullanıcı deneyiminin iyileştirilmesi.	TDD ve FDD: Zaman ve frekans tabanlı çift yönlü iletişim yöntemleri.
	- Özellikle URLLC uygulamalarında kritik.	Yeni Çerçeve Yapıları: Kısa çerçeve süreleri ile hızlı veri iletimi.
Verimlilik ve Gecikme Yönetimi	Dinamik ve Esnek Kaynak Yönetimi	Kaynak Planlama ve Yönetim: Dinamik kaynak planlama algoritmaları ile kaynak optimizasyonu.
	- Ağın performansını optimize etme.	Hızlı Handover Mekanizmaları: Kesintisiz hizmet sağlama.
	- Kaynakların anlık ihtiyaçlara göre tahsisi	Adaptif Modülasyon ve Kodlama**:** Kanal koşullarına göre veri iletim hızını ve hata düzeltme kapasitesini ayarlama.
	- Performans ve Kalite Güvencesi	QoS Yönetimi: Farklı hizmetlerin gereksinimlerine göre hizmet kalitesi yönetimi.

3.4. Ağ Dilimleme Etkileştirici Teknolojileri

Ağ dilimleme, bir ağın sanal olarak bölümlere ayrılmasını sağlar. Her dilim, belirli performans, güvenlik ve hizmet kalitesi gereksinimlerini karşılayacak şekilde yapılandırılabilir. Bu sanal dilimler, aynı fiziksel altyapı üzerinde çalışırken, birbirinden tamamen izole edilmiş ve bağımsız olarak yönetilebilir. Bu, ağ operatörlerinin çeşitli uygulama ve hizmet türleri için özelleştirilmiş ağlar sunmasını mümkün kılar.

Örneğin, bir dilim yüksek bant genişliği gerektiren video akışı için optimize edilirken, başka bir dilim düşük gecikme süresi gerektiren endüstriyel otomasyon için yapılandırılabilir. Aynı ağ altyapısı üzerinde farklı dilimlerin bulunması, kaynakların daha verimli kullanılmasını ve farklı kullanıcı gereksinimlerinin aynı anda karşılanmasını sağlar.

3.4.1. Ağ Fonksiyonlarının Sanallaştırılması

NFV, ağ işlevlerinin sanallaştırılması anlamına gelir ve geleneksel ağ donanım bileşenlerinin yerini sanal yazılım tabanlı çözümlerle değiştiren bir teknoloji olarak öne çıkar. Bu teknoloji, 5G ağlarının daha esnek, ölçeklenebilir ve maliyet etkin bir şekilde yönetilmesine olanak tanır. NFV, genel amaçlı sunucular üzerinde çalışan sanal ağ işlevleri (VNFs) kullanarak, ağın fiziksel donanımdan bağımsız hale gelmesini sağlar. Bu dönüşüm, ağların dinamik olarak yapılandırılmasını ve yönetilmesini kolaylaştırır.

3.4.1.1. Esneklik ve Ölçeklenebilirlik

NFV'nin 5G ağlarına kazandırdığı en büyük avantajlardan biri esneklik ve ölçeklenebilirliktir. Geleneksel ağlarda yeni bir donanım eklemek veya mevcut donanımı güncellemek uzun sürebilirken, NFV ile yeni ağ işlevleri hızlı bir şekilde devreye alınabilir veya mevcut işlevler ihtiyaçlara göre ölçeklendirilebilir. Bu, operatörlerin kullanıcı talebine göre ağ kapasitesini dinamik olarak ayarlamalarına olanak tanır ve hizmet kalitesini artırır.

3.4.1.2. Maliyet Tasarrufu

NFV, maliyet etkin bir çözüm sunar. Geleneksel ağ donanımları yüksek maliyetlerle temin edilip yönetilirken, NFV genel amaçlı sunucular üzerinde çalışarak donanım

maliyetlerini düşürür. Ayrıca, işletme ve bakım maliyetleri de azalır. Sanallaştırma sayesinde fiziksel donanım gereksinimi azalır ve bu da enerji tüketimi ve alan tasarrufu sağlar.

3.4.1.3. Hızlı Hizmet Sunumu

NFV, yeni hizmetlerin ve ağ işlevlerinin hızlı bir şekilde piyasaya sürülmesine imkan tanır. Yazılım tabanlı çözümler, geleneksel donanım tabanlı çözümlerden daha hızlı ve kolay bir şekilde güncellenebilir. Bu, operatörlerin rekabetçi bir pazarda yeni hizmetleri daha hızlı bir şekilde sunmalarını sağlar.

3.4.1.4. Geliştirilmiş Ağ Yönetimi

NFV, ağ yönetimini ve otomasyonunu iyileştirir. Merkezi bir yönetim platformu aracılığıyla sanal ağ işlevlerinin izlenmesi ve yönetilmesi mümkündür. Bu da ağın genel performansını artırır ve olası sorunların daha hızlı tespit edilip çözülmesini sağlar. Ayrıca, otomasyon sayesinde insan müdahalesine duyulan ihtiyaç azalır ve hata oranları düşer.

3.4.1.5. İnovasyon ve Gelişmiş Hizmetler

NFV, yenilikçiliği teşvik eder ve gelişmiş hizmetlerin sunulmasına olanak tanır. 5G'nin düşük gecikme süreleri ve yüksek bant genişlikleri, NFV ile birleştiğinde, operatörlerin daha yenilikçi çözümler geliştirmesine olanak tanır. Örneğin, sanal gerçeklik (VR) ve artırılmış gerçeklik (AR) gibi yeni nesil uygulamalar, NFV sayesinde daha etkin bir şekilde sunulabilir.

Sonuç olarak, NFV, 5G ağlarının etkinliğini ve verimliliğini artıran kritik bir teknoloji olarak öne çıkmaktadır. NFV'nin sunduğu esneklik, ölçeklenebilirlik, maliyet tasarrufu, hızlı hizmet sunumu, gelişmiş ağ yönetimi ve inovasyon olanakları, 5G ağlarının potansiyelini en üst düzeye çıkarmaktadır. Bu nedenle, NFV'nin 5G ağlarında uygulanması, telekomünikasyon sektöründe büyük bir dönüşüm yaratmakta ve geleceğin ağ altyapısının temel taşlarından biri olarak kabul edilmektedir.

3.4.2. Yazılım Tanımlı Ağ

SDN, ağ yönetimi ve kontrolünü yazılım tabanlı bir yaklaşımla yeniden tanımlayan yenilikçi bir teknolojidir. Geleneksel ağ mimarilerinde, ağ donanımı ve kontrol düzlemleri sıkı bir şekilde entegre edilmiştir. SDN, bu mimariyi ayırarak kontrol düzlemini merkezi bir yazılım tabanlı kontrolör aracılığıyla yönetir ve ağ donanımını daha esnek ve programlanabilir hale getirir. Bu yaklaşım, 5G ağlarının dinamik ve taleplere uygun bir şekilde yönetilmesini sağlar.

3.4.2.1. Esneklik ve Dinamik Yönetim

SDN'nin getirdiği en büyük avantajlardan biri, ağın dinamik olarak yapılandırılabilmesidir. SDN kontrolörleri, ağın genel görünümüne sahip olup, trafik akışlarını gerçek zamanlı olarak yönetebilir ve optimize edebilir. Bu sayede, 5G ağları, kullanıcı taleplerine ve ağ koşullarına hızlı bir şekilde yanıt verebilir, bu da hizmet kalitesini artırır ve gecikmeleri minimize eder.

3.4.2.2. Merkezi Yönetim ve Görünürlük

SDN, merkezi bir kontrol düzlemi sunarak ağın daha etkili bir şekilde yönetilmesini sağlar. Bu merkezi yönetim modeli, ağ operatörlerine ağın tamamını tek bir noktadan izleme ve kontrol etme olanağı sunar. Bu sayede, ağda meydana gelen sorunlar daha hızlı tespit edilip giderilebilir ve genel ağ performansı artırılabilir. Ayrıca, merkezi yönetim, ağ güvenliğini artırır ve politikaların tutarlı bir şekilde uygulanmasını sağlar.

3.4.2.3. Programlanabilirlik ve Otomasyon

SDN'nin temel özelliklerinden biri, ağın programlanabilir olmasıdır. Bu özellik, ağ yöneticilerinin ve operatörlerinin ağ davranışını yazılım aracılığıyla belirlemesine olanak tanır. SDN kontrolörleri, ağın farklı bölümlerine ilişkin politikaları merkezi olarak uygulayabilir ve bu da ağın otomatik olarak yönetilmesini sağlar. Bu otomasyon, insan hatasını azaltır, operasyonel verimliliği artırır ve ağın yönetim maliyetlerini düşürür.

3.4.2.4. Maliyet Tasarrufu ve Verimlilik

SDN, maliyet etkin bir ağ yönetimi sağlar. Geleneksel ağlarda, farklı ağ cihazları ve yazılımları için yüksek maliyetler söz konusu olabilirken, SDN, genel amaçlı donanım üzerinde çalışarak bu maliyetleri düşürür. Ayrıca, ağın dinamik ve programlanabilir yapısı, verimliliği artırır ve kaynak kullanımını optimize eder.

3.4.2.5. İnovasyon ve Yeni Hizmetler

SDN, yenilikçi hizmetlerin ve uygulamaların geliştirilmesini teşvik eder. 5G'nin sunduğu yüksek bant genişliği ve düşük gecikme süreleri, SDN'nin dinamik yapısıyla birleştiğinde, operatörlerin daha yenilikçi çözümler sunmasını sağlar. Örneğin, ağ dilimleme gibi ileri düzey hizmetler, SDN'nin sağladığı esneklik ve kontrol sayesinde daha etkin bir şekilde uygulanabilir.

Sonuç olarak SDN, 5G ağlarının verimliliğini ve etkinliğini artıran kritik bir teknolojidir. SDN'nin sunduğu esneklik, merkezi yönetim, programlanabilirlik, maliyet tasarrufu ve inovasyon olanakları, 5G ağlarının potansiyelini en üst düzeye çıkarır. Bu nedenle, SDN'nin 5G ağlarında uygulanması, telekomünikasyon sektöründe büyük bir dönüşüm yaratmakta ve geleceğin ağ altyapısının temel taşlarından biri olarak kabul edilmektedir.

3.4.3. Mobil Uç Bilişim

MEC, kullanıcıya yakın noktalarda bilgi işlem kaynakları sağlamak amacıyla ağ mimarisinde yapılan yenilikçi bir yaklaşımdır. MEC, verilerin ve uygulamaların merkezi veri merkezlerinden ağın uç noktalarına taşınmasını sağlar. Bu yaklaşım, 5G ağlarının sunduğu düşük gecikme süresi, yüksek bant genişliği ve yüksek veri işlem kapasitesinden tam anlamıyla faydalanılmasını mümkün kılar. MEC, 5G ağlarının performansını artırırken, yeni nesil uygulamaların ve hizmetlerin gelişimine de katkıda bulunur.

3.4.3.1. Düşük Gecikme Süresi

MEC'nin temel avantajlarından biri, düşük gecikme süresi sağlamasıdır. Verilerin ve uygulamaların kullanıcıya yakın uç noktalarda işlenmesi, verilerin merkezi sunuculara gitmesine gerek kalmadan işlenmesini sağlar. Bu, özellikle gerçek zamanlı uygulamalar (örneğin, artırılmış gerçeklik, sanal gerçeklik, otonom araçlar ve IoT cihazları) için kritik

önem taşır. Düşük gecikme süresi, kullanıcı deneyimini artırır ve uygulamaların daha hızlı ve verimli çalışmasını sağlar.

3.4.3.2. Ağ Trafiği ve Bant Genişliği Optimizasyonu

MEC, ağ trafiğini ve bant genişliği kullanımını optimize eder. Verilerin yerel olarak işlenmesi, ağın merkezi kısımlarına olan veri trafiğini azaltır. Bu, ağ üzerindeki yükü hafifletir ve genel ağ performansını artırır. Ayrıca, yerel işlem gücü sayesinde, bant genişliği yoğun uygulamaların (örneğin, video analitiği, oyun akışı) verimli bir şekilde yönetilmesine olanak tanır.

3.4.3.3. Güvenlik ve Veri Gizliliği

MEC, güvenlik ve veri gizliliği açısından da önemli avantajlar sunar. Verilerin yerel olarak işlenmesi, verilerin merkezi sunuculara iletilmesi sırasında karşılaşılabilecek güvenlik risklerini azaltır. Ayrıca, yerel veri işleme, veri gizliliğini artırır ve düzenleyici gereksinimlere daha iyi uyum sağlar. Bu, özellikle hassas verilerin işlendiği sektörler için (örneğin, sağlık, finans) büyük bir avantajdır.

3.4.3.4. Yeni Nesil Uygulamalar ve Hizmetler

MEC, yeni nesil uygulamaların ve hizmetlerin geliştirilmesini teşvik eder. 5G'nin sunduğu düşük gecikme ve yüksek bant genişliği özellikleri ile birleştiğinde, MEC, yenilikçi çözümlerin ve uygulamaların ortaya çıkmasına olanak tanır. Örneğin, akıllı şehirler, endüstri 4.0 uygulamaları, otonom araçlar ve gelişmiş IoT çözümleri, MEC sayesinde daha etkin ve verimli bir şekilde uygulanabilir.

3.4.3.5. Dağıtık ve Ölçeklenebilir Mimari

MEC, dağıtık ve ölçeklenebilir bir mimari sunar. Yerel veri merkezleri ve uç nokta sunucuları, ağın farklı bölgelerinde dağıtılarak ağın genel performansını artırır ve ölçeklenebilirlik sağlar. Bu, ağ operatörlerinin ve hizmet sağlayıcılarının kullanıcı taleplerine daha hızlı ve etkin bir şekilde yanıt vermesine olanak tanır.

Sonuç olarak MEC, 5G ağlarının potansiyelini en üst düzeye çıkaran ve yeni nesil uygulamalar için kritik bir teknoloji olarak öne çıkmaktadır. MEC'nin sağladığı düşük

gecikme süresi, ağ trafiği optimizasyonu, güvenlik ve veri gizliliği avantajları, 5G ağlarının performansını ve verimliliğini artırmaktadır. Bu nedenle, MEC'nin 5G ağlarında uygulanması, telekomünikasyon sektöründe büyük bir dönüşüm yaratmakta ve geleceğin ağ altyapısının temel taşlarından biri olarak kabul edilmektedir.

3.4.4. Yönetim ve Orkestrasyon

5G ağlarında çeşitli kullanım senaryoları ve hizmet gereksinimlerine göre özelleştirilmiş ağ dilimlerinin dinamik olarak oluşturulmasını, yönetilmesini ve sonlandırılmasını sağlayan kritik bir süreçtir. Bu orkestrasyon süreci, ağ dilimlerinin performansını ve verimliliğini optimize etmek amacıyla birçok teknolojiyi ve metodolojiyi bir araya getirir. Orkestrasyon, ağ dilimlerinin hizmet düzeyi anlaşmalarına (SLAs) uygun şekilde çalışmasını sağlar ve ağ kaynaklarının etkin kullanımını garanti eder.

3.4.4.1. Özelleştirilmiş Hizmet Sağlama

Yönetim ve orkestrasyon, her bir ağ diliminin belirli bir kullanım senaryosuna veya hizmet gereksinimine göre optimize edilmesini sağlar. Bu sayede, farklı sektörlerdeki kullanıcılar (örneğin, sağlık, otomotiv, endüstriyel otomasyon) için özel olarak tasarlanmış hizmetler sunulabilir. Her dilim, ihtiyaç duyduğu kaynaklara ve kalite gereksinimlerine göre yapılandırılabilir ve yönetilebilir.

3.4.4.2. Dinamik Kaynak Yönetimi

Ağ dilimlemenin en büyük avantajlarından biri, kaynakların dinamik olarak tahsis edilmesi ve optimize edilmesidir. Yönetim ve orkestrasyon mekanizmaları, ağ trafiğini sürekli olarak izleyerek ve analiz ederek, kaynakları anlık ihtiyaçlara göre yeniden tahsis edebilir. Bu, ağın performansını artırır ve verimliliği maksimize eder.

3.4.4.3. Performans ve Kalite Güvencesi

Her ağ dilimi için belirlenen hizmet düzeyi anlaşmaları (SLAs) kapsamında, performans ve hizmet kalitesi güvencesi sağlanır. Orkestrasyon sistemleri, SLAs'a uyumu sürekli olarak izler ve gerektiğinde otomatik müdahalelerde bulunur. Bu, kullanıcı deneyimini optimize eder ve hizmet kesintilerini minimize eder.

3.4.4.4. Esneklik ve Ölçeklenebilirlik

Yönetim ve orkestrasyon, ağın esnek ve ölçeklenebilir olmasını sağlar. Yeni hizmetler eklemek veya mevcut hizmetleri genişletmek, yazılım tabanlı kontrol mekanizmaları sayesinde hızlı ve etkin bir şekilde gerçekleştirilebilir. Bu, 5G ağlarının değişen taleplere ve yeni iş modellerine hızla uyum sağlamasını mümkün kılar.

3.4.4.5. Güvenlik ve Veri Gizliliği

Ağ dilimleme yönetimi ve orkestrasyonu, güvenlik politikalarının ve veri gizliliği protokollerinin tutarlı bir şekilde uygulanmasını sağlar. Her bir ağ dilimi, belirli güvenlik gereksinimlerine göre yapılandırılabilir ve yönetilebilir. Ayrıca, merkezi yönetim, güvenlik tehditlerinin hızlı bir şekilde tespit edilmesini ve etkisiz hale getirilmesini sağlar.

3.4.4.6. Operasyonel Verimlilik ve Maliyet Tasarrufu

Yönetim ve orkestrasyon, ağ operasyonlarını otomatikleştirerek insan müdahalesini azaltır ve operasyonel verimliliği artırır. Otomasyon, ağ yönetimi süreçlerinin daha hızlı ve hatasız bir şekilde gerçekleştirilmesini sağlar. Bu da işletme maliyetlerini düşürür ve ağ yönetimindeki karmaşıklığı azaltır.

3.4.4.7. İnovasyon ve Yeni Hizmetler

Yönetim ve orkestrasyon mekanizmaları, yeni nesil hizmetlerin ve uygulamaların geliştirilmesini teşvik eder. Esnek ve programlanabilir ağ yapısı, yenilikçi çözümlerin hızlı bir şekilde hayata geçirilmesine olanak tanır. Örneğin, sanal gerçeklik, artırılmış gerçeklik ve otonom araçlar gibi ileri teknoloji uygulamaları, bu sayede daha etkin bir şekilde sunulabilir.

Ağ dilimlemede yönetim ve orkestrasyon, 5G ağlarının sunduğu potansiyeli tam anlamıyla gerçekleştirmek için kritik öneme sahiptir. Bu mekanizmalar, ağın performansını optimize eder, esneklik sağlar, güvenlik ve veri gizliliğini korur, operasyonel verimliliği artırır ve inovasyonu teşvik eder. Dolayısıyla, ağ dilimleme yönetimi ve orkestrasyonu, 5G ağlarının başarısı ve gelecekteki ağ teknolojilerinin gelişimi için vazgeçilmez bileşenlerdir.

3.5. Çekirdek Şebeke ve Ağ Dilimlemedeki Rolü

5G çekirdek şebeke (Core Network), uçtan uca ağ dilimleme sürecinin önemli bir bileşenidir. Çekirdek şebeke, kullanıcı veri trafiğinin yönlendirilmesi, işlenmesi ve hizmetlerin sunulması için kritik işlevler sağlar. Ağ dilimleme, çekirdek şebekenin farklı hizmet ve uygulama gereksinimlerine göre optimize edilmesini ve izole edilmesini mümkün kılar.

3.6. Radyo Erişim Ağı ve Ağ Dilimlemedeki Rolü

Ağ dilimleme, farklı kullanım senaryoları için özelleştirilmiş iletişim hizmetleri sunmayı amaçlar. Örneğin, bir dilim yüksek hızlı veri aktarımı için ayrılabilirken, başka bir dilim düşük gecikme süresi gerektiren uygulamalar için ayrılabilir. Ağ dilimleme ile servis sağlayıcılar, çeşitli hizmetlerin özel gereksinimlerini karşılamak için uygulamalarını ve hizmetlerini esnek ve hızlı bir şekilde dağıtabilirler. Tek bir fiziksel ağı, farklı benzersiz gereksinimlere göre özelleştirilmiş çeşitli mantıksal ağlara bölmek, bu tür farklı gereksinimleri sürdürülebilir bir şekilde karşılamak için umut verici bir yaklaşım olarak ortaya çıkmıştır.

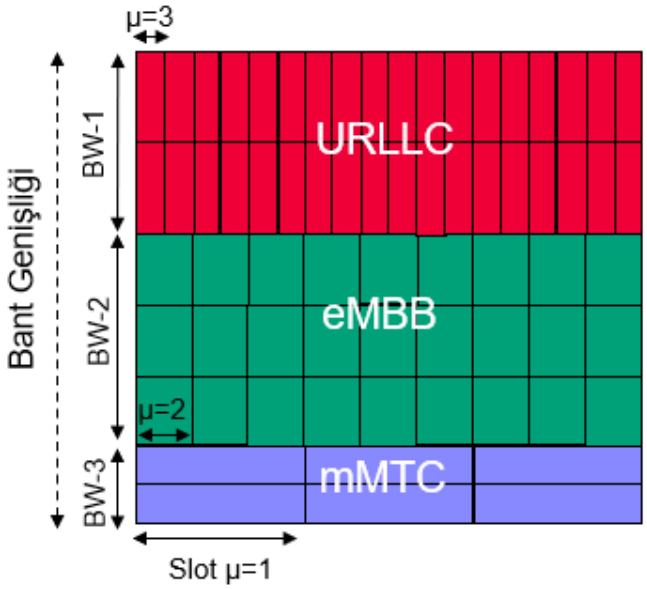
Tablo 3.2. Nümerolojiye göre 5G çerçeve yapısı

Nümeroloji	Alt taşıyıcı [kHz]	Slot [ms]
0	15	1
1	30	0.5
2	60	0.250
3	120	0.125
4	240	0.0625

Tablo 3.2'de nümerolojiye göre 3GPP standartlarında (ETSI, 2024)) tanımlanmış çerçeve yapısı alt taşıyıcı aralığı (Subcarrier Spacing, SC) ve slot süresi birlikte verilmektedir. Nümeroloji (μ), 15 KHz'den 240 KHz'e kadar farklı alt taşıyıcı aralığını gösteren 0'dan 4'e kadar olan sayılarla temsil edilmektedir. Başlangıçta (μ =0) 1 ms olan slot süresi nümeroloji arttıkça azalmaktadır.

Ağa bağlanan cihaz sayısı arttıkça farklı trafik tiplerinin farklı bant genişliği ve gecikme ihtiyacı olacağı değerlendirilmektedir. Örneğin; video oyunları daha çok bant genişliğine ihtiyaç duyarken, ses verileri daha az bant genişliğine ihtiyaç duymaktadır. Viavi (URL-

1) raporlarına göre bir 5G ağdaki cihazların %40'ı URLLC, %50'si mMTC ve %10'u eMBB ağ dilimine ihtiyaç duyacaktır. Şekil 3.2'de bu oranlar referans alınarak fiziksel kaynak bloğunun ağ dilimlerine göre paylaşımlı kullanımı gösterilmektedir.



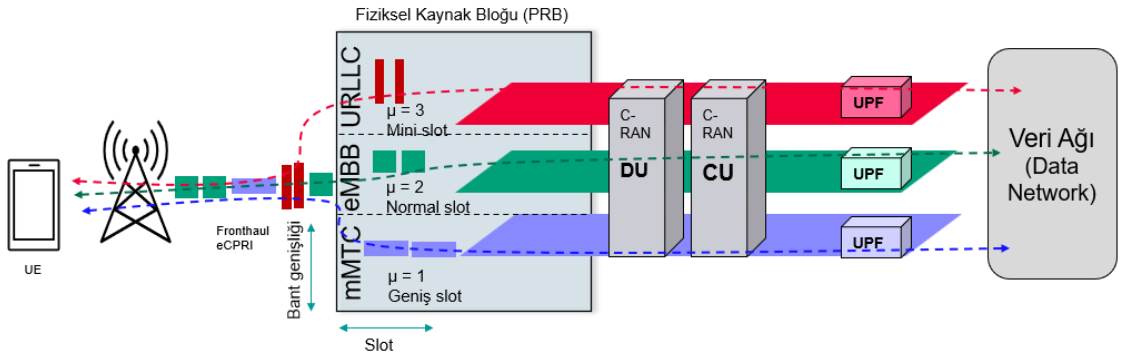
Şekil 3.2. Ağ dilimlerine göre paylaşımlı fiziksel kaynak bloğu kullanımı

Bu yüksek nümerolojilerde birim zamanda daha düşük gecikme ve daha hızlı paket işleme yapılabildiğini göstermektedir. URLLC ağ dilimi, düşük gecikme ve yüksek paket işleme gereksinimlerine uygun olarak tasarlanmalıdır. Buna bağlı olarak URLLC ağ dilimine ait uygulamalar için fiziksel kaynak tahsis edilirken yüksek nümeroloji kullanılmalıdır. Bu çalışmadaki test senaryolarına göre sırasıyla URLLC ağ dilimi için (μ = 3), mMTC için (μ =2) ve eMBB için (μ = 1) nümeroloji değerleri kullanılmıştır.

3.7. 5G RAN Ağ Dilimleme

5G'de kullanım senaryolarının çeşitliliği nedeniyle kullanıcıların baz istasyonları arasında geçiş yaparken kesintisiz veri aktarımının sağlanabilmesi için UE hareketlilik yönetim mekanizmalarının ağ dilimleme tabanlı olması gerekmektedir. Fiziksel radyo ekipmanı ile radyo ekipmanı denetleyicisi arasında noktadan noktaya bağlantı sağlamak için ağ dilimlemeyi Bulut Radyo Erişim Ağı (Cloud Radio Access Network, C-RAN), yazılım tanımlı ağ (SDN) ve ağ fonksiyonu sanallaştırma (NFV) ile entegre etmeye yönelik uygun

bir yaklaşım hâlâ mevcut değildir. Gelecekteki 5G ağlarında daha fazla ağ diliminin etkinleştirilmesi için ağ dilimleme ve diğer 5G teknolojileri arasında iş birliği gereklidir.



Şekil 3.3. Uçtan uca 5G ağ dilimleme mimarisi

Ağ dilimleme açısından referans kabul edilen uçtan uca ağ kablosuz mobil haberleşme ağı mimarisi Şekil 3.3'te gösterilmektedir. Çekirdek şebeke tarafında farklı ağ dilimlerini yönetebilmek için veri ağına çıkış noktasında her ağ dilimine özel UPF konumlandırılırken, gNB tarafında tek bir fiziksel kaynak bloğu paylaşımlı kullanılması gösterilmektedir. UE'nin gecikme ve veri transfer hız gereksinimlerinin karşılanabilmesi için gNB'deki fiziksel kaynakların URLLC, eMBB ve mMTC gibi farklı ağ dilimlerine göre dinamik olarak yönetilmesi gerekmektedir. Kullanıcı sayısının artması durumunda, paylaşımlı kaynak yönetimi için geliştirilen bu dinamik kaynak yönetim mekanizmaları karmaşıklaşarak sistemin performansını olumsuz yönde etkilenmektedir.

Şekil 3.3'te uçtan uca kullanıcı ekipmanı (UE) dağıtık birim (Distributed Unit, DU), kontrol birimi (Control Unit, CU), kullanıcı düzlemi fonksiyonu (UPF) ve veri ağını (DN) içeren genel ağ dilimleme mimarisi gösterilmektedir. 5G'de radyo erişim ağı tarafındaki esneklik düzeyi, frekans alanında farklı nümerolojilerin uygulanmasıyla elde edilebilir. Örnek olarak, ultra güvenilir ve düşük gecikmeli iletişim (URLLC) trafiği, sıkı gecikme gereksinimlerini karşılamak için kısa bir slot uzunluğu gerektirirken, gelişmiş mobil geniş bant (eMBB) kullanım senaryolarında orta büyüklükte bir slot kullanılır. Diğer kullanım senaryolarından biri olan toplu makina tipi haberleşme (mMTC) senaryolarında ise büyük slot uzunluğu kullanılmaktadır. Bu nedenle, belirli bir operasyonel bant ve dağıtım konfigürasyonu için desteklenen nümerolojiler kümesi arasında, URLLC en kısa slot

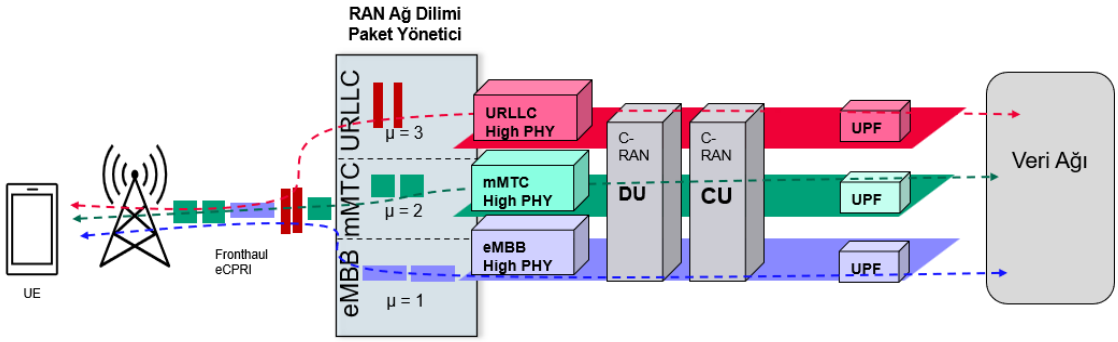
uzunluğuna sahip nümerolojiyle, eMBB orta slot uzunluğu ve mMTC ise en büyük slot uzunluğuyla ilişkili nümeroloji kullanılarak sunulabilir.

Bu çalışmada, 5G ve ötesi haberleşme sistemlerinde otonom araç, IoT ve video uygulamaları gibi farklı uygulamaların servis kalitesi sağlamak için oluşturulmuş farklı ağ dilimlerinin fiziksel kaynak bloğunu paylaşımlı kullanılması durumunda, mevcut mimaride RAN ağ dilimlemenin performansı ve uygulanabilirliği ele alınmıştır. Farklı uygulama ihtiyaçlarını karşılamak için oluşturulmuş ağ dilimlerinin, fiziksel kaynak bloğunu dinamik olarak kullanılabilmesi incelenmiştir. Simülasyon araçları kullanılarak kullanıcı sayısı, trafik tipi ve nümeroloji değişiminin fiziksel kaynak kullanımı üzerindeki etkileri gösterilmiştir. Bölüm 3'te uçtan uca ağ dilimleme ve 5G RAN ağ dilimlemin fiziksel kaynak kullanımı anlatılmaktadır. Bölüm 4'te simülasyon ortamında QoS tipi, bant genişliği ve nümerolojinin farklı ağ dilimlerine göre fiziksel kaynak bloğunun kullanımı analiz edilmektedir.

3.8. Ağ Dilimi Farklında Bulut Temelli Fiziksel Katman Mimarisi

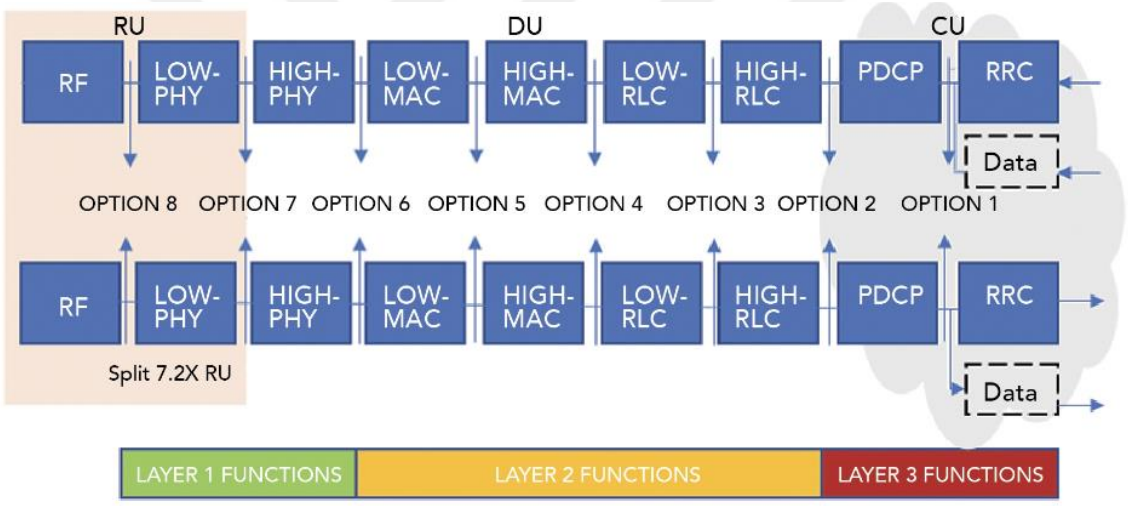
ORAN mimarisi, telekomünikasyon endüstrisinde geleneksel radyo erişim ağlarının daha esnek, uyumlu ve açık hale getirilmesini amaçlayan bir yaklaşımdır. ORAN, RAN bileşenlerinin donanım ve yazılım katmanlarında açık standartlar ve arayüzler kullanılarak birbirinden ayrılmasını sağlar. Bu sayede, farklı üreticilerin donanım ve yazılım çözümlerinin bir arada çalışabilmesi mümkün hale gelir.

Bu tez kapsamında önceki uçtan uca ağ dilimlemenin hayata geçebilmesi için oldukça kritik olan RAN ağ dilimleme QoS, bant genişliği ve nümeroloji açısından analiz edilmiştir. Kullanıcı sayısının ve trafik çeşitliliğinin artmasına bağlı olarak verim ve gecikmenin davranışı gösterilmiştir. Çıkan sonuca göre fiziksel katman kaynaklarının ağ dilimleri arasında paylaşımlı kullanılmasın performans problemlerini çözemediği gösterilmiştir. Bu durumda 5G ve gelecek nesil kablosuz haberleşme sistemleri için modüler bulut temelli çözümler sunan O-RAN (Açık RAN, Open RAN) standartlarındaki yaklaşımlar kullanılarak performansı iyileştirecek bulut temelli mimariler önerilmiştir. Şekil 3.4’te ağ dilimi farkında bulut temelli fiziksel katman mimarisi gösterilmektedir.



Şekil 3.4. Ağ dilimi farklında O-RAN bulut temelli fiziksel katman mimarisi

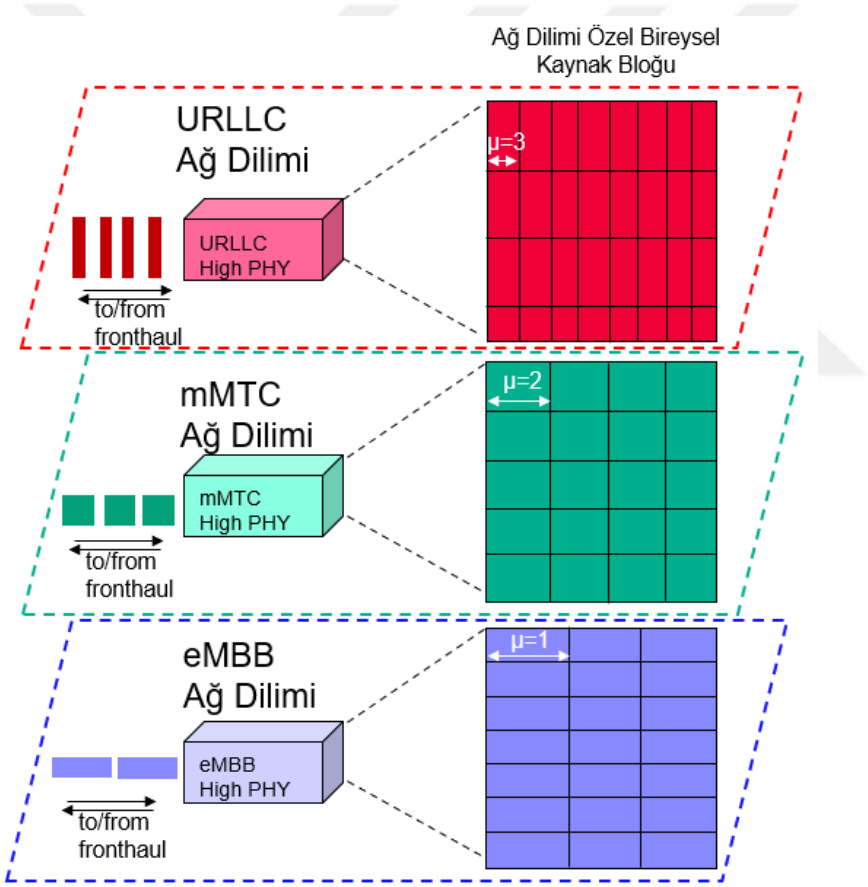
Bu yaklaşıma göre çekirdek şebeke tarafında UPF'leri ağ dilimi temelli konumladırılması gibi bulut teknolojileri kullanılarak baz istasyonu tarafında da O-RAN 7.2'ye göre her High-PHY modülünün ağ dilimi farkında olması önerilmektedir.



Şekil 3.5. 5G'de Açık RAN fonksiyonel ayrıştırma seçenekleri

Şekil 3.5'te ORAN için kullanılan mimariye göre kullanılabilecek fonksiyonel ayrıştırma seçenekleri gösterilmiştir. ORAN'nn sunduğu bu mimari sayesinde, RAN fonksiyonlarının daha esnek, ölçeklenebilir ve optimize edilebilir bir yapıda uygulanmasını sağlanır. Ayrışma seviyesinin doğru seçimi, ağın performansını, maliyetlerini ve yönetimini doğrudan etkileyen kritik bir karardır. Her bir split seçeneği, farklı kullanım senaryoları ve ağ ihtiyaçlarına göre avantajlar sunar. Bu mimarideki ayrışma 7.2 kullanılarak tasarlanan O-RAN uyumlu baz istasyonunda, RU RF ve Low PHY, DU-High-PHY, Low-MAC, High-MAC, Low-RLC, High-RLC, CU modulu

PDCP ve RRC fonksiyonel bloklarında oluşmaktadır. Paylaşımlı fiziksel kaynak kullanımını ortadan kaldırıp, her ağ dilimi için fiziksel kaynak bloğu oluşturmak içini Şekil 3.4'te gösterilen "Ağ dilimi farkında High-PHY" mimarisi önerilmiştir. Böylelikle baz istasyonun fiziksel katman tarafı sistemde oluşturulan ağ dilimlerine bağlı olarak, bulut temelli High-PHY'lar kullanılarak tasarlanmaktır. Örneğin; sistemde URLLC, mMTC ve eMBB ağ dilimleri oluşturulmuşsa, fiziksel katmanda bulut temelli URLLC-High-PHY, mMTC-High-PHY ve eMBB-High-PHY blokları oluşturulması önerilmektedir. Sistemin bulut temelli olması oluşturulan bu modüllerin dinamik olarak yönetilmesini sağlamaktadır. Her bir RAN ağ dilimine ait özel fiziksel kaynak blokları Şekil 3.6'da gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Ağ dilimlerine ayrıştırılmış bireysel fiziksel kaynak blokları

Uçtan uca ağ dilimleme mimarisinde yönetim ve orkestrasyon oldukça kritik bir rol üstlenmektedir. Ağın değişen ihtiyaçlarına uyum sağlayabilmek için sistemdeki modüllerin bulut temelli ve konteyner mimaride olması oldukça önemlidir. Bu

yaklaşımlar 5G ve ötesi kablosuz haberleşme sistemlerinde özellikle çekirdek şebeke ve iletim ağ tarafında kısmen daha kolaydır. Ancak bu çalışmanın da ana konusu olan uçtan uca ağ dilimlemeyi hayata geçirebilmek için RAN tarafının da bu teknolojilere uygun olarak tasarlanması gerekmektedir. Bu çalışmada, ORAN yaklaşımları kullanılarak ağ dilimi farklında bulut temelli fiziksel katman tasarımıyla uçtan uca ağ dilimlemenin hayata geçebileceği gösterilmiştir.

4. ARAŞTIRMA METODOLOJİSİ

4.1. Araştırma Tasarımı ve Test Senaryoları

Bu çalışmada, Şekil 3.2'de gösterildiği gibi fiziksel kaynak bloğunun ağ dilimlerine göre paylaşımlı kullanılması durumunda, RAN ağ dilimleme açısından bant genişliği kullanımının, uygulama tipi farklılığı ve nümeroloji değişiminin veri hızı ve gecikme üzerindeki etkileri incelenmiştir. Simülasyon testlerinde, açık kaynak kodlu NS-3 ağ simülatorü ve 5G test kütüphanesi olan "5G-Lena" eklentisi kullanılarak QoS, bant genişliği ve nümeroloji değişimlerinin hız ve gecikme üzerindeki etkileri incelenmiştir.

4.1.1. RAN Ağ Dilimleme – QoS İlişkisi

RAN ağ dilimleme ve QoS arasındaki ilişki, modern mobil ağların performans ve esnekliğini artıran önemli bir unsurdur. Ağ dilimleme, çeşitli hizmetlerin spesifik QoS gereksinimlerini karşılamak için ağ kaynaklarının dinamik ve verimli bir şekilde yönetilmesini sağlar. Bu ilişki, operatörlerin çeşitli uygulamaları ve hizmetleri tek bir fiziksel ağ altyapısı üzerinde sorunsuz bir şekilde sunmalarını mümkün kılar, bu da hem kullanıcılar hem de hizmet sağlayıcılar için daha iyi bir deneyim anlamına gelir.

Bu çalışmada 5G ve gelecek nesil ağlarda farklı trafik tiplerinin farklı QoS tipi ihtiyacı olduğu değerlendirilerek, uçtan uça servis kalitesi sağlanabilmesi için radyo erişim ağında yapılan QoS atamalarının ağ dilimi temelli yapılması vurgulanmıştır. Her ağ diliminin farklı trafik tipi ihtiyacını karşılamak için oluşturulan ağ dilimlerindeki QoS atamaları test edilmiştir.

4.1.2. RAN Ağ Dilimleme – Bant Genişliği İlişkisi

Bant genişliği, bir ağda veri iletimi için ayrılan kapasiteyi ifade eder ve ağ performansının iki önemli yönü olan verim ve gecikme üzerinde doğrudan etkisi vardır. Bant genişliğinin verim üzerindeki etkisine baktığımızda, verim, bir ağın belirli bir süre içinde iletebileceği veri miktarını ifade eder. Bant genişliği arttıkça, ağ daha fazla veriyi aynı anda taşıyabilir, bu da verimi artırır. Yüksek bant genişliği, daha fazla veri akışını aynı anda destekleyebilir ve bu sayede genel ağ performansı iyileşir. Örneğin, 100 Mbps bant

genişliği olan bir ağ, 10 Mbps bant genişliğine sahip bir ağdan 10 kat daha fazla veriyi aynı sürede iletebilir.

Bant genişliğinin gecikme üzerindeki etkisi ise farklıdır. Gecikme, bir veri paketinin kaynak noktadan hedefe ulaşması için geçen süreyi ifade eder. Bant genişliği doğrudan gecikmeyi etkilemez, ancak dolaylı olarak etkileyebilir. Yeterli bant genişliğine sahip olmayan bir ağda, veri paketleri sıraya girmek zorunda kalabilir, bu da gecikmeyi artırır. Bant genişliği yeterli olduğunda, veri akışı daha sorunsuz olur ve gecikme minimum seviyede tutulabilir. Ancak, düşük gecikme elde etmek için bant genişliğinin yüksek olması tek başına yeterli değildir; ağdaki yönlendiricilerin ve anahtarların verimli çalışması da önemlidir. Sonuç olarak, bant genişliği artırılarak verim artırılabilir ve gecikme sorunları hafifletilebilir. Ancak, ağ performansını optimize etmek için bant genişliği ile diğer ağ yönetimi tekniklerinin de dikkate alınması gerekir.

Bu çalışmada oluşturulan farklı ağ dilimlerinin ortak bant genişliğini kullanması durumunda, mevcut bant genişliğini kullanan kullanıcı sayısı artışının veri hızı ve gecikme üzerindeki etkisi incelenmiştir. Her bir kullanıcının DL-Sürücüsüz araç (Kırmızı bant, URLLC), DL-4K Video (Yeşil bant, eMBB) ve UL-IoT (Mor bant, mMTC) olmak üzere üç aktif oturuma sahip olduğu kabul edilerek, kullanıcı sayısını artışının etkisi incelenmiştir.

4.1.3. RAN Ağ Dilimleme – Nümeroloji İlişkisi

5G teknolojisinde numeroloji, fiziksel katmanda frekans ve zaman kaynaklarının nasıl yapılandırıldığını belirler ve bu yapılandırmaların verim ve gecikme üzerinde önemli etkileri vardır. Numeroloji, taşıyıcı frekansın alt taşıyıcılara nasıl bölündüğünü ve zaman dilimlerinin nasıl yönetildiğini ifade eden parametreleri içerir. Bu parametrelerin doğru şekilde ayarlanması, 5G ağlarının farklı kullanım senaryolarına uygun hale getirilmesini sağlar.

Numerolojinin verim üzerindeki etkisine baktığımızda, alt taşıyıcı aralığı (subcarrier spacing) kritik bir rol oynar. Alt taşıyıcı aralığı, bir taşıyıcının altına kaç alt taşıyıcı bölüneceğini belirler. Aralık küçüldükçe daha fazla alt taşıyıcı kullanılır, bu da veri iletim kapasitesini artırarak verimi yükseltebilir. Daha geniş alt taşıyıcı aralıkları ise yüksek

hızlı veri iletimi ve geniş bant genişliği gerektiren uygulamalar için uygundur. Bu durum, yoğun veri trafiği olan bir senaryoda, daha yüksek bir numeroloji seçiminin verimi artırabileceği anlamına gelir. Numeroloji ayrıca daha yüksek veri hızları sağlayarak genel verimi artırır.

Numerolojinin gecikme üzerindeki etkisi ise zaman dilimlerinin uzunluğu ile ilgilidir. Daha yüksek numerolojilerde zaman dilimleri kısalır, bu da veri paketlerinin daha hızlı iletimini ve dolayısıyla daha düşük gecikmeyi sağlar. Özellikle gecikmeye duyarlı uygulamalar (örneğin, endüstriyel otomasyon veya otonom araçlar) için düşük gecikme sağlamak amacıyla yüksek numeroloji tercih edilebilir. Ayrıca, numeroloji spektrumun daha verimli kullanılmasını sağlar. Daha yüksek numerolojiler, daha fazla frekans bölgesinin etkin kullanımını destekler ve bu da düşük gecikme sürelerine katkıda bulunur.

Sonuç olarak, 5G'de numeroloji, verim ve gecikme arasında denge kurulmasını sağlar. Yüksek numeroloji, daha yüksek verim ve daha düşük gecikme sunar, ancak daha karmaşık sinyal işleme gerektirebilir. Düşük numeroloji ise daha geniş kapsama alanı ve daha kararlı bağlantılar sunabilir, ancak verim ve gecikme açısından daha az avantajlı olabilir. Numeroloji seçimi, 5G ağının kullanılacağı senaryoya ve ihtiyaçlara bağlı olarak optimize edilir.

Bu çalışmada test için oluşturulan ağ dilimlerinin kullandığı bantlar farklı nümerolojiler ile konfigüre edilerek, nümeroloji değişimini veri hızı ve gecikme üzerinde etkisi incelenmiştir. Testler nümeroloji=1,2 ve 3 olmak üzere 3 farklı nümeroloji tipi için gerçekleştirilmiştir.

4.2. Simülasyon Araçları

Bu çalışmada, Şekil-2'de gösterildiği gibi fiziksel kaynak bloğunun ağ dilimlerine göre paylaşımlı kullanılması durumunda, RAN ağ dilimleme açısından bant genişliği kullanımının, uygulama tipi farklılığı ve nümeroloji değişiminin veri hızı ve gecikme üzerindeki etkileri incelenmiştir. Simülasyon testlerinde, açık kaynak kodlu NS-3 ağ simülatorü ve 5G test kütüphanesi olan "5G-Lena" eklentisi kullanılarak QoS, bant genişliği ve nümeroloji değişimlerinin hız ve gecikme üzerindeki etkileri incelenmiştir.

4.2.1. NS-3 (Network Simulator 3) Ağ Simülatorü

NS-3, ağ simülasyonu ve modellemesi konusunda geniş bir yelpazede kullanım imkânı sunan güçlü bir araçtır. Hem araştırmacılar hem de geliştiriciler için kapsamlı ve esnek bir simülasyon platformu sağlayarak, ağ teknolojilerinin gelişimine önemli katkılar sağlamaktadır.

NS-3 üzerinde 5G simülasyonları yapmak için kullanılan 5G-LENA kütüphanesi, özellikle 5G ağlarının performansını değerlendirmek ve analiz etmek amacıyla geliştirilmiş bir kütüphanedir. 5G-LENA, NS-3'ün LTE modülünün üzerine inşa edilmiştir ve 5G teknolojilerinin simülasyonlarını destekler.

Tablo 4.1. 5G Lena Özellik Tablosu

Özellik	Açıklama
5G Desteği	5G NR'nin temel özelliklerini ve protokollerini simüle eder. Yeni spektrum kullanımı, genişletilmiş taşıyıcı agregasyonu ve gelişmiş anten teknolojileri gibi yenilikleri içerir.
NR RLC ve MAC Katmanı	NR RLC ve NR MAC katmanlarının detaylı simülasyonunu sağlar. Veri iletimi, hata kontrolü ve kaynak tahsisi gibi işlevleri yönetir.
Çoklu Kullanıcı Desteği	Birden fazla kullanıcının aynı anda farklı hizmetler ve uygulamalar kullanarak 5G ağını nasıl etkilediğini incelemeye olanak tanır.
Hareketlilik ve Handover	Kullanıcı ekipmanlarının hareketliliğini ve hücre değiştirme (handover) işlemlerini simüle eder. Mobil kullanıcıların performansını ve ağ esnekliğini değerlendirmek için önemlidir.
Gelişmiş Anten Modelleri	MIMO ve beamforming (hüzmeleme) gibi gelişmiş anten teknolojilerini destekler. Yüksek veri hızları ve düşük gecikme süreleri sağlama kapasitesini simüle eder.
Açık Kaynaklı ve Esnek	Açık kaynaklı bir projedir ve GNU GPLv2 lisansı altında dağıtılmaktadır. Kullanıcılar tarafından özelleştirilebilir ve genişletilebilir.
Akademik ve Endüstriyel Kullanım	Üniversiteler ve araştırma kurumları, telekomünikasyon şirketleri ve ağ sağlayıcıları tarafından yeni 5G hizmetlerini ve uygulamalarını test etmek ve optimize etmek için kullanılır.

5G-LENA, Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya (CTTC) tarafından geliştirilmiş ve bakımını yapılmaktadır. CTTC, ns-3 topluluğunun aktif bir üyesidir ve özellikle kablosuz iletişim simülasyonlarında uzmanlaşmıştır. 5G-LENA, açık kaynaklı bir projedir ve GNU GPLv2 lisansı altında dağıtılmaktadır. Bu, kullanıcıların kütüphaneyi kullanmalarına, değiştirmelerine ve dağıtmalarına olanak tanır. Araştırmacıların ve geliştiricilerin 5G NR teknolojilerini simüle etmelerini, analiz etmelerini ve performanslarını değerlendirmelerini sağlamayı amaçlar. Özellikle 5G ağlarının fiziksel ve MAC katmanlarının simülasyonunu yapar. Tablo 4.1'de 5G Lena kütüphanesini kullanım senaryoları gösterilmektir.

5. SİMÜLASYON SONUÇLARI VE ANALİZ

Bu çalışmada, 5G ağlarda uçtan uca servis kalitesinin sağlanması için farklı uygulamalara göre radyo erişim ağındaki fiziksel kaynak bloğunun ağ dilimlemeye uygun olarak kullanılması incelenmiştir. NS-3 simülasyon aracı kullanılarak QoS tipi, bant genişliği ve nümeroloji değişimleri analiz edilmiştir. RAN ağ dilimleme açısından, farklı uygulama ihtiyaçlarını karşılayabilmek için ağ dilimi farkında QoS algoritmaları, ağ dilimi farkında dinamik bant kullanımı ve nümeroloji kullanımının etkileri gösterilmiştir. Gelecek çalışmalarda, bu çalışmanın sonucu olarak ortaya çıkan ağ dilimi farkında dinamik QoS yönetimi ve paket işleme mekanizmaları üzerine çalışılacaktır.

RAN ağ dilimlemenin fiziksek kaynak kullanımı açısından performansı değerlendirilirken veri hızı ve gecikme değerlerinde değişimler incelenmiştir. Sistemde kullanılan QoS, Bant genişliği ve nümeroloji parametlerinin bu metrikler üzerindeki etkisi gözlemlenmiştir.

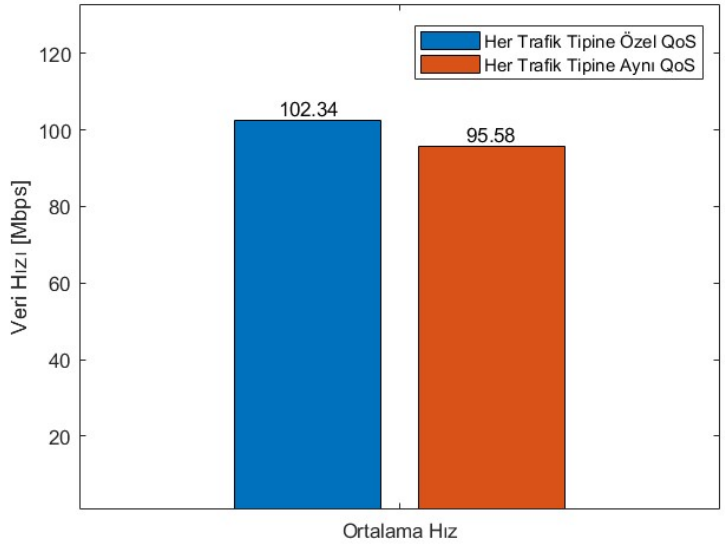
5.1.1. QoS Değişimi Test Sonuçları

RAN ağ dilimleme ve QoS arasındaki ilişki, modern mobil ağların performans ve esnekliğini artıran önemli bir unsurdur. Ağ dilimleme, çeşitli hizmetlerin spesifik QoS gereksinimlerini karşılamak için ağ kaynaklarının dinamik ve verimli bir şekilde yönetilmesini sağlar. Bu ilişki, operatörlerin çeşitli uygulamaları ve hizmetleri tek bir fiziksel ağ altyapısı üzerinde sorunsuz bir şekilde sunmalarını mümkün kılar, bu da hem kullanıcılar hem de hizmet sağlayıcılar için daha iyi bir deneyim anlamına gelir.

Uygulama tipinin RAN ağ dilimleme üzerindeki etkisini göstermek için nümeroloji değiştirilmeden farklı uygulamalar için test senaryosu oluşturulmuştur. Test-1'de 6 farklı uygulama trafiği ve buna bağlı olarak 6 farklı QoS konfigürasyonu yapılarak ortalama veri hızı incelenmiştir. Test-2' de her uygulama için aynı QoS konfigürasyonu verilerek sonuçlar karşılaştırılmıştır. Tablo 5.1'de oluşturulan test senaryosunu ve simülasyon sonrasında elde edilen ortalama hız sonuçları gösterilmektedir.

Tablo 5.1. QoS tipi test senaryosu ve sonuçlar

UE	Trafik Tipi	Test-1 QoS Tipi	Test-2 QoS Tipi
UE-1	AR/VR	1	3
UE-2	Voice	2	3
UE-3	Video	3	3
UE-4	Game	4	3
UE-5	V2X	5	3
UE-6	Video TCP	6	3
Ortalama Hız		102.34 Mbps	95.58 Mbps



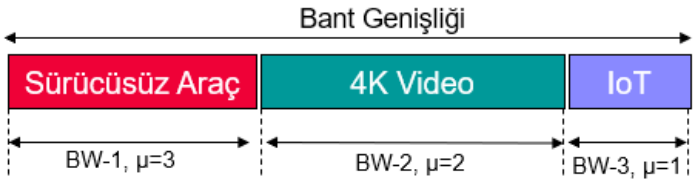
Şekil 5.1. QoS tiplerinin veri hızındaki etkisi

Simülasyon sonuçlarına göre 6 UE'nin sahip olduğu her akış için farklı QoS atandığında ortalama hız 102.34 Mbps olarak ölçülmektedir. Bu akışlara aynı QoS atanması yapıldığında ortalama hız 95.58 Mbps olarak ölçülmektedir. QoS tiplerini veri hızındaki etkisi Şekil 5.1'de gösterilmektedir. Elde edilen simülasyon sonuçları analiz edildiğinde, RAN ağ dilimlemenin hayata geçebilmesi için farklı uygulama karakteristiklerinin gereksinimlerini karşılayabilmek için her ağ dilimine özel QoS algoritma kullanımı gerekliliği görülmektedir.

5.1.2. Bant Genişliği Değişimi Test Sonuçları

Mevcut bant genişliğini kullanan kullanıcı sayısı artışının veri hızı ve gecikme üzerindeki etkisi incelenmiştir. Her bir UE DL-Sürücüsüz araç (Kırmızı bant, URLLC), DL-4K Video (Yeşil bant, eMBB) ve UL-IoT (Mor bant, mMTC) olmak üzere üç aktif oturuma

sahiptir. Ağ dilimlerine göre uygulamaların bant genişliği kullanımı Şekil 5.2'de gösterilmektedir.

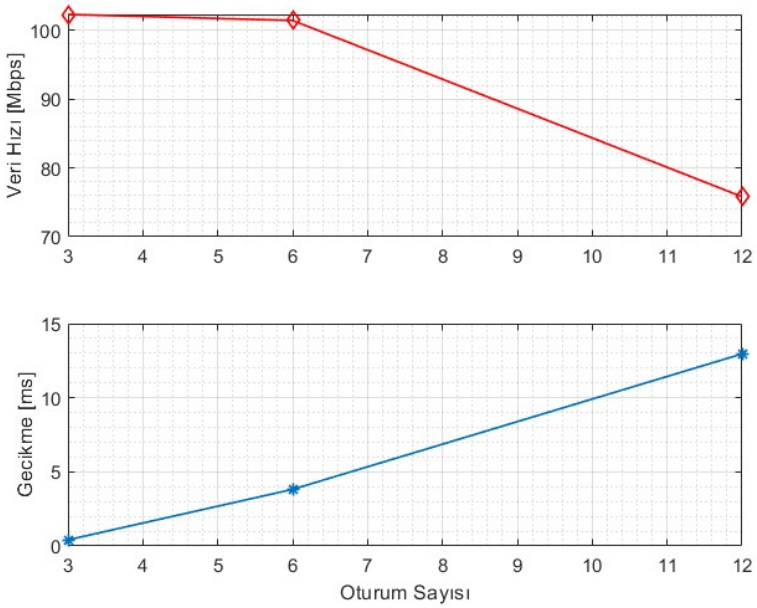


Şekil 5.2. Uygulamaların bant genişliği kullanımı

Tablo 5.2. 4 UE-12 farklı trafik akış konfigürasyonu

UE	Akışlar ve Yönü	Uygulama Tipi	Ağ Dilimi
UE-1	Akış-1, DL	Sürücüsüz Araç	URLLC
	Akış -2, DL	4K Video	eMBB
	Akış -3, UL	IoT	mMTC
UE-2	Akış -4, DL	Sürücüsüz Araç	URLLC
	Akış -5, DL	4K Video	eMBB
	Akış -6, UL	IoT	mMTC
UE-3	Akış -7, DL	Sürücüsüz Araç	URLLC
	Akış -8, DL	4K Video	eMBB
	Akış -9, UL	IoT	mMTC
UE-4	Akış -10, DL	Sürücüsüz Araç	URLLC
	Akış -11, DL	4K Video	eMBB
	Akış -12, UL	IoT	mMTC

Testler sırasıyla 1 UE, 2 UE ve 4 UE kullanılarak yapılmıştır. Tablo 5.2'de 4 UE- 12 farklı trafik akış için yapılan test konfigürasyonu göstermektedir. Veri hızı açısından yapılan simülasyon sonuçlarına göre 1 UE (3-farklı trafik akışı) için hız 104.3 Mbps, 2 UE (6-farklı trafik akışı) için hız 101.2 Mbps, 4 UE (12-farklı trafik akışı) için hız 77.4 Mbps ortalama veri hızı ölçülmüştür. Aktif oturum sayısı arttıkça veri hızının azaldığı görülmektedir. Gecikme açısından yapılan simülasyon sonuçlarına göre 1 UE (3-farklı trafik akışı) için hız 1.7 ms, 2 UE (6-farklı trafik akışı) için hız 4.8 ms, 4 UE (12-farklı trafik akışı) için hız 12.6 ms ortalama gecikme ölçülmüştür. Aynı şekilde oturum sayısı arttıkça gecikme artmaktadır. Şekil 5.3'te simülasyon sonuçlarına göre kullanıcı sayısının, veri hızı ve gecikme üzerindeki etkisi gösterilmektedir.



Şekil 5.3. Kullanıcı sayısının veri hızı ve gecikme üzerindeki etkisi

Bu sonuçlara göre, oturumu sonlanan kullanıcı kaynaklarının diğer kullanıcılara dinamik olarak dağıtılması durumunda veri hızı ve gecikme metriklerinin iyileşeceği değerlendirilmektedir.

5.1.3. Nümeroloji Değişimi Test Sonuçları

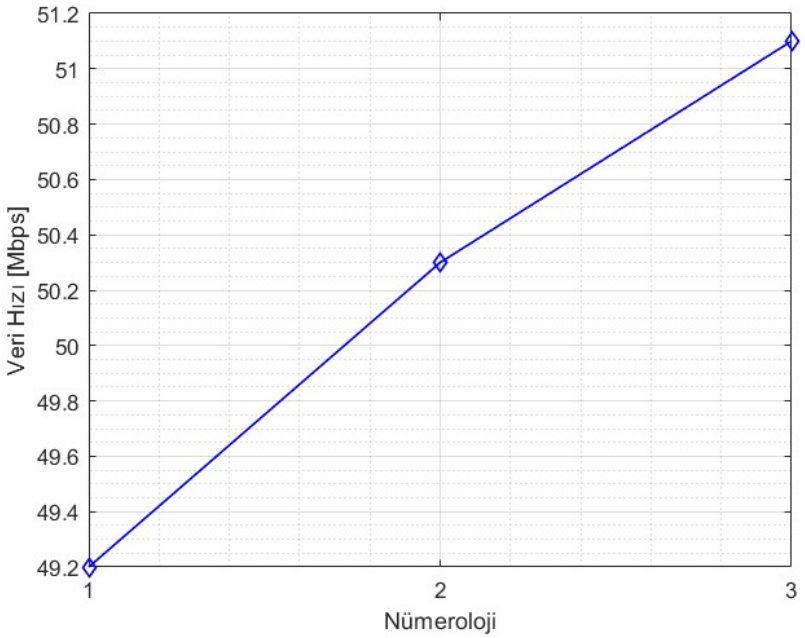
Sistemdeki bantlar farklı nümerolojiler ile konfigüre edilerek, nümeroloji değişimini veri hızı ve gecikme üzerinde etkisi incelenmiştir. Testler nümeroloji=1,2 ve 3 olmak üzere 3 farklı nümeroloji tipi için gerçekleştirilmiştir. Test sırasında kullanılan bant genişliği ve nümeroloji konfigürasyonu Tablo 5.3'te gösterilmektedir.

Tablo 5.3. Nümeroloji konfigürasyonu

Bandwidth	Numerology	Throughput [Mbps]
100	1	49.2
100	2	50.3
100	3	51.1

Simülasyon ortamında 100MHz bant genişliğide nümeroloji=1 ile veri hızı testi yapıldığında 49.2 Mbps, nümeroloji=2 ile test edildiğinde 50.3 Mbps, nümeroloji=3 ile test edildiğinde 51.1 Mbps ortalama veri hızı ölçülmüştür. Teoride nümeroloji değeri

arttıkça slot genişliğinin azaldığı bilinmektedir. Buna bağlı olarak birim zamandaki veri hızı da artmaktadır.



Şekil 5.4. Nümeroloji değişiminin veri hızındaki etkisi

Şekil 5.4'te elde edilen simülasyon sonuçlarına göre nümeroloji değişiminin veri hızındaki etkisi gösterilmektedir. Bu durumda RAN ağ dilimlemenin hayata geçebilmesi için ağ dilimi özel nümeroloji kullanan yöntemlerin geliştirilmesi gerektiği gösterilmiştir.

6. TARTIŞMA

6.1. Teorik ve Pratik Çıkarımlar

5G ve gelecek nesil kablosuz haberleşme sistemlerinde, ağa bağlanacak kullanıcı sayısının artması ve trafik tipinin çeşitlenmesi beklenmektedir. Bu çalışmada, fiziksel katman bloğunun farklı ağ dilimleri tarafından ortak kullanılması durumunda verim ve gecikmenin nasıl etkilendiği gösterilmiştir. Elde edilen simülasyon sonuçlarına göre, oluşturulan farklı ağ dilimlerinin radyo erişim ağı tarafında aynı fiziksel kaynağın kullanılması durumunda verimin düştüğü ve gecikmenin arttığı görülmüştür. Bu durumda mevcut yaklaşımların beklenen performansı karşılamayacağı vurgulanmıştır. Literatürde performansı iyileştirmeye çalışsan dinamik kaynak yönetim mekanizmaları öneren çalışmalar mevcuttur. Ancak bu çalışmaların da bant genişliği kullanımı ihtiyacı olduğu için performans açısından yine beklenen iyileşme olamayacaktır. Bu noktada özellikle bant genişliğini daha efektif kullanmak için O-RAN mimarisiyle gelen bulut tabanlı yaklaşımların fiziksel katman tarafından ağ dilimi temelli uygulanması önerilmektedir. Bölüm 3.8'de önerilen yöntem anlatılmıştır.

QoS tipinin doğru atanması, ağdaki farklı veri türlerinin ihtiyacına göre bant genişliği ve öncelik ayarlaması yaparak, genel ağ verimliliğini artırır ve gecikmeleri minimize eder. Bu, özellikle kritik uygulamaların kesintisiz ve performanslı çalışmasını sağlamak için önemlidir. QoS algoritmaları, bant genişliğinin verimli kullanılmasını sağlar. Örneğin, Weighted Fair Queuing (WFQ) gibi algoritmalar, bant genişliğini adil bir şekilde dağıtarak hem yüksek öncelikli hem de düşük öncelikli trafiğin belirli bir performans seviyesini korumasını sağlar. Ağ dilimleme açısından değerlendirildiğinde, sistemde oluşturulan ağ dilimleri için aşağıdaki Tablo 6.1'deki açıklamalara uygun QoS atamaları yapılmalıdır. Tablodan görüleceği üzere her trafik tipi için en iyi çalışan QoS tipi mevcuttur. Oluşturulan ağ dilimleri belirli bir trafik tipi sınıfına hizmet vereceği için bu dilimdeki kullanıcılar için QoS ataması yapılırken, QoS yönetim mekanizmalarının ağ dilimi parametrelerine göre işlem yapması sistemdeki servis kalitesini artıracaktır. 5G ve 6G gibi gelecek nesil kablosuz haberleşme sistemlerinde QoS-Ağ dilimi ilişkisi oldukça kritik hale gelecektir.

Tablo 6.1. QoS tipleri ve açıklamaları

QoS Tipi	**Açıklama**
En İyi Çaba (Best Effort)	QoS'nin en basit şeklidir ve genellikle herhangi bir önceliklendirme yapmaz. Tüm trafik eşit muamele görür, belirli bir hizmet kalitesi garanti edilmez.
Hizmet Sınıflandırması (Class of Service - CoS)	OSI modelinin veri bağlantı katmanında çalışan bir QoS türüdür. Ethernet çerçevesinde belirli bir CoS değeri atanır ve bu değer, ağ cihazlarının veriye öncelik vermesine yardımcı olur.
Farklılaştırılmış Hizmetler (Differentiated Services - DiffServ)	IP paketlerine farklı hizmet seviyeleri atamak için kullanılan bir QoS modelidir. IP başlığındaki Differentiated Services Code Point (DSCP) alanı ile belirli trafiğe öncelik tanınır.
Entegre Hizmetler (Integrated Services - IntServ)	Her bir akış için bant genişliği rezervasyonu yapılmasını gerektiren bir QoS türüdür. IntServ, daha karmaşıktır ve ağ üzerinde daha fazla yük oluşturabilir.
Adil Kuyruklama (Fair Queuing)	Farklı veri akışlarının adil bir şekilde sıralanmasını ve her bir akışa eşit kaynak tahsis edilmesini sağlar.
Ağırlıklı Adil Kuyruklama (Weighted Fair Queuing - WFQ)	Belirli akışlara ağırlık atanır, böylece daha önemli veya acil verilerin daha hızlı iletilmesi sağlanır.
Kaynak Rezervasyon Protokolü (Resource Reservation Protocol - RSVP)	Ağdaki belirli bir akış için önceden bant genişliği ve diğer kaynakların ayrılmasını sağlar. Genellikle video ve ses gibi zaman duyarlı veriler için kullanılır.
Policing ve Shaping	Policing: Trafik hacminin belirli bir eşiği aşması durumunda veri paketlerini düşürür veya yeniden şekillendirir. Shaping: Trafiği düzene sokarak, bant genişliği kullanımını yumuşatır ve belirli bir seviyede tutar.

7. SONUÇ

Bu çalışmada, 5G ağlarda uçtan uca servis kalitesinin sağlanması için farklı uygulamalara göre radyo erişim ağındaki fiziksel kaynak bloğunun ağ dilimlemeye uygun olarak kullanılması incelenmiştir. NS-3 simülasyon aracı kullanılarak QoS tipi, bant genişliği ve nümeroloji değişimleri analiz edilmiştir. RAN ağ dilimleme açısından, farklı uygulama ihtiyaçlarını karşılayabilmek için ağ dilimi farkında QoS algoritmaları, ağ dilimi farkında dinamik bant kullanımı ve nümeroloji kullanımının etkileri gösterilmiştir. ORAN mimarisi kullanılarak bant genişliğinin daha efektif kullanılabilmesi için ağ dilimi farklında fiziksel katman tasarımı önerilmiştir. Ayrıca gelecek çalışmalarda devam edilebilecek açık konu olarak, bu çalışmanın sonucu olarak ortaya çıkan ağ dilimi farkında dinamik QoS yönetimi ve paket işleme mekanizmaları üzerine çalışılabileceği vurgulanmıştır.

KAYNAKLAR

Bakri, S., Frangoudis, P. A., Ksentini, A. ve Bouaziz, M. (2021). Data-Driven RAN Slicing Mechanisms for 5G and Beyond. *IEEE Transactions on Network and Service Management*. *18*(4), 4654-4668.

Bin, H. ve Schotten, H. D. (2020). Machine Learning for Network Slicing Resource Management: A Comprehensive Survey. *ZTE Communications*, 2020

Debbabi, F., Jmal, R., Fourati, L. C. ve Ksentini, A (2020). Algorithmics and Modeling Aspects of Network Slicing in 5G and Beyonds Network: Survey. *IEEE Network*, 8, 162748-162762.

Dryjanski, M. ve Kliks, A. (2020). A Hierarchical and Modular Radio Resource Management Architecture for 5G and Beyond. *IEEE Communications Magazine*, 58(7), 28-34.

Elayoubi, S. E., Jemaa, S. B., Altman, Z. ve Serrano, A.G. (2019). 5G RAN Slicing for Verticals: Enablers and Challenges. *IEEE Communications Magazine*, *57*(1), 28-34.

ETSI. (2024). *3GPP TS 38.211 NR; Physical channels and modulation*. (Release 16). Sophia Antipolis, Fransa.

García-Morales, J., Lucas-Estan M. C. ve Javier Gozalvez, J. (2019). Latency-Sensitive 5G RAN Slicing for Industry 4.0. *IEEE Access*, 7, 143139-143159.

Guo T. ve Suárez, A. (2019). Enabling 5G RAN Slicing With EDF Slice Scheduling. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, *68*(3), 2865-2877.

Han, B., Lianghai, J. ve Schotten, H. D. (2018). Slice as an Evolutionary Service: Genetic Optimization for Inter-Slice Resource Management in 5G Networks. *IEEE Access*, 6, 33137-33147.

Hao, Y., Jiang, Y., Hossain, M. S., Ghoneim, A., Yang, J. ve Humar, I. (2019). Data-Driven Resource Management in a 5G Wearable Network Using Network Slicing Technology. *IEEE Sensors Journal*, *9*(19), 8379-8386.

Jiang, M., Condoluci, M. ve Mahmoodi, T. (2016). Network slicing management & prioritization in 5G mobile systems. *22th European Wireless Conference*, Finlandiya, 18-20 Mayıs 2016.

Kaloxylos, A. (2018). A Survey and an Analysis of Network Slicing in 5G Networks. *IEEE Communications Standards Magazine*, *2*(1), 60-65.

Li, R., Zhao, Z., Sun, Q., Chih-Lin I, Yang, C. Chen, X., Zhao, M. ve Zhang, H. (2018). Deep Reinforcement Learning for Resource Management in Network Slicing. *IEEE Access*, 6, 74429-74441.

Li, X., Samaka, M., Chan, H. A., Bhamare, D., Gupta, L., Guo, C. ve Jain, R. (2017). Network Slicing for 5G: Challenges and Opportunities. *IEEE Internet Computing*,

21(5), 20-27.

Maule, M., Vardakas, J. ve Verikoukis, C. (2021). 5G RAN Slicing: Dynamic Single Tenant Radio Resource Orchestration for eMBB Traffic within a Multi-Slice Scenario. *IEEE Communications Magazine, 59*(3), 110-116.

Ojaghi, B., Adelantado, F., Antonopoulos, A. ve Verikoukis, C. (2022). SlicedRAN: Service-Aware Network Slicing Framework for 5G Radio Access Networks. *IEEE Systems Journal, 16*(2), 2556-2567.

Papa, A., Klugel, M. ve Goratti, L., Rasheed ve T., Kellerer, W. (2019). Optimizing Dynamic RAN Slicing in Programmable 5G Networks. *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Çin, 20-24 Mayıs 2019.

Silva, I., Mildh, G., Kaloxylos, A., Spapis, P., Buracchini, E., Trogolo, A., Zimmermann, G., ve Bayer, N. (2016). Impact of network slicing on 5G Radio Access Networks. *2016 European Conference on Networks and Communications (EuCNC)*, Yunanistan, 27-30 Haziran 2016.

Song, F., Li, J., Ma, C., Zhang, Y., Shi, L. ve Jayakody, D. N. K. (2020). Dynamic Virtual Resource Allocation for 5G and Beyond Network Slicing. *IEEE Open Journal of Vehicular Technology*, 1, 215-226.

Su, R., Zhang, D., Venkatesan, R., Gong, Z., Li, C., Ding, F., Jiang, F. ve Zhu, Z. (2019). Resource Allocation for Network Slicing in 5G Telecommunication Networks: A Survey of Principles and Models. *IEEE Network, 33*(6), 172-179.

URL-1: Https://www.viavisolutions.com/en-us/5g-network-slicing (Ziyaret tarihi: 18 Haziran 2024)

Vo, P. L., Nguyen, M. N. H., Le, T. A. ve Tran, N. H. (2018). Slicing the Edge: Resource Allocation for RAN Network Slicing. *IEEE Wireless Communications Letters, 7*(6), 970-973.

Yan, M., Feng, G., Zhou, J., Sun, Y. ve Liang, Y. C. (2019). Intelligent Resource Scheduling for 5G Radio Access Network Slicing. *IEEE Transactions on Vehicular Technology, 68*(8), 7691-7703.

Yang, H., Yu, A., Zhang, J., Nan, J., Bao, B., Yao, O. ve Cheriet, M. (2021). Data-Driven Network Slicing From Core to RAN for 5G Broadcasting Services. *IEEE Transactions on Broadcasting, 67*(1), 23-32.

Zhang, H., Liu, N., Chu, X., Long, K., Aghvami, A. ve Leung, V. C. M. (2017). Network Slicing Based 5G and Future Mobile Networks: Mobility, Resource Management, and Challenges. *IEEE Communication Magazine, 55*(8), 138-145.

Zhang, S. (2019). An Overview of Network Slicing for 5G. *IEEE Wireless Communications, 26*(3), 111-117.

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

Çubukçu, A., Çubukçu, Ö., Kavak, A. ve Küçük, K. (2024). Evaluation of Cloud Based Dynamic Network Scaling and Slicing for Next-Generation Wireless Networks. *MDPI Engineering Proceedings*, *70*(1), 45. 12 Ağustos 2024. https://doi.org/10.3390/engproc2024070045.

Çubukçu, A., Çubukçu, Ö., Kavak, A. ve Küçük, K. (2024). Performance Evaluation of 5G RAN Slicing in terms of Physical Resource Usage. *SIU 2024*, 16-18 Mayıs 2024.

Çubukçu, A., Çubukçu, Ö., Sabucu Sandal, Y., Kavak, A. ve Küçük, K. (2023). A Study on Slice-Aware Industrial Edge Applications for Next-Generation Private Networks. *IISEC 2024*, 21-22 Aralık 2023.

Çubukçu, Ö., **Çubukçu, A.,** Kavak, A. ve Küçük, K. (2024). SDN and NFV Based Dynamic QoS Management for 5G and Beyond Networks. *SIU 2024*, 16-18 Mayıs 2024.

ÖZGEÇMİŞ

2014 yılında Kocaeli Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği, 2015 yılında çift anadal programı kapsamında Kocaeli Üniversitesi Mekatronik Mühendisliği bölümlerinden mezun olmuştur. 2015-2017 yılları arasında NETAŞ' ta Yazılım Mühendisi olarak çalışmıştır. 2017 Aralık-2018 Mayıs aralığında askerlik görevini tamamlamıştır. 2018-2022 yılları arasında Ulak Haberleşme' de Yazılım Mühendisi olarak çalışmıştır. 2023 yılından itibaren Siemens'te 5G araştırma ekibinde ArGe Mühendisi olarak çalışmaktadır. İlgi alanları Düşük Gecikmeli Haberleşme, Servis Kalitesi, Ağ Dilimleme, Uç Bilişim, Çekirdek Şebeke ve Radyo Erişim Ağıdır.