



**AÇIK KAYNAKLI SDN/NFV TEKNOLOJİLERİNİN FARKLI ŞEBEKE
ALTYAPILARINA UYGULANARAK SİSTEM PERFORMANSI
ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN GÖZLEMLENMESİ**

Mehmet ÖZDEM

**DOKTORA TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HAZİRAN 2021

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Mehmet ÖZDEM

09/06/2021

AÇIK KAYNAKLI SDN/NFV TEKNOLOJİLERİNİN FARKLI ŞEBEKE
ALTYAPILARINA UYGULANARAK SİSTEM PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ
ETKİSİNİN GÖZLEMLENMESİ

(Doktora Tezi)

Mehmet ÖZDEM

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2021

ÖZET

Telekom operatörlerinin yüksek trafik hacmi ile baş edebilmek için kullanmış olduğu sistemlerin tedarikçilere olan bağımlılığı gün geçtikçe artmaktadır. Bu çalışmada; söz konusu bağımlılığın olduğu üç temel konuda yenilikçi çalışmalar yapılarak tedarikçilere olan bağımlılığın önemli ölçüde azaltılması amaçlanmıştır. Bu konulardan ilki, geleneksel şebekelerde servis fonksiyon zincir yapısı kullanılarak trafik yönlendirmesi yapılabilmesi için maliyeti yüksek özel cihazlara ihtiyaç duyulmasıdır. Bu problemi çözebilmek adına bu çalışmada dinamik trafik yönetimi yapabilen servis fonksiyon zinciri platformu geliştirilerek, mobil şebeke alt yapısında test edilmiştir. İkinci konu, geleneksel pasif optik erişim sistemlerinde müşterilere servis verebilmek için kullanılmakta olan uç ve merkezi cihazların birbirine bağımlılığı olmasından dolayı bu sistemlerin aynı ağ tedarikçisinden temin edilme zorunluluğu bulunmasıdır. Bu bağımlılığı ortadan kaldırabilmek adına yazılım tanımlı ağ tabanlı geniş bant erişim teknolojisi sabit şebekeye uygulanarak test edilmiştir. Üçüncü konu ise özel cihazlar kullanılan geleneksel şebekelerde intranet servislerinin yönetiminde anlık değişen ihtiyaçlara göre bant genişliği, ağ ve erişim tanımlamalarının dinamik olarak yapılmasında problemler yaşanması olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada söz konusu zorlukları ortadan kaldırmaya yönelik olarak, SDN tabanlı platform geliştirilmiş ve intranet şebekesinde test edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, açık kaynak kodlu SDN/NFV teknolojileri kullanılarak geliştirilen ya da uygulanan bu çözümlerin yüklü trafik altında bile kararlı olarak çalıştığı, tedarikçilere olan bağımlılığı önemli ölçüde ortadan kaldırdığı ve büyük ölçekli farklı haberleşme ağlarında kullanılabileceği değerlendirilmiştir.

Bilim Kodu : 90523
Açık kaynak, yazılım tanımlı ağ, ağ fonksiyonlarının
Anahtar Kelimeler : sanallaştırılması, intranet, dinamik servis fonksiyon zinciri, yazılım tanımlı ağ tabanlı geniş bant erişim teknolojisi
Sayfa Adedi : 135
Danışman : Prof. Dr. Mustafa ALKAN

THE OBSERVATION OF THE EFFECT ON THE SYSTEM PERFORMANCE BY
APPLYING OPEN SOURCE BASED SDN/NFV TECHNOLOGIES INTO THE
DIFFERENT NETWORK INFRASTRUCTURES

(Ph. D. Thesis)

Mehmet ÖZDEM

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

Haziran 2021

ABSTRACT

Day by day the dependency of telecom operators to vendors increases to cope with the high traffic volume. In this study; it is aimed to significantly reduce the dependency on vendors by the application of innovative approaches on three main issues where the dependency exists. The first of these issues is the need for high-cost, vendor proprietary devices for traffic steering using the service function chain structure in legacy networks. To solve this problem, in this study, a service function chain capable of dynamic traffic steering has been developed and tested in the mobile network infrastructure. The second of these issues is the dependency in legacy passive optical fixed access networks where central and end devices must be purchased from the same vendor. To eliminate this dependency, SDN enabled broadband access technology is applied and tested on a fixed network. The third issue has been identified as problems in dynamically making bandwidth, network and access configurations according to instantly changing needs in the management of intranet services in legacy networks using vendor proprietary devices. In this study, to overcome these difficulties a SDN based platform developed and tested on the intranet network. According to the results of the comparison with legacy networks, following evaluations are made that, developed or applied open source SDN / NFV technologies can work stably even under heavy traffic, also can significantly eliminate dependency on vendors and can be used in large-scale communication networks and can decrease maintenance and procurement costs.

Science Code : 90523
Open source, software defined networking, network functions
Key Words : virtualization, intranet, dynamic service function chaining, software
defined networking enabled broadband access
Page Number : 135
Supervisor : Prof. Dr. Mustafa ALKAN

TEŞEKKÜR

Tezimin her aşamasında bana yardımcı olan Sayın hocam Prof. Dr. Mustafa ALKAN'a, değerli fikirleriyle beni yönlendiren Tez İzleme Komitesi hocalarım Sayın Prof. Dr. İnan GÜLER ve Sayın Prof. Dr. Ertuğrul KARAÇUHA'ya, sağlamış olduğu imkanlardan dolayı çalıştığım değerli Kurum olan Türk Telekom'a ve süreçteki destekleri için Argela Şirketi'ne, varlıkları ile güvenlerini her daim hissettiren değerli annem, babam ve kardeşime, her zaman yanımda olup beni destekleyen sevgili eşim Şeyda ÖZDEM ve oğlum Doruk ÖZDEM'e teşekkürü bir borç bilirim.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. YENİ NESİL TEKNOLOJİLER.....	5
2.1. Sanallaşma Tarihi.....	5
2.2. SDN / NFV Teknolojilerinin Gelişimi	7
2.2.1. SDN temel unsurları.....	8
2.2.2. NFV temel unsurları.....	14
2.2.3. Uç nokta bilişim teknolojisi	18
2.3. Uç Nokta Bulut Teknolojisi	21
3. AÇIK KAYNAK KOD YAKLAŞIMI	25
3.1. Açık Kaynak Yazılımın Temel Unsurları	25
3.2. Açık Kaynak Yazılımın Kullanıldığı Alanlar ve Faydaları	27
3.3. Açık Kaynak Kod Toplulukları.....	28
3.3.1. ONF.....	28
3.3.2. Openstack topluluğu.....	34
3.3.3. Linux kuruluşu	36
3.3.4. Açık radyo erişim şebeke topluluğu.....	37

	Sayfa
3.3.5 Telekom altyapı projesi.....	38
3.4. Açık Kaynak Yazılımların Haberleşme Ağ Altyapılarında Kullanılması.....	38
4. HABERLEŞME AĞ ALTYAPILARI VE DÖNÜŞÜM İHTİYAÇLARI	39
4.1. Haberleşme Ağ Altyapıları	39
4.2. Yeni Nesil Servis Gereksinimleri ve Şebekelerin Dönüşüm İhtiyaçları	42
5. NFV/SDN TEKNOLOJİLERİNİN FARKLI ŞEBEKE ALTYAPILARI ÜZERİNDEKİ UYGULAMALARI	47
5.1. Abone Farkındalığına Sahip Dinamik Servis Fonksiyon Zinciri	47
5.1.1. SFC teknolojisi.....	48
5.1.2. İlgili araştırmalar ve problem durumu	49
5.1.3. Önerilen sistem mimarisi	52
5.1.4. Deneysel çalışmalar	58
5.1.5. Maliyet analizi.....	64
5.2. İntranet Servisleri için SDN Tabanlı Yönetim Platformu	68
5.2.1. İlgili araştırmalar ve problem durumu	69
5.2.2. Önerilen ONOS tabanlı SDN platform mimarisi	71
5.2.3. Deneysel çalışmalar	77
5.2.4. Maliyet analizi.....	84
5.3. SDN Tabanlı Genişbant Erişim Platformu.....	87
5.3.1. Bakır ve fiber teknolojilerin gelişimi	87
5.3.2. İlgili araştırmalar ve problem durumu	88
5.3.3. SEBA mimarisi	89
5.3.4. SEBA ile geleneksel erişim sistemlerinin karşılaştırması.....	96
5.3.5. Deneysel çalışmalar	97
6. GELECEK ÇALIŞMA YAKLAŞIMLARI	105

	Sayfa
6.1. vRAN Yaklaşımı	105
6.1.1. Mobil teknolojilerin gelişimi.....	106
6.1.2. 5G teknolojisi	107
6.1.3. vRAN mimarisi	109
6.1.4. 5G’de vRAN kullanımı	112
6.1.5. vRAN teknolojisinde karşılaşılabilecek zorluklar ve faydaları	113
6.2. DDC Yaklaşımı	114
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	119
7.1. Abone Farkındalığına Sahip Dinamik Servis Fonksiyon Zinciri	119
7.2. İntranet Servisleri için SDN Tabanlı Yönetim Platformu	120
7.3. SDN Tabanlı Geniş Bant Erişim Platformu	122
KAYNAKLAR	125
ÖZGEÇMİŞ	135

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. Yeni nesil servislerin gecikme değeri gereksinimleri.....	43
Çizelge 5.1. Trafik sınıflandırıcısı performans testleri için trafik dağılımı	60
Çizelge 5.2. Farklı sayıdaki oturumlar (aboneler) için test sonuçları	61
Çizelge 5.3. 10 Gbps trafik altındaki test sonuçları	63
Çizelge 5.4. 100 Gbps trafik altındaki test sonuçları	63
Çizelge 5.5. Tedarik ve bakım giderleri karşılaştırması	66
Çizelge 5.6. Toplam maliyet karşılaştırması.....	68
Çizelge 5.7. Deney düzeneğinde kullanılan ağ elemanları ve özellikleri.	78
Çizelge 5.8. Geleneksel şebeke ile önerilen platformun işlevsel olarak karşılaştırılması	82
Çizelge 5.9. Kurulan anahtar sayılarının yıllara göre değişimi	85
Çizelge 5.10. ONOS tabanlı SDN platform ile geleneksel şebeke maliyet karşılaştırması	85
Çizelge 5.11. SEBA ile geleneksel erişim sistemlerinin karşılaştırması	96
Çizelge 5.12. SEBA deney düzeneğinde kullanılan ağ elemanları ve özellikleri.....	98

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Haberleşme ağ altyapılarının katmanları	3
Şekil 1.2. Yeni nesil teknolojilerin uygulandığı şebekeler ve diğer uygulama alanları .	4
Şekil 2.1. Üç katmanlı SDN mimarisi	8
Şekil 2.2. SDN'in gelişimi	10
Şekil 2.3. Openflow paket yapısı	12
Şekil 2.4. Paket iletim akışı.....	13
Şekil 2.5. Openflow ile çalışan anahtarların mantıksal yapısı	14
Şekil 2.6. ETSI tarafından hazırlanan NFV mimari çerçevesi.....	15
Şekil 2.7. Uç nokta bilişim yapısı	18
Şekil 2.8. Bilgi ve haberleşme teknolojileri yakınsaması tarihi.....	20
Şekil 2.9. Uç nokta bulut mimarisi	22
Şekil 3.1. ONOS mimarisi	33
Şekil 4.1. Haberleşme ağ altyapılarının katmanlara göre gösterimi	40
Şekil 4.2. ETSI F5G kullanım senaryoları.....	44
Şekil 5.1. NFV/SDN teknolojilerinin bu çalışma kapsamındaki uygulama alanları	47
Şekil 5.2. Servis fonksiyon zinciri yapısı.....	49
Şekil 5.3. SGI-LAN şebeke mimarisi	49
Şekil 5.4. Geleneksel şebeke üzerinden SFC'nin uygulanması	52
Şekil 5.5. Şebeke fonksiyonlarının VNF'lere dönüşümü	52
Şekil 5.6. SDN kontrollü şebeke mimarisi.....	53
Şekil 5.7. Kullanıcı farkındalığı olan dinamik SFC mimarisi	55
Şekil 5.8. Çalışma prensibinin mesajlarla açıklanması.....	56
Şekil 5.9. Önerilen SFC platformunun deney düzeneği	59

Şekil	Sayfa
Şekil 5.10. İki kullanıcı ekipmanından elde edilen verihızı değerleri	61
Şekil 5.11. Kullanıcı başına SFC süreleri	62
Şekil 5.12. Beş yıllık tedarik ve bakım giderleri karşılaştırması	67
Şekil 5.13. Beş yıllık toplam maliyet karşılaştırması	67
Şekil 5.14. İntranet hizmetleri için ONOS tabanlı SDN çözümü	71
Şekil 5.15. ONOS tabanlı SDN çözümünün mimari yapısı	72
Şekil 5.16. VLAN yönetimi için paket yakalama ekran görüntüsü	74
Şekil 5.17. Bant genişliği yönetimi için paket yakalama ekran görüntüsü	75
Şekil 5.18. Erişim yönetimi için paket yakalama ekran görüntüsü	76
Şekil 5.19. Geleneksel intranet mimarisini için deney düzeneği	77
Şekil 5.20. Geliştirilen intranet şebeke mimarisi için oluşturulan deney düzeneği	78
Şekil 5.21. Gecikme süresine göre performans karşılaştırması	80
Şekil 5.22. Seğirme süresine göre performans karşılaştırması	81
Şekil 5.23. Paket kaybı oranına göre performans karşılaştırması	81
Şekil 5.24. Eşzamanlı alınan akışlar için akış kurulum süreleri	82
Şekil 5.25. Beş yıllık tedarik ve bakım giderleri karşılaştırması	86
Şekil 5.26. Beş yıllık toplam maliyet karşılaştırması	86
Şekil 5.27. Sabit ve mobil servislerin ortak altyapıyı kullanması	90
Şekil 5.28. SEBA ile geleneksel OLT karşılaştırması	92
Şekil 5.29. Üst seviye SEBA mimarisi	93
Şekil 5.30. SEBA için oluşturulan deney düzeneği	97
Şekil 5.31. Gecikme sürelerine göre performans karşılaştırması	100
Şekil 5.32. Seğirme sürelerine göre performans karşılaştırması	100
Şekil 5.33. Paket kayıp oranlarına göre performans karşılaştırması	101

Şekil	Sayfa
Şekil 5.34. Veri indirme hızına göre performans karşılaştırması	101
Şekil 5.35. Veri yükleme hızına göre performans karşılaştırması	102
Şekil 5.36. MOS değerine göre performans karşılaştırması	102
Şekil 5.37. Video başlatma gecikmesine göre performans karşılaştırması.....	103
Şekil 6.1. NFV/SDN teknolojilerinin diğer uygulama alanları (vRAN, DDC).....	105
Şekil 6.2. Mobil teknolojilerin gelişimi	107
Şekil 6.3. ITU IMT-2020 5G kullanım senaryoları	108
Şekil 6.4. Geleneksel dağıtılmış radyo erişim şebeke mimarisi	110
Şekil 6.5. vRAN mimarisi.....	111
Şekil 6.6. DDC yönlendirme sistem mimarisi	116
Şekil 6.7. Ayırıştırılan fonksiyonların farklı donanımlara dağıtılması	117

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

gb	Gigabyte
gbps	Gigabit per second
ge	Giga Ethernet
kbps	Kilobit per second
mb	Megabyte
mbps	Megabit per second
mh	Megahertz
mpps	Million packets per second
ms	Millisecond
tbps	Terabit per second
w	Watt

Kısaltmalar

Açıklamalar

3GPP	3rd Generation Partnership Project
ACL	Access Control List
AMF	Access and Mobility Management Function
AP	Access Point
API	Application Programming Interface
APN	Access Point Name
AR	Augmented Reality
AS	Autonomous System
BBU	Baseband Unit
BGP	Border Gateway Protocol
BMC	Board Management Controller
BSS	Business Support System

Kısaltmalar**Açıklamalar**

CAP	Carrier Automation Platform
CAPEX	Capital Expenditures
CNCF	Cloud Native Computing Foundation
CORD	Central Office Re-architected
COTS	Commercial Off-The-Shelf
CPRI	Common Public Radio Interface
C-RAN	Centralized Radio Access Network
CU	Centralized Unit
DANOS	Disaggregated Network Operating System
DDC	Distributed Disaggregated Chassis
DHCP	Dynamic Host Configuration Protocol
DNS	Domain Name Server
DOCSIS	Data Over Cable Service Interface Specification
DoS	Denial of Services
DPDK	Data Plane Development Kit
DPI	Deep Packet Inspection
DRAM	Dynamic Random Access Memory
DU	Distributed Unit
eBGP	External Border Gateway Protocol
eCPRI	Enhanced Common Public Radio Interface
EDGE	GSM Enhanced Data rates for GSM Evolution
eFBB	Enhanced Fixed Broadband
EPON	Ethernet Passive Optical Network
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
F5G	Fifth Generation Fixed Network
FFC	Full Fibre Connection
G.FAST	Gigabit Fast
G.HN	Gigabit Home Network
GGSN	The Gateway GPRS Support Node
GPON	Gigabit Passive Optical Network
GPRS	General Packet Radio Service
GRE	Guaranteed Reliable Experience

Kısaltmalar**Açıklamalar**

GSM	Global System for Mobile Communications
HSS	Home Subscriber Server
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
HTTPS	Hypertext Transfer Protocol Secure
iBGP	Internal Border Gateway Protocol
ICMP	Internet Control Message Protocol
IETF	Internet Engineering Task Force
IP	Internet Protocol
IPv4	Internet Protocol Version 4
ISG	Industry Specification Group
KVM	Kernel-based Virtual Machine
LLDP	Link Layer Discovery Protocol
MAC	Media Access Control Address
MANO	Management and Orchestration
MME	Mobility Management Entity
MMS	Multimedia Messaging Service
MOS	Mean Opinion Score
NAT	Network Address Translation
NFV	Network Functions Virtualization
NFVI	Network Functions Virtualization Infrastructure
NFVO	Network Function Virtualization Orchestrator
NG-PON2	Next Generation Passive Optical Network
OCP	Open Compute Project
ODL	OpenDaylight
OFDPA	Openflow Data Path Abstraction
OLT	Optical Line Terminal
OMCI	ONU Management Control Interface
ONAP	Open Network Automation Platform
ONF	Open Network Foundation
ON.Lab	Open Networks Laboratory
ONOS	Open Network Operating System
ONU	Optical Network Unit

Kısaltmalar**Açıklamalar**

OPEX	Operational Expenditures
OPNFV	Open Platform for NFV
O-RAN	Open Radio Access Network
OSS	Operations Support System
OVS	Open Virtual Switch
PBR	Policy Based Routing
PCEP	Path Computation Element Protocol
PCRF	Policy and Charging Rule Function
PDN	Packet Data Network
PGW	Packet Gateway
PNF	Physical Network Function
PoE	Power on Ethernet
PON	Passive Optical Network
REST	Representational State Transfer
RRU	Remote Radio Unit
RU	Radio Unit
SDN	Software Defined Networking
SD-WAN	Software-Defined Wide Area Networking
SFC	Service Function Chaining
SFP	Small Form-Factor Pluggable
SGi-LAN	SGi Local Area Network
S-GW	Serving Gateway
SGSN	Serving GPRS Support Node
SMF	Session Management Function
SMS	Short Message Service
SNMP	Simple Network Management Protocol
TC	Traffic Classifier
TCP	Transmission Control Protocol
TIP	Telecom Infra Project
TWDM	Time and Wavelength Division Multiplexed
UPF	User Plane Function
vBNG	Virtual Broadband Network Gateways

Kısaltmalar**Açıklamalar**

VDI	Virtual Desktop Infrastructure
vDPI	Virtual Deep Packet Inspection
VIM	Virtualized Infrastructure Manager
vIMS	Virtual IP Multimedia Subsystem
VLAN	Virtual Local Area Network
VMM	Virtual Machine Manager
VNF	Virtual Network Function
VNFM	Virtual Network Function Manager
VOLTHA	Virtual OLT Hardware Abstraction
VR	Virtual Reality
VRAN	Virtual Radio Access Network
WLC	Wireless Local Area Network Controller
xDSL	X Digital Subscriber Line
XG-PON	X Gigabit Passive Optical Network
XGS-PON	X Gigabit Symmetric Passive Optical Network

1. GİRİŞ

Hızla gelişmekte olan bilgi teknolojileri günlük hayatımızı derinden değiştirmekte ve tüm sektörleri etkilemektedir. Bu gelişimin en önemli bileşenlerinden olan haberleşme sektörü çevirmeli ağ bağlantılarından eve kadar fiber teknolojilerine, GSM'den (Global System for Mobile Communications - Mobil İletişim için Küresel Sistem) 5G'ye büyük mesafeler kaydetmiştir. Bulut teknolojileri özellikle son yıllarda haberleşme sektörünü yeniden şekillendirmeye başlamıştır. Bulut teknolojiler ile birlikte artık kablolu ve kablosuz ağlar kontrol düzlemi ve veri düzleminin birbirinden ayrılmasıyla sabit mobil yakınsaması gerçekleştirilir hale gelmiştir.

Operatörlerin karşı karşıya kalmış olduğu problemlerin başında kullanmış oldukları sistemlerin tedarikçilere olan bağımlılığı nedeni ile tedarik ve bakım giderlerinin sürekli artması gelmektedir. Geleneksel ağlar, tedarikçiye özgü donanım ve yazılım platformlarına dayanan amaca yönelik olarak oluşturulmuş ağ ekipmanları (örneğin yönlendiriciler, ethernet anahtarları, güvenlik duvarları, yük dengeleyicileri vb.) ile tasarlanmıştır. Bu yekpare ağ öğelerinin kullanılması, uzun geliştirme ve kurulum döngüleri (yeni ürün ve hizmetler için pazara çıkış süresini yavaşlatma), karmaşık yaşam döngüsü yönetimi uygulamaları ve artan yatırım düzeyleriyle sonuçlanmıştır.

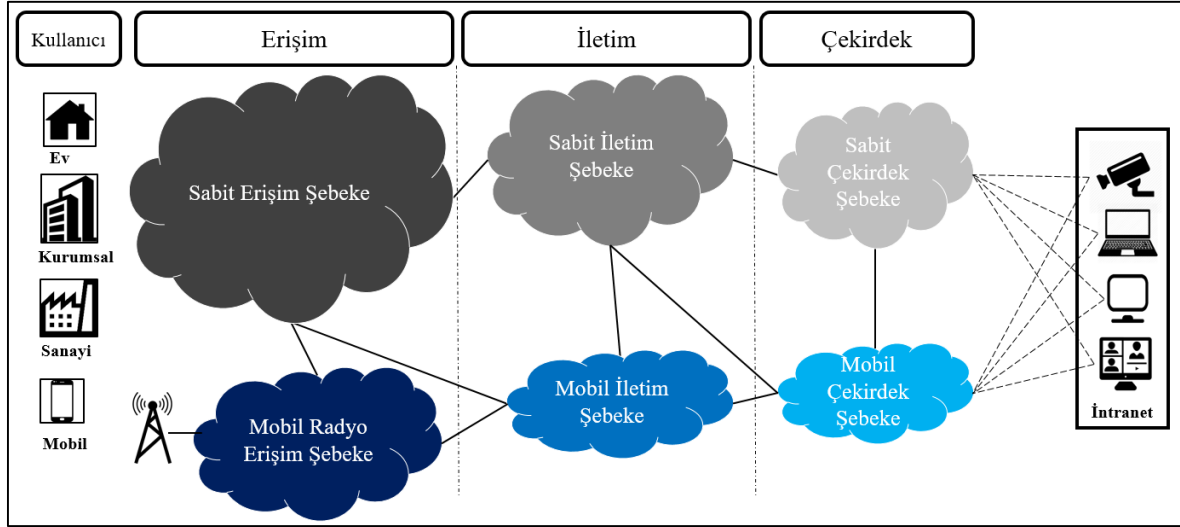
Operatörlerin karşı karşıya olduğu bu problemlere ek olarak 5G, arttırılmış/sanal gerçeklik, yapay zeka, büyük veri gibi yeni teknolojilerin şebeke gereksinimleri düşünüldüğünde yenilikçi teknolojiler kullanarak şebekede dönüşüm yapma gerekliliği ortaya çıkmıştır. SDN (Software Defined Networking - Yazılım Tanımlı Ağlar) ve NFV (Network Function Virtualization - Ağ Fonksiyonlarının Sanallaştırılması) teknolojileri bu dönüşümün en önemli yapı taşlarıdır.

Bir operatörün ağı kontrol, yönetim ve veri işlevlerinin fiziksel olarak birbirine bağlandığı ve iç içe geçmiş ağ öğelerinin her birinin aynı tedarikçi tarafından sağlandığı çeşitli paket ağ öğelerinden oluşmaktadır [1]. Bu geleneksel yapı ağın yönetimi, işletimi, bakım ve yeni servis devreye alma gibi pek çok alanda zorluğa ve karmaşaya neden olmaktadır. Bu nedenle operatörler bu zorlukların önüne geçmek ve yeni gelecek teknolojilerin ihtiyaç duyduğu çevik ve esnek şebeke ihtiyacını karşılayabilmek için mevcut şebekelerinin her katmanında

iç içe geçmiş yazılım ve donanım bileşenlerini ayırarak yazılım katmanında hem tedarikçi çeşitliliğini sağlamayı hem de açık kaynak kodlu yazılımların şebekelerinde daha kolay uygulanabilir hale gelmesini hedeflemektedirler. Aynı zamanda bu ayrıştırma sayesinde donanım katmanında standart ve basit bileşenlerin kullanımına olanak sağlayarak tedarikçi bağımlılığını ortadan kaldıracak, daha düşük maliyetlerle daha esnek ve çevik şebeke ihtiyaçlarını karşılayabileceklerdir. Operatörler, mevcut mimarilerinde gerçekleştirmesi gereken bu dönüşüm için çeşitli yenilikçi teknolojilere ihtiyaç duymaktadırlar.

SDN ile NFV teknolojilerinin yaygınlaşması ve mobil uç nokta bilişimi mimarisine geçiş bu dönüşümün en önemli bileşenini oluşturmaktadır. Bu dönüşüm için küresel telekom operatörleri şebekelerini yeniden yapılandırmakta ve veri merkezi temelli bulut teknolojilerini kullanmaktadırlar. SDN ve NFV teknolojileri tüketici ihtiyaçlarını karşılayan en gelişmiş altyapıyı sağlayarak iletişim sistemlerinin verimliliğini, ölçeklenebilirliğini ve performansını iyileştirmeyi sağlamaktadır. SDN teknolojisi ile birlikte ağ yönetimini kolaylaştırmak için ağ altyapısının kontrol ve veri düzlemleri birbirinden ayrılmaktadır. Bu ayırım, ağ kaynaklarının merkezi yönetimini etkin bir şekilde sunan programlanabilir bir ağ altyapısı oluşturmayı beraberinde getirmektedir. Öte yandan, NFV teknolojisi, yazılım kaynaklarını temel donanım altyapısından ayırmakta bu sayede ölçeklenebilirliği, verimliliği iyileştirmekte ve farklı tedarikçilerin birbirleri ile uyumlu şekilde çalışabilmesi için standartları tanımlamaktadır. SDN ve NFV teknolojilerinin entegrasyonu, farklı ağ altyapısı, cihazlar ve üreticiye özel protokoller arasında birlikte çalışabilirliği sağlayan standartlara dayalı ağ protokollerinin uygulanmasına olanak tanımaktadır.

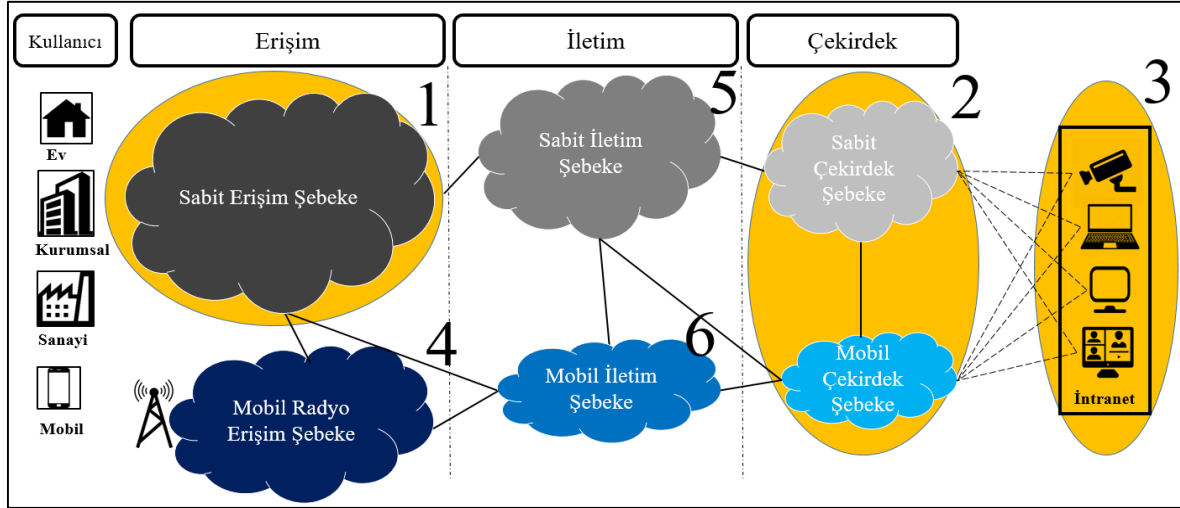
SDN ve NFV teknolojileri ayrıca açık kaynak projelerden de fayda sağlamaktadır. Ağların uçtan uca programlanabilmesi ve izlenebilmesi için açık kaynak ve tedarikçi bağımsız ara yüzler kritik öneme sahiptir [2]. Açık kaynak ve üreticiden bağımsız çözümler ağın otomasyonunun sağlanması konusunda da büyük rol oynamaktadır [3]. İlave olarak açık kaynak projeler, SDN ve NFV için bu teknolojilerin olgunlaşması ve bu teknolojilere daha geniş katılım sağlamak için önem arz etmektedir. Operatör şebekeleri geniş ölçekte çeşitli katmanlardan ve bu katmanlar içerisinde farklı fonksiyonları adresleyen çok sayıda bileşenden oluşmaktadır. Temel olarak bu katmanlar Şekil 1.1’de gösterildiği üzere kullanıcı, erişim, iletim ve çekirdek olarak sınıflandırılabilir. Bu katmanlara ilave olarak operatörlerin kendi iç haberleşme alt yapısını oluşturan intranet şebekeleri bulunmaktadır.



Şekil 1.1. Haberleşme ağ altyapılarının katmanları

SDN, NFV gibi teknolojilerin tüm şebekede uygulanarak şebekenin uçtan uca yazılım tabanlı yönetiminin sağlanması hedeflense de, bu ayrıştırmanın sağlayacağı fayda, uygulama zorluğu, yeni servis ihtiyaçları gibi nedenler her katman ve bileşen için ayrı olarak değerlendirildiğinden dolayı operatör şebekelerinde hedeflenen dönüşüm için uygulanacak yeni teknolojilerin olgunluğu, her katman ve bileşen için farklılık göstermektedir. Bu nedenle SDN, NFV gibi teknolojiler farklı katmanlarda farklı bileşenler için zamanla uygulanabilir hale gelmektedir.

Bu çalışmada, operatörlerin en önemli problemlerinden birisi olan tedarikçilere olan bağımlılıklarının azaltılması için açık kaynak kodlu SDN, NFV teknolojilerinin, farklı haberleşme ağ alt yapılarında uygulanarak tedarikçi bağımsız çözümlerin geliştirilmesi ve maliyetlerin azaltılması hedeflenmiştir. Operatör şebekesinde yer alan her katman için çalışmaya konu olan yeni nesil teknolojiler değerlendirilmiş, teknolojilerin olgunluğu, uygulanabilirliği ve operatöre getireceği faydalar göz önünde bulundurulduğunda Şekil 1.2’de gösterildiği gibi mobil ve sabit çekirdek, sabit erişim ve intranet katmanlarını adresleyen uygulamalar yapılmıştır.



Şekil 1.2. Yeni nesil teknolojilerin uygulandığı şebekeler ve diğer uygulama alanları

Bu kapsamda; abone farkındalığına sahip dinamik SFC (Service Function Chaining - Servis Fonksiyon Zinciri) çerçevesi geliştirilerek mobil şebeke altyapısında uygulanması, açık kaynak kod kullanılarak oluşturulmuş SDN tabanlı geniş bant erişim teknolojisi olan SEBA'nın sabit şebeke altyapısında kullanılması ve yine açık kaynak kod kullanılarak geliştirilen SDN tabanlı platformun intranet şebeke altyapısında uygulanarak geleneksel ağlarda yaşanan zorlukların ortadan kaldırması amaçlanmıştır. Aynı zamanda gelecek çalışmalara ışık tutmak adına diğer katmanlarda (mobil erişim, sabit ve mobil iletim) uygulanabilecek yeni nesil teknolojiler de incelenmiştir.

Bu tez çalışmasının 2. bölümünde operatörlerin ihtiyaç duyduğu dönüşümü gerçekleştirebilmelerinde en önemli rolü oynayacak olan yeni nesil teknolojiler (SDN, NFV, uç nokta bilişim, uç nokta bulut) ve getirdiği yenilikler sunulmuştur. Bu çalışma kapsamında önerilen çözümlerde açık kaynak kodun kullanılma nedenleri, faydaları, açık kaynak kod toplulukları ve kullanıldığı alanlar 3. bölümde ele alınmıştır. Yeni nesil servis gereksinimleri, şebekelerin dönüşüm ihtiyaçları ve bu dönüşüme ihtiyaç duyan haberleşme sistemlerinin ağ altyapılarına 4. bölümde yer verilmiştir. Geliştirilen abone farkındalığına sahip dinamik servis fonksiyon zinciri, SDN tabanlı intranet platform ve açık kaynak kod kullanılarak oluşturulmuş SEBA'nın deneysel bulgularını içeren şebeke uygulamaları 5. bölümde açıklanmıştır. 6. bölümde gelecek çalışmalara katkıda bulunabilmek adına bu çalışmada adreslenmeyen ancak farklı katmanlarda uygulanabilecek yeni nesil teknolojilere yer verilmiştir. 7.bölümde ise elde edilen sonuçların değerlendirilmesi ve öneriler sunulmuştur.

2. YENİ NESİL TEKNOLOJİLER

Günümüzün ağ altyapıları, donanım kurulum ve bakım maliyetlerini azaltmak ve sürekli artan hizmet taleplerini ölçeklenebilir ve esnek şekilde karşılayabilmek için yeni nesil sanallaştırma teknolojilerine yönelmektedir [4]. Bu bölümde sanallaştırmanın tarihçesi, SDN/NFV teknolojilerinin mimari yapısı, getirdiği yenilikler ile uç nokta bilişim ve uç nokta bulut teknolojilerine yer verilmiştir.

2.1. Sanallaştırma Tarihi

Sanallaştırma sistemleri; kurulum, yönetim, bakım, süreklilik, esneklik ve bütçeleme gibi konulara farklı bir bakış açısı getiren sistemler olup faydalarını anlayabilmek, ne tür bir potansiyeli olduğunu kavrayabilmek için tarihi gelişimini incelemek gerekmektedir. Bu kapsamda ilgili çalışmalar incelendiğinde;

1998'de VMware, bir zamanlar imkansız olduğu düşünülen x86 platformunun nasıl sanallaştırılacağını çözmüş ve x86 sanallaştırma pazarını oluşturmuştur. Çözüm, çok sayıda işletim sisteminin aynı bilgisayarda kolayca erişilebilir sanallaştırma yükü ile tam olarak çalışmasına izin veren işlemci üzerinde doğrudan yürütmenin bir kombinasyonundan oluşmaktaydı [5]. Sanallaştırma, konuk işletim sistemi ile temel donanım arasında genellikle hipervizör veya VMM (Virtual Machine Manager - Sanal Makine Monitörü) adı verilen bir sistem yazılımı katmanı eklenerek gerçekleştirilebilmektedir. En yaygın sanallaştırma formlarında, böyle bir katman, temel donanım platformunun mimarisinin yazılım benzetimiyle oluşturulmaktadır [6].

CPU'yu x86 mimarisinde sanallaştırmak için hassas ve ayrıcalıklı talimatları işlemek için ikili dönüşüm kullanarak tam sanallaştırma, işletim sistemi destekli sanallaştırma, donanım destekli sanallaştırma olmak üzere üç alternatif teknik bulunmaktadır [5]. Tam sanallaştırma, hassas ve ayrıcalıklı yönergeleri sanallaştırmak için donanım desteği veya işletim sistemi desteği gerektirmeyen tek seçenektir. Hipervizör, tüm işletim sistemi talimatlarını anında çevirir ve sonuçları gelecekteki kullanım için önbelleğe alırken kullanıcı seviyesi talimatları doğal hızda değiştirilmemiş olarak çalışmaktadır. Tam sanallaştırma, sanal makineler için en iyi yalıtımı ve güvenliğini sunar ve aynı konuk işletim sistemi örneğinin sanallaştırılmış

veya yerel donanımda çalışabilmesi nedeniyle geçişi ve taşınabilirliği basitleştirmektedir. VMware'in sanallaştırma ürünleri ve Microsoft Virtual Server tam sanallaştırmanın örnekleridir [5].

Sanallaştırma, altyapı ve bakım maliyetlerini azaltmaya yardımcı olabilecek bilgi teknolojilerinden biri olarak görülmektedir. Arıza süresini önemli ölçüde azaltmak, esnekliği artırmak, donanımı etkin kullanmak, genel sistem karmaşıklığını azaltmak için düşük maliyetli bir yol olarak kabul edilmektedir [7]. Açık kaynak geliştiricileri topluluğu, FreeBSD Jails, User Mode Linux ve Xen dahil olmak üzere çeşitli çevreleme ve sanallaştırma çözümlerine katkıda bulunmuştur. Bu yaklaşımlar güvenlik modellerinde büyük farklılıklar göstermektedir. Xen gibi olanlar, sistem donanımına ve ham disk aygıtlarına doğrudan erişilmesine izin vererek, çevreleme modellerinin bütünlüğünü tehlikeye atabilmektedir [8].

VDI (Virtual Desktop Infrastructure - Sanal Masaüstü Altyapısı), sanal masaüstlerini sağlamak ve yönetmek için sanal makinelerin kullanımını ifade etmektedir. VDI, masaüstü ortamlarını merkezi bir sunucuda barındırmakta ve istek üzerine bunları son kullanıcılara dağıtmaktadır. VDI'da bir hipervizör, sunucuları sanal makinelere ayırmakta ve bu da kullanıcıların cihazlarından uzaktan eriştikleri sanal masaüstlerini barındırmaktadır. Kullanıcılar bu sanal masaüstlerine herhangi bir cihazdan veya konumdan erişebilmekte ve tüm işlemler ana sunucuda yapılabilir. Kullanıcılar masaüstü örneklerine, kullanıcı ile sunucu arasında aracı görevi gören yazılım tabanlı bir ağ geçidi olan bir bağlantı aracısı aracılığıyla bağlanmaktadır [9].

KVM (Kernel-based Virtual Machine - Çekirdek Tabanlı Sanal Makine) sanallaştırma uzantıları (Intel VT veya AMD-V) içeren x86 donanımında Linux için tam bir sanallaştırma çözümü teşkil etmektedir [10]. ARM CPU'ları mobil cihazlarda ve sunucularda giderek yaygınlaştıkça, ARM tabanlı cihazlar için sanallaştırmanın faydalanma konusunda artan bir talep bulunmaktadır. KVM / ARM, bir hipervizörün CPU modları arasında bölünmesine ve Linux çekirdeğine entegre olmasına izin veren bölünmüş mod sanallaştırmasını sunmaktadır [11].

Artan ihtiyaçlar ve teknolojinin sürekli gelişmesiyle haberleşme sektörü de önemli dönüşümler yaşamıştır. Analog haberleşmeden IP tabanlıya; 2G teknolojilerinden 5G'ye,

sabit ve mobil şebeke yakınsaması haberleşme sektörünü bugünlere kadar getirmiştir. Sanallaştırma teknolojileri ve bulut bilişimin hızla gelişmesi haberleşme sektörünü yeni bir dönüşüm sürecine, ağ altyapısının da sanallaştırılmasına doğru sürüklemektedir. Söz konusu dönüşümün temel yapı taşları ise SDN ve NFV teknolojileri olarak karşımıza çıkmaktadır.

2.2. SDN / NFV Teknolojilerinin Gelişimi

Geleneksel ağlar, tedarikçiye özgü donanım ve yazılım platformlarına dayanan amaca yönelik olarak oluşturulmuş ağ ekipmanları (örneğin yönlendiriciler, ethernet anahtarları, güvenlik duvarları, yük dengeleyiciler vb.) ile tasarlanmıştır. Bu yekpare ağ öğelerinin kullanılmasının, uzun geliştirme ve kurulum döngüleri, yeni ürün ve hizmetler için pazara çıkış süresini yavaşlatma, aşırı karmaşık yaşam döngüsü yönetimi uygulamaları ve artan yatırım düzeyleriyle sonuçlandığı bilinmektedir.

Bir operatörün ağı kontrol, yönetim ve veri işlevlerinin fiziksel olarak birbirine bağlandığı ve iç içe geçmiş ağ öğelerinin her birinin aynı tedarikçi tarafından sağlandığı çeşitli paket ağ öğelerinden oluşmaktadır [1]. Bu geleneksel yapı ağın yönetimi, işletimi, bakım ve yeni servis devreye alma gibi pek çok alanda zorluğa ve karmaşaya neden olmaktadır. Operatörler bu zorlukları aşmak için yenilikçi teknolojiler kullanarak dönüşüme ihtiyaç duymaktadırlar.

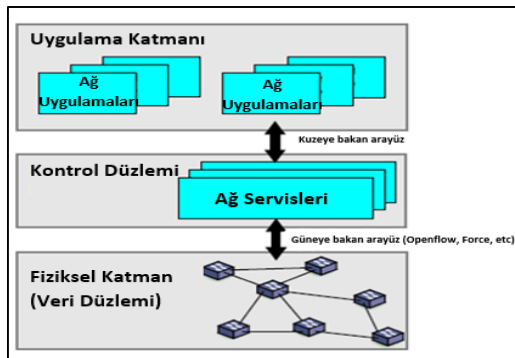
Yenilikçi teknolojiler ve mimariler sayesinde ağ tasarımı ve ağ altyapısının yönetimi son zamanlarda gelişmeye başlamıştır. Bu yeniliğin yanı sıra, hizmet sunumu da hızlı ilerleme sağlamıştır. SDN ve NFV bu gelişimin en önemli teknolojileridir. SDN bu yenilikçiliğin temel taşlarından biri olmuştur. SDN temelde kontrol ve veri düzlemlerinin ayrıştırılmasını açık ve standart ara yüzler kullanarak sağlamakta ve bu sayede ağların merkezi olarak yönetilebilmesi ve programlanabilmesine imkan tanımaktadır [12]. NFV ise sanallaştırma teknolojileri sayesinde donanım ile yazılım katmanını ayrıştırarak özel donanım bağımlılığını ortadan kaldırmaktadır. SDN ve NFV teknolojilerinin her biri diğerinin esnekliğini, hizmet sunumunu ve ağları basitleştirme işlevlerini geliştirmektedir. Bu amaçla aralarında yeni mimari ve ara yüzler tanımlanmaktadır. SDN ve NFV, 5G ağlarını gerçekleştirebilmek için de en öncü teknolojilerden olmuştur [13].

NFV ve SDN teknolojileri hem sabit hem de mobil ağ altyapılarındaki herhangi bir veri düzlemi paket işleme ve kontrol düzlemi işlevine uygulanabilmektedir. Bu teknolojiler mevcut ağların gelişimini anlamak içinde anahtar kavramlar haline gelmişlerdir. Bu bağlamda telekom operatörleri son yıllarda bilgi teknolojileri sektöründe yürütülen yenilikleri aşamalı olarak benimser hale gelmiştir [14].

ONF (Open Network Foundation - Açık Ağ Oluşturma topluluğu), SDN ve NFV arasındaki ilişkiyi [15] ve ETSI'nin (European Telecommunications Standards Institute - Avrupa Telekomünikasyon Standartları Enstitüsü) NFV içerisinde SDN kullanımı mimarisini [16] içeren ayrıntılı kapsayan raporunu yayınlamıştır. Bu rapora göre NFV ve SDN kavramlarının birbirlerini tamamlayan iki farklı teknoloji olduğu vurgulanmaktadır. ONF [17], SDN ve NFV alanında aktif çalışmalar sürdürmekte olup bu teknolojilerin ağ servislerini dinamik bir şekilde yönetebildiğini göstermiştir.

2.2.1. SDN temel unsurları

Günümüzde en çok kabul gören SDN tanımı, ONF'in yaptığı tanımlamadır. Buna göre SDN mimarisi Şekil 2.1' de gösterildiği gibi üç katmandan oluşmaktadır. En alttaki katman veri düzlemi olarak adlandırılan katman olup yönlendirici, anahtar gibi altyapı elemanlarını içermektedir. Orta katman kontrol düzlemini göstermekte olup yönlendirme düzleminin programlanması ve yönetiminden sorumludur. Kontrol düzlemi ile veri düzlemi arasında iletişimi sağlayan en çok kullanılan protokol olan Openflow protokolüdür. Uygulama katmanını yeni ağ özelliği sunabilen ağ uygulamalarını (güvenlik, yönetilebilirlik vb.) içermektedir [18].



Şekil 2.1. Üç katmanlı SDN mimarisi

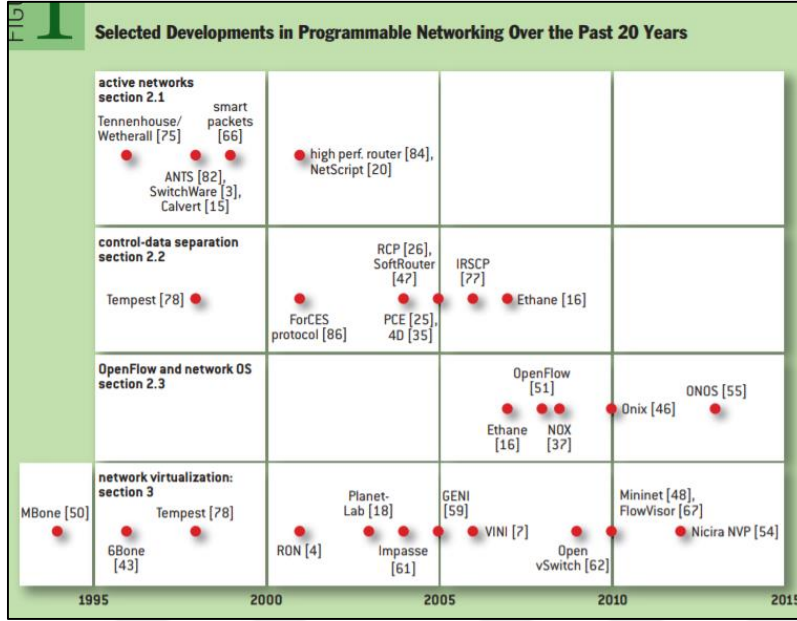
ETSI tarafından hazırlanan NFV mimari çerçevesi [19] aynı zamanda sanallaştırma teknolojilerinin ağ fonksiyonlarına uyarlanması ile donanım tabanlı uygulamalardan yazılım tabanlı uygulamalara geçiş konusunda ivme kazandırmıştır. SDN kavramının temelinde, veri düzlemi ile kontrol düzlemin birbirinden ayrılması ve merkezi bir kontrolcüden tüm ağı yönetebilmek yer almaktadır. Yazılım bütün ağı görüp üzerinde değerlendirme yapabilecek ve karar verebilecek şekilde merkezi bir noktaya çekilip veri düzlemi de ayrı bir yerde tutulmaktadır. SDN'in sağladığı avantajlar olarak;

- Ağın sadeleştirilmesi,
- Ağ kontrolünün geliştirilmesi,
- Esnek ve verimli ağ yönetimi sağlanması,
- Gelişmiş ağ hizmeti performansı sunması olarak sıralanabilir.

SDN teknolojisinin gelişimini dört bölüme ayırmak mümkündür.

- Aktif ağlar (1990'ların ortasından 2000'lerin başına), daha fazla yeniliğe öncülük etmek için ağda programlanabilir fonksiyonlara odaklanmıştır.
- Kontrol ve veri düzlemi ayrımı (2001-2007 yılları arasında), kontrol ve veri düzlemleri arasında açık ara yüzler oluşturularak geliştirilmiştir.
- Openflow uygulama programlama ara yüzü ve ilk yaygın olan ağ işletim sistemleri (2007'den 2010'a kadar) açık bir ara yüzü benimsemiş, kontrol ve veri düzlemi ayrımını daha ölçeklenebilir halde geliştirmiştir.
- Ağ sanallaştırması, SDN'in tarihsel gelişiminde önemli bir rol oynamıştır.

Şekil 2.2, son 20 yılda programlanabilir ağ iletişimindeki seçilmiş gelişmeleri ve ağ sanallaştırmasındaki ilerlemelerle kronolojik ilişkileri (ilk başarılı SDN kullanım durumları) göstermektedir [20].



Şekil 2.2. SDN'in gelişimi

SDN teknolojisi ile birlikte şebeke ağlarını tasarlamak ve yönetmek daha kolay hale gelmiştir. Bu teknoloji aniden ortaya çıkmış gibi görünse de aslında bilgisayar ağlarını daha programlanabilir hale getirmeye çalışmanın uzun bir geçmişinin bir parçasıdır. Bilgisayar ağları karmaşıktır ve yönetilmesi zor olup yönlendiricilerden ve anahtarlardan güvenlik duvarları, ağ adresi çeviricileri, sunucu yük dengeleyicileri ve saldırı tespit sistemleri gibi orta kutulara kadar birçok türde ekipman içermektedir. Yönlendiriciler ve anahtarlar, genellikle kapalı ve karmaşık, dağıtılmış kontrol yazılımı çalıştırmaktadır. Ağ yöneticileri genellikle tedarikçiler arasında ve hatta aynı tedarikçinin farklı ürünleri arasında değişen yapılandırma arabirimlerini kullanarak tek tek ağ aygıtlarını yapılandırmaktadırlar. Bazı ağ yönetim araçları ağı yapılandırmak için merkezi bir bakış açısı sunsa da, bu sistemler yine de bireysel protokoller, mekanizmalar ve konfigürasyon ara yüzleri seviyesinde çalışmaktadır. Bu çalışma şekli yenilikçi yaklaşımları yavaşlatmış, karmaşıklığı artırmış ve bir ağın işletilmesinin hem tedarik hem de bakım maliyetlerini yükseltmiştir [20].

SDN, ağların tasarlanma ve yönetilme şeklini değiştirmekte olup iki önemli özelliği bulunmaktadır. İlk olarak, SDN kontrol düzlemini (trafiğin nasıl ele alınacağına karar veren) veri düzleminden (kontrol düzleminin verdiği kararlara göre trafiği ileten düzlem) ayırmaktadır. İkinci olarak, SDN tek bir yazılım kontrol programının birden fazla veri düzlemi elemanını kontrol etmesi için kontrol düzlemini birleştirmektedir. SDN kontrol düzlemi, ağın veri düzlemi öğelerindeki (yönlendiriciler, anahtarlar ve diğer orta kutular)

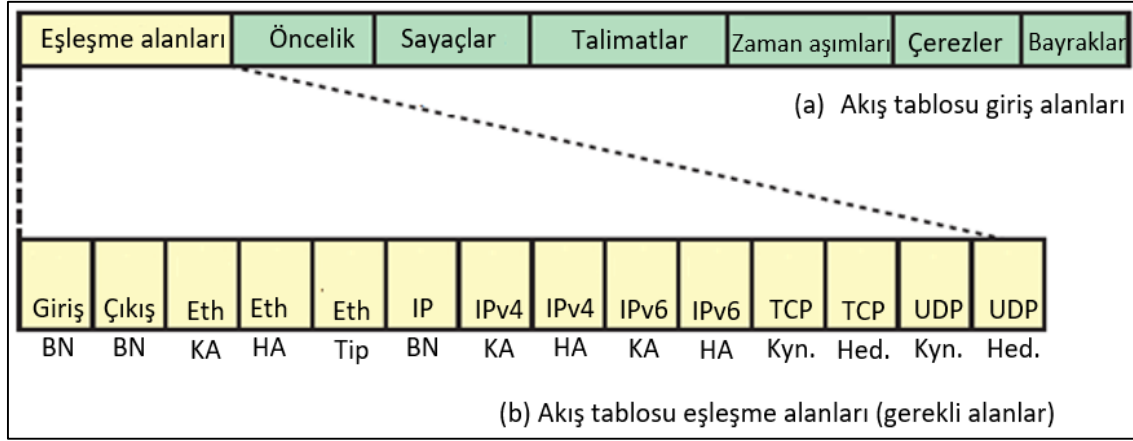
durum üzerinde iyi tanımlanmış bir uygulama programlama ara yüzü aracılığıyla doğrudan kontrol sağlamaktadır. Openflow böyle bir uygulama programlama ara yüzünün önemli bir örneğini teşkil etmektedir. SDN, sektörde gittikçe daha fazla önemli hale gelmektedir. Birçok ticari anahtar Openflow uygulama programlama ara yüzünü destekler hale gelmiştir. Birçok farklı SDN kontrolcü platformu ortaya çıkmıştır.

SDN teknolojisi kurulum ve bakım maliyetlerinde ciddi düşüş sağlarken aynı zamanda daha çevik operasyonu beraberinde getirmekte ve tedarikçi bağımlılığını azaltmaktadır. Bu yönüyle SDN, açık kaynak topluluklarını ve standartları çok ciddi şekilde etkilemiştir [21]. Açık kaynaklı SDN teknolojilerinin en önemli iki bileşeni Openflow ve OVS (Open Virtual Switch - Açık Sanal Anahtar) 'ten oluşmaktadır.

Openflow: Openflow, ONF konsorsiyumu tarafından açık kaynak olarak geliştirilen ve veri katmanının kontrol katmanı ile iletişimde kullanılan teknolojidir [22]. Ethernet anahtarlar ve yönlendiricilerin işlevleri (ağ adres çevirici, servis kalitesi, güvenlik duvarı vb.) yerine getirebilmek ve istatistik toplayabilmek için akış tablosu bulunmaktadır. Her tedarikçinin akış tablosu farklıdır. Openflow birçok anahtar ve yönlendiricide çalışabilen ortak işlev setleri tanımlamaktadır. Openflow, farklı anahtar ve yönlendiricilerde akış tablosunu programlayabilmek için açık protokol sağlamaktadır. Openflow destekli bir anahtar da en az üç bileşen olmalıdır [23]. Bunlar,

- Akışı nasıl işleyeceğini anahtara ileten akış tablosu,
- Anahtarı uzak kontrolcü ile bağlantı kurmasını sağlayan güvenli kanalı,
- Kontrolcü ile anahtarın haberleşmesi için açık ve standart prosedürleri tanımlayan Openflow protokolüdür.

Openflow protokolünün paket başlığı içeriği Şekil 2.3'de yer verilmiştir [24]. Şekilde bir takım kısaltmalar kullanılmakta olup BN (bağlantı noktası), KA (kaynak adres), HA (hedef adres), Kyn (kaynak), Hed(hedef) şeklinde ifade edilmiştir.



Şekil 2.3. Openflow paket yapısı

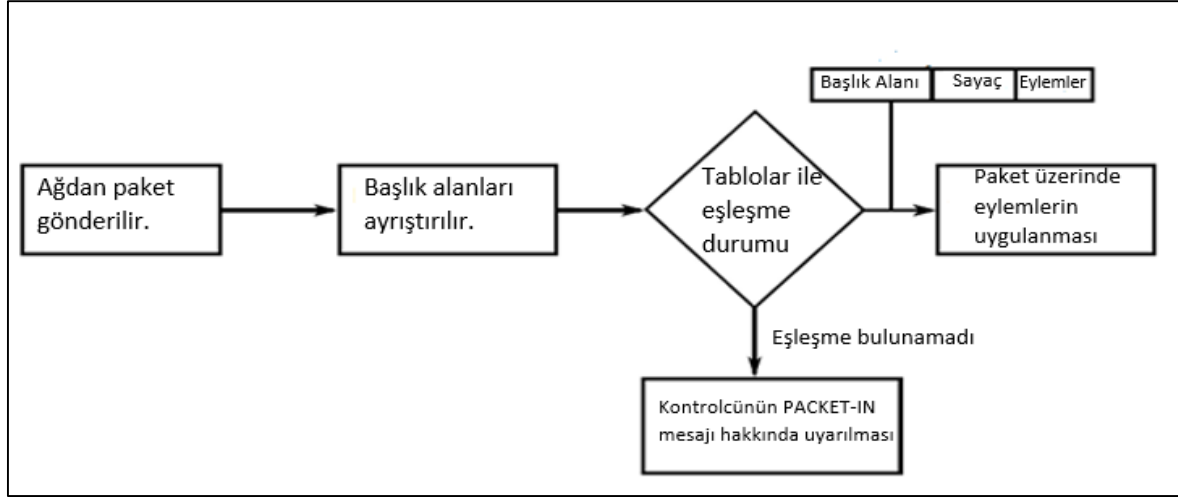
Openflow protokolü kontrolcü tarafından uç cihazların akış tablolarına ilişkin ekleme, güncelleme ve silme işlemlerini ve istatistik toplama fonksiyonlarını sağlamaktadır. Aşağıdaki iletişim tipleri desteklenmektedir [25].

Kontrolcüden anahtara: Bu mesajlar genellikle kontrolcü tarafından başlatılmaktadır. Kontrolcü bu mesajlar ile anahtarın mantıksal durumunu (konfigurasyon, akış ve grup tabloları) yönetmektedir. Ayrıca anahtar kendisine gelen paketi ne yapması gerektiğini kontrolcüye sorduğunda paket yönlendirilmesi, gerektiğinde ilgili aksiyon bilgisini anahtara iletmektedir.

Asenkron: Bu tür mesajlar kontrolcü tarafından talep edilmeksizin gönderilmektedir. Bu mesajlar kontrolcüye gönderilmek üzere çeşitli durum mesajlarını içermektedir. Ayrıca akış tablosu eşleşmesi olmadığında anahtarın kontrolcüye olan sorgusu da bu tür mesajlaşma kapsamına girmektedir.

Simetrik: Bu mesajlar, herhangi bir kontrolcü veya anahtar tarafından istenmeden gönderilmektedir. Mesaj türleri; ilk bağlantı kurulması için kullanılan başlangıç mesajlarının yanı sıra gecikme, bant genişliği ve ya cihaz ayakta sorgusu için kullanılan yankı talebi (echo request) mesajlarını kapsamaktadır. Ayrıca deneyci (experimenter) mesajı, gelecekteki Openflow sürümlerine inşa edilecek özellikleri uygulamak için kullanılması planlanmaktadır.

Openflow ile oluşturulan ağlarda temel paket iletim akışına Şekil 2.4'te yer verilmiştir [22].



Şekil 2.4. Paket iletim akışı

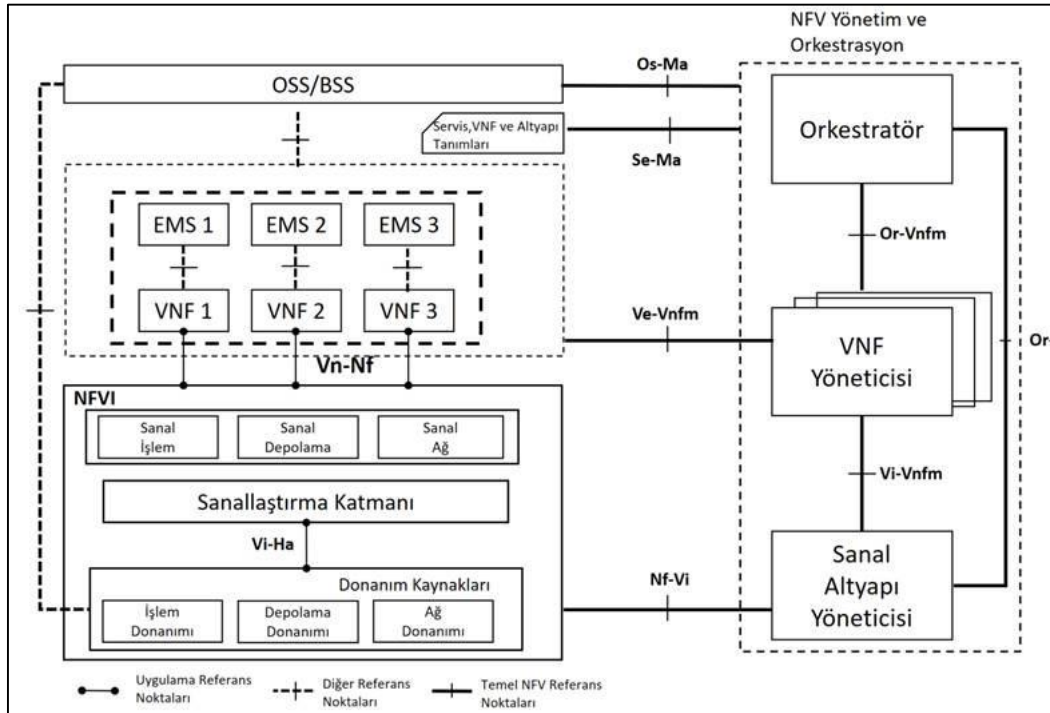
Bu paket iletim akışına göre; anahtar paketi aldıktan sonra paket başlığını ayrıştırmaktadır. Akış tablosu ile eşleşme durumunu kontrol etmekte eğer akış tablosunda ilgili girdi bulunursa anahtar akış tablosu tarafından belirtilen eylemleri gerçekleştirmektedir. Aksi takdirde, paket üstbilgisiyle eşleşen akış tablosu girişi yoksa anahtar kontrolcüye paket hakkında bildirimde bulunmaktadır. Kontrolcü ile anahtar arasında oluşan akışlar aşağıdaki adımlardan oluşmaktadır.

- Kontrolcü ve anahtar arasında merhaba (hello) mesajlaşması olur.
- Kontrolcü akış bazlı olarak paket başlık (header) bilgisini talep eder.
- Kontrolcü daha sonra anahtar konfigürasyonunu talep eder.
- Kontrolcü akış bazlı olarak paket başlığı içindeki alanlara göre aksiyon belirler ve mevcut konfigürasyonla karşılaştırarak değişiklik gerekli ise anahtara konfigürasyon güncellemesi iletir.
- Anahtar gelen güncelleme ile akış tablosunu günceller.
- Son olarak kontrolcü LLDP (Link Layer Discovery Protocol - Bağlantı Katmanı Keşif Protokolü) ile topoloji ve istatistik bilgilerini talep eder.

OVS: OVS'in mantıksal yapısı Şekil 2.5'te görüleceği üzere geleneksel anahtar yapısından farklıdır. Geleneksel yapıda bulunan IP, MAC (Media Access Control Address – Fiziksel Adres) tablolarının yanı sıra 2. ve 3. katman protokoller de kullanılmaktadır.

SDN teknolojisi kontrol ve yönlendirme fonksiyonlarını ağın merkezi olarak yönetilmesi için ayrıştırırken, NFV ise öncelikle ağ fonksiyonlarının donanımdan ayrıştırılmasına odaklanmaktadır. Her iki teknoloji de bulut bilişim, 5G ve geliştirmeleri, veri merkezi ağı, SD-WAN (Software-Defined Wide Area Networking - Yazılım Tanımlı Geniş Alan Ağı) gibi teknolojilerin çok önemli bileşenlerini oluşturmaktadır.

NFV mimari yapısı: ETSI, NFV teknolojilerini geliştirmek ve ortak bir referans mimarisi oluşturmak için ISG NFV'yi (Industry Specification Group for Network Functions Virtualization - Ağ İşlevlerinin Sanallaştırılması için Endüstri Standartizasyon Grubu) kurmuştur [30]. ETSI organizasyonu, NFV için Şekil 2.6'da gösterilen mimari çerçeveyi hazırlamıştır [31]. Bu OSS (Operations Support System - Operasyon Destek Sistemi) / BSS (Business Support System - İş Destek Sistemi), VNF (Virtual Network Function - Sanal Şebeke İşlevleri), NFVI (Network Functions Virtualization Infrastructure - Şebeke İşlevlerini Sanallaştırma Altyapısı) ve MANO (Management and Orchestration - Yönetim ve Orkestrasyon) katmanlarından oluşmaktadır. ETSI'nin hazırladığı NFV mimarisi sanal teknolojilerden faydalanarak ağ işlevlerini donanımdan yazılıma transfer edilmesini sağlamaktadır [19].



Şekil 2.6. ETSI tarafından hazırlanan NFV mimari çerçevesi

ETSI tarafından hazırlanan NFV mimari çerçevesi aşağıdaki bileşenlerden oluşmaktadır.

OSS/BSS: OSS; operatörün verdiği servisleri izlemesi, kontrol etmesi, analiz etmesi böylelikle yönetebilmesi için imkan veren yazılımdır. BSS ise müşteriye dönük olan ara yüz olup faturalama, sipariş, servis garantisi, müşteri ilişki yönetimi gibi öğelerden oluşmaktadır.

Eleman Yönetim Sistemi: Ağ elemanlarını yönetmek için gerekli uygulamalardan oluşan sistemdir.

VNF: NFV teknolojisinin merkezinde VNF kavramı vardır. VNF, donanımdan bağımsız olarak NFVI kurulabilen ağ fonksiyonlarının yazılım uygulamaları olarak tanımlanmaktadır. VNF'ler yük dengeleme, güvenlik duvarı gibi belirli ağ fonksiyonlarını sanal olarak yapmaktadır. VNF'lar sanal makineler üzerinde çalışmaktadır.

NFVI: NFV, sanallaştırılmış ağ fonksiyonlarını oluşturabilmek için veri işleme (compute), depolama ve ağ kaynakları standartlarını tanımlamıştır. NFVI, sanal ağların üzerine kurulduğu donanım ve yazılım bileşenlerini tanımlamaktadır. NFVI, sanal veya fiziksel sunucular ile birlikte çalışabilmektedir. NFVI standartları çoklu tedarikçiden alınacak farklı VNF'lerin birlikte çalışmasına imkan vermektedir.

MANO: NFV MANO referans mimarisi ETSI 'nin ISG NFV grubu tarafından tanımlanmıştır. VIM (Virtualized Infrastructure Manager - Sanallaştırılmış altyapı yöneticisi), NFVO (Network Function Virtualization Orchestrator - Ağ İşlevleri Sanallaştırma Orkestratörü) ve VNFM (Virtual Network Function Manager - Sanal Şebeke Fonksiyonu Yöneticisi) temel bileşenlerini oluşturmaktadır. Sanallaştırma işlemlerinin yönetilip kontrol edilmesini sağlayan yazılım bütünüdür.

VIM: VIM, NFVI alt yapısındaki sanallaştırılmış hesaplama, ağ, depolama kaynaklarını denetlemekten ve yönetmekten sorumlu olan bileşendir. NFVI'daki fiziksel kaynaklardan sanal makinalar yaratılması, bakımı ve kaldırılması gibi yaşam döngü işlemlerini yönetmektedir. Bunlara ilave olarak aşağıda belirtilen özellikleri bulunmaktadır.

- VIM katmanı, sanal bağlantılar, ağlar, alt ağlar ve bağlantı noktalarını düzenleyerek VNF yönlendirme işlevini yerine getirmektedir. İlave olarak erişim kontrolünü sağlamak için güvenlik grubu politikalarını yönetmektedir.
- Donanım, yazılım ve sanal kaynaklarının performans ve hata yönetimini yapmaktadır.
- Yazılım imajlarını yönetmektedir (ekleme, silme, güncelleme, sorgulama).

NFVO: NFVO, NFV MANO mimari çerçevesinin en önemli bileşini olup VIM'in sağlamış olduğu arabirimleri kullanarak kaynakların ve ağ servislerinin orkestrasyonunu yapmaktadır. Sanallaştırılmış kaynak yönetim arabirimlerini ve bildirimlerini VNFM bileşeninin kullanımına açmaktadır.

VNFM-: VNFM, NFVO ve VIM ile uyum içerisinde çalışmaktadır. VNF'lerin yaşam döngüsünü yönetmekten sorumludur. Bu kapsamda; VNF oluşturmak, VNF ölçeklendirmek, VNF güncelleme yapmak ve VNF sonlandırmak gibi görevleri yerine getirmektedir. Bir VNFM birden fazla VNF'i yönetebilmektedir. İlave olarak, VNF'lerin hata, konfigrasyon, ücretlendirme, performans ve güvenlik verilerinin yönetimini yapmaktadır.

NFV teknolojisinin sunmuş olduğu faydalar: NFV teknolojisi daha esnek, verimli ve ölçeklenebilir hizmetler için özel ağ cihazları yerine standart ticari sunucuları kullandığı için operatöre aşağıda belirtildiği gibi birçok fayda sağlamaktadır [32-36].

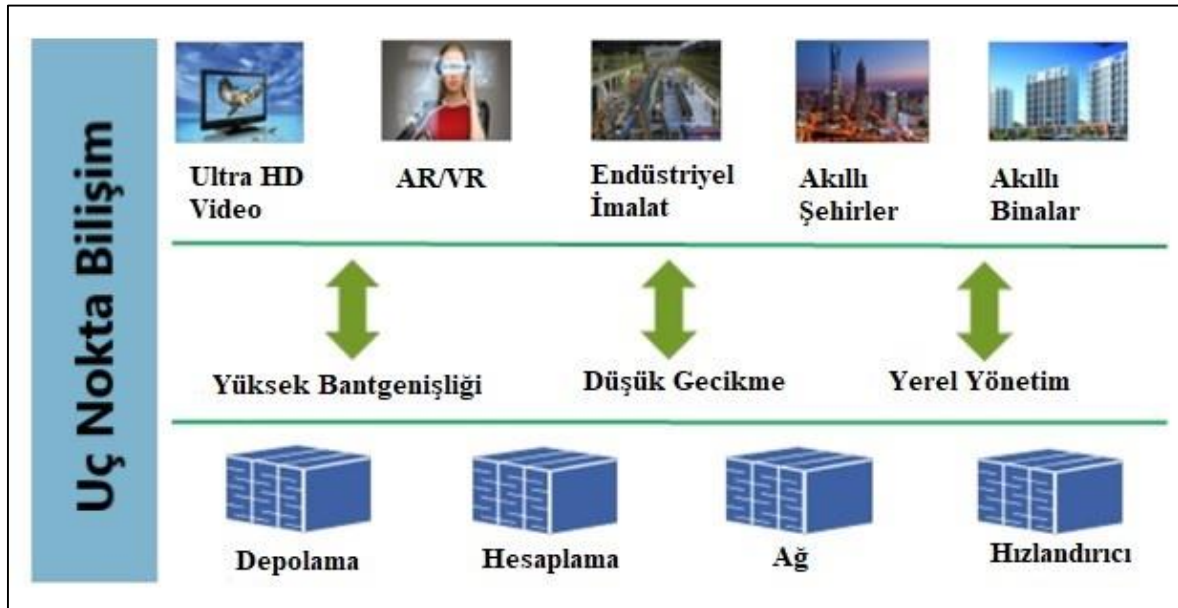
- Geleneksel şebekelerde teknoloji geliştiğinde özel donanıma bağımlı olduğu için donanımlarında fiziksel olarak değişimi gerekirken NFV teknolojisi ile birlikte yazılımın güncellenmesi ya da yamalanması yeterli olmaktadır.
- Alan, güç ve soğutma konularında verimlilik sağlamaktadır.
- Yeni sanal ağ fonksiyonlarının hızlı eklenip çıkarılması sayesinde operatörlerin yeni servis verme süreleri haftalar mertebesinde dakikalar mertebesine düşmektedir.
- Kapasiteyi esnek olarak azaltıp arttırmayı sağladığı için kaynakların verimli şekilde yöneltmesini sağlamaktadır.
- NFV teknolojisi açık ara yüzü standart donanımlar kullandığı için operatörler, donanımı kendi ihtiyaçlarına ve gereksinimlerine uyacak şekilde en verimli şekilde seçme ve inşa etme özgürlüğüne sahip olmaktadır. Böylelikle tedarik ve bakım maliyetleri düşmektedir.

- Operatöre şebeke ve servis yönetiminde tam denetim sağladığı için NFV temelli şebeke servisleri, yönetim ve operasyonu daha basit olarak yapılabilmektedir.
- Sadeleştirilmiş servis kurulum yapısı ve esnek ürün sunumuna imkan sağlamaktadır.

SDN ve NFV teknolojileri ağ altyapısının verimliliğini ve performansının iyileştirilmesine büyük katkıda bulunmasına rağmen, ağ işlevlerinin düşük gecikme, yüksek bant genişliği ve yerelden yönetim ihtiyaçlarını etkin bir şekilde sağlayamamaktadır. Bu noktada uç nokta bilişim (Edge Computing) ve uç nokta bulut (Edge Cloud) gibi yeni nesil teknolojiler kullanılmaktadır.

2.2.3. Uç nokta bilişim teknolojisi

Operatörler açısından kablolu ve kablosuz servis ihtiyaçlarını yüksek yatırım bedellerine katlanmadan karşılamak pek mümkün olmamaktadır. Şekil 2.7’de gösterildiği üzere, uç nokta bilişim platformları tarafından sağlanan depolama, bilişim, ağ ve kaynakların, kablolu ve kablosuz gelecek servis ihtiyaçlarının performans gereksinimlerini sağlayacağı düşünülmektedir. Bu sayede, gelecek servislerin bant genişliği ihtiyacı azaltılabilecek, gerekli düşük gecikme değerlerine ulaşılabilecektir. Mimarinin bu şekilde uca yaklaşması ve birleşik uç nokta bilişim üzerinde kurgulanması tedarik ve bakım giderlerini azaltacaktır.



Şekil 2.7. Uç nokta bilişim yapısı

Gelecekteki hizmetler için gerekli düşük gecikme, yüksek bant genişliği, yerelden yönetim ihtiyaçlarını karşılayabilmek için kontrol düzlemin veri düzleminden ayrılması gerekmekte olup 3GPP (3rd Generation Partnership Project - Üçüncü Nesil Ortaklık Projesi) tarafından 4G ve 5G için gerekli özellikler tanımlanmıştır. Kontrol düzlemi bu sayede veri düzlemini programlayabilir ve bu mimaride veri düzlemi dağıtık olarak konumlandırılabilir. Bu yapı uç nokta bilişim platformu ile entegre edildiğinde geleneksel mobil ağ yapısının neden olduğu sınırlamalar ortadan kalkmakta ve yüksek bant genişliği, düşük gecikme ihtiyaçları sağlanmaktadır.

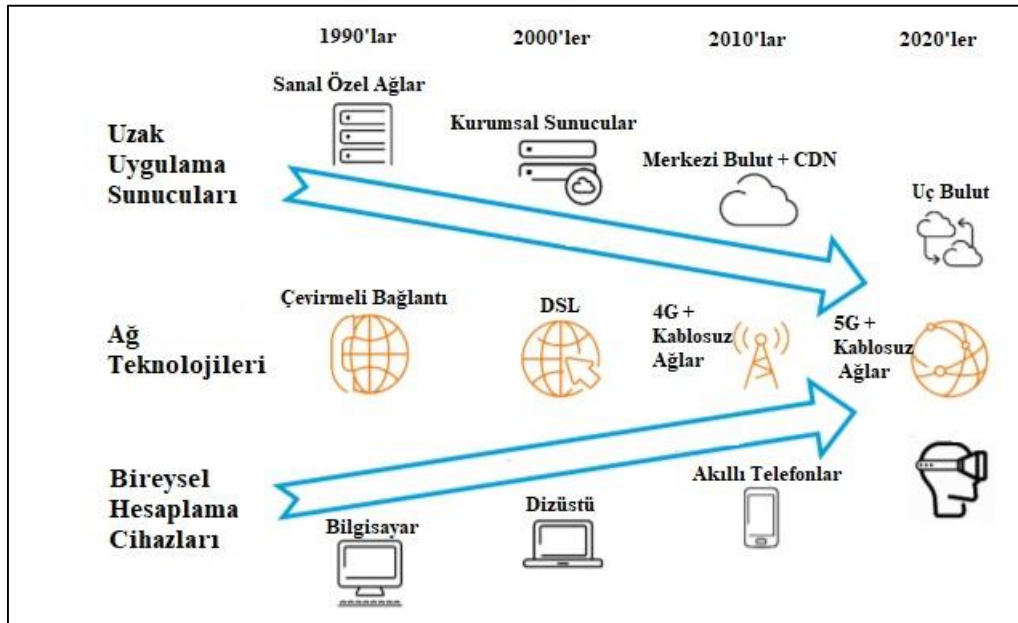
Mobil şebekelere benzer şekilde, sabit şebekelerde gelecek servis ihtiyaçlarını karşılayabilmek için kullanılan ev ağ geçidi, modem, optik hat terminali gibi önemli ağ ekipmanları, kontrol düzlemi ile veri düzleminin ayrılması ilkesiyle gelişimlerini devam ettirmektedir. SDN kontrolcü tarafından yönetilen düzlemlerden, kontrol düzlemi merkezi olarak konumlandırılırken, veri düzlemi dağıtık olarak kullanılmaktadır.

Ağ mimarisinin gelişim ile birlikte, geleneksel kapalı tescilli sistemler yerini standart donanımlar üzerinde çalışan, SDN/NFV teknolojilerinin kullanıldığı, bulut tabanlı, açık sistemlere bırakmaktadır. Yeni mimaride ağ fonksiyonları sanal makine ve konteynirler (containers) üzerinde çalışmakta, MANO tarafından yönetilmektedir. Bu şekilde bilgi teknolojileri ile haberleşme teknolojileri yakınsamakta, haberleşme altyapısını merkezi yaklaşımdan uç nokta bulut yaklaşımına taşımaktadır.

Teknoloji geliştikçe ve yakınsadıkça, bilgi akışı kolaylaşmış, kişisel cihazlar eşzamanlı olarak kullanılabilir olmuş ve hesaplama işlemi sonraki her nesilde daha güçlü hale gelmiştir. Şekil 2.8 'de gösterildiği gibi 1990'larda, telekomünikasyon şirketleri özel noktadan noktaya veri devrelerini ve sanal özel ağ hizmetlerini sunmaya başlamıştır. Bilgisayarlar yaygınlaştıkça, mühendisler ve teknoloji uzmanları, zaman paylaşımı yoluyla büyük ölçekli bulut bilişim gücünü daha fazla kullanıcı için kullanılabilir hale getirmenin yollarını keşfetmişlerdir. 2000'li yıllarda, bulut teknolojisi, internet sayesinde son kullanıcılara kurumsal düzeyde uygulamalar sunmaya başlamıştır. Sonrasında bulut veri merkezleri daha güçlü ve coğrafi olarak dağıtılmış hale gelmiş, ağ teknolojileri ise onları desteklemek için önemli ölçüde daha verimli hale gelmiştir.

Sonuç olarak, uzak uygulama sunucularına erişmek daha kolay hale gelmiş ve daha fazla bilgi, medya ve içerik doğrudan tüketiciye ulaştırılmıştır. İçerik dağıtım ağları içerik erişiminde kritik rol oynamaya başlamıştır.

Son yıllarda artan akış talepleri nedeniyle, büyük içerik sağlayıcıları performansı daha da artırmak ve maliyetlerini azaltmak için yerel ve bölgesel şebeke operatörleri ile doğrudan ticari anlaşmalar yapmaya başlamış ve kendi içeriklerini operatör ağına taşıyarak gecikme değerlerini iyileştirmişlerdir. İçerik dağıtım ağları video gibi statik, önceden tanımlanmış içeriğin kullanıcıya ulaştırılmasını önemli ölçüde sağlarken sanal gerçeklik AR (Augmented Reality - Arttırılmış Gerçeklik) / VR (Virtual Reality - Sanal Gerçeklik) servisleri gibi dinamik içerikler için tasarlanmadıklarından dolayı yetersiz kalmaktadır. Bundan dolayı dinamik olarak düşük gecikme gereksinimlerini karşılamak için büyük bulut sağlayıcıları coğrafi alanlarını genişletmek için veri merkezlerini ağına uç noktalarına daha yakın olacak şekilde konumlandırmaya başlamıştır. Fakat mobil ağlar için radyo hava yolu iletişimi ve ağ kuyruklama ve taşınımın neden olduğu gecikmeler, bu uç bulutların bile gelişmekte olan birçok sınıfın talep edeceği ultra düşük gecikme gereksinimlerini sağlama olasılığı düşüktür. Bu sebeple operatörlerin bulut sağlayıcıların mimarisine benzer bir yapı oluşturması gerekmektedir [37].



Şekil 2.8. Bilgi ve haberleşme teknolojileri yakınsaması tarihi

Söz konusu bilgi ve haberleşme teknolojilerinin yakınsaması kapsamında uç nokta bilişim platformları sanal ağ fonksiyonlarının kurulumunu destekler hale gelmektedir. Buna ilave olarak operatörler bu platformların güvenlik, ağ, depolama, bilişim yeteneklerini üzerine uygulama geliştiricilere açarak uygulamalar geliştirmektedir. Bulut tabanlı uç nokta bilişim platformları operatörlere ağ fonksiyonlarını uç noktaya kurabilmelerini ve sabit/mobil şebeke yakınsamasını yapabilmelerini sağlamaktadır. Böylelikle operatörler sayısal dönüşümü gerçekleştirebilmektedir.

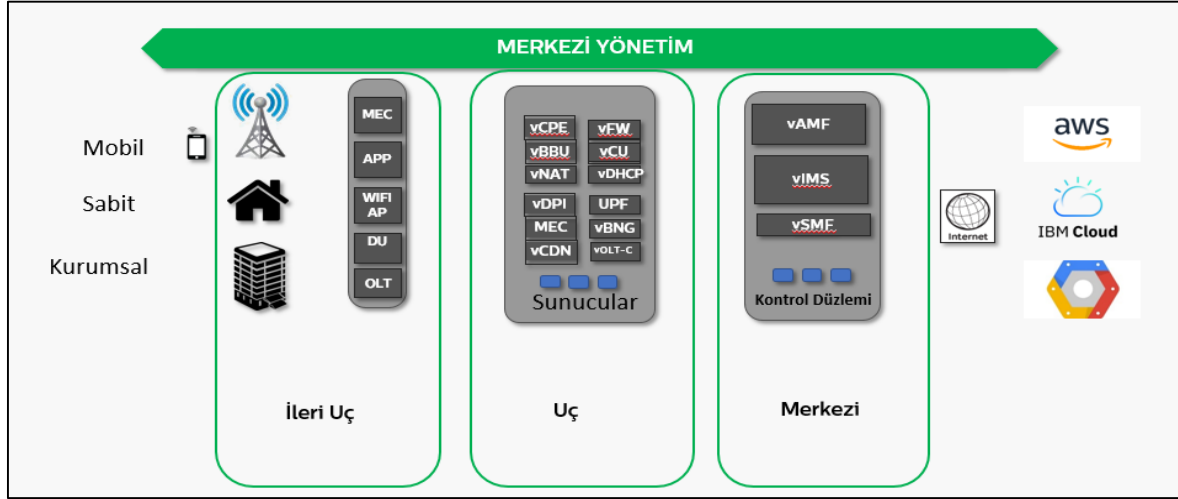
2.3. Uç Nokta Bulut Teknolojisi

Uç nokta bulut mimarisi platformu ONF 'in yürütmekte olduğu CORD (Central Office Re-architected as a Datacenter - Santrallerin Veri Merkezi Olarak Yeniden Tasarlanması) projesinin temellerine oturmaktadır. Bu projenin amacı operatörlerin merkezi ofislerinde bulunan sistemlerini daha çevik servisler verebilmek ve en iyi müşteri deneyimini yaşatabilmek adına dönüştürmektir. Bu dönüşümü SDN/NFV ve bulut teknolojilerini kullanarak merkezi ofisleri, uç veri merkezlerine dönüştürerek yapmaktadır. CORD mimarisine bir çok açık kaynak kod projesi entegre edilerek operatörler için bulut tabanlı, açık, programlanabilir, çevik platformlar oluşturulabilmekte ve bu sayede yenilikçi servisler verilebilmektedir [38].

Bulut tabanlı uç servileri dağıtmak için kontrol düzleminin veri düzleminde etkili bir şekilde ayrılması büyük önem taşımaktadır. Bu ayrım sayesinde, veri düzlemi, gecikme darboğazlarına ve performans engellerine yol açan aşırı yükleri azaltmayı kolaylaştırmak ve aktif yük dengeleme yapmak için dağıtık şekilde konumlandırılabilir. Kontrol düzlemi ise veri düzleminin performansını kontrol ederek ağ hizmetlerinin etkili bir şekilde denetlenmesini ve izlenmesini sağlamaktadır. Böylece bulut tabanlı mimarilerde kullanılan altyapıları SDN ve NFV teknolojilerinin verimliliğinin iyileştirilmesine büyük katkıda bulunmaktadır.

Operatörlerin uç nokta bulut tabanlı mimari kullanması, yaşadıkları problemleri (trafiğin artması, servise verme sürelerinin yüksek olması, maliyetlerinin artması, tedarikçi bağımlılıklar vb.) ortadan kaldırmasına yardımcı olacak dönüşümü yapmasına imkan sağlamaktadır. İlave olarak mobil ve sabit şebekelerin yakınsamasını destekleyerek gelecek yeni servisler için şebekelerini hazırlamasına katkıda bulunmaktadır. Uç nokta bulut

mimarisi Şekil 2.9’da gösterildiği üzere merkezi, uç ve ileri uç olmak üzere üç kademededen oluşmaktadır. Uç nokta bulut mimarisi yerleri seçilirken alan, maliyet, hesap, depolama, karmaşıklık ve güvenilirlik gibi kısıtlayıcı faktörlerin dikkate alınması gerekmektedir.



Şekil 2.9. Uç nokta bulut mimarisi

Merkezi bulut mimarisi: vIMS (Virtual IP Multimedia Subsystem - IP Multimedya Alt Sistemi), SMF (Session Management Function - Oturum Yönetim Fonksiyonu), AMF (Access and Mobility Management Function - Erişim ve Hareketlilik Yönetim Fonksiyonu) gibi ağ elemanlarının kontrol düzlemlerinin yer aldığı veri merkezleridir. Uçtan uca gecikme gereksiniminin 50 ms ‘nin altında olması gereken durumlarda operatörler merkezi bulut sistemlerini konumlandırabilmektedir.

Uç bulut mimarisi: UPF (User Plane Function - Kullanıcı Düzlem Fonksiyonu) , vBNG (Virtual Broadband Network Gateways - Sanal Geniş bant Ağ Geçitleri), vDPI (Virtual Deep Packet Inspection - Sanal Derin Paket İnceleme) gibi ağ elemanlarının veri yer aldığı veri merkezleridir. Uçtan uca gecikme ihtiyacının 10 ms ile 20 ms arasında olduğu durumlarda operatörler uç veri merkezlerini konumlandırabilmektedir. Bu katmanda kullanılan ortak NFVI yapısı üzerine mobil ve sabit şebekelerin sanal ağ fonksiyonları entegre edilip yakınsayan servisler verilebilmektedir.

İleri uç bulut mimarisi: Müşteriye en yakın veri merkezleri olup sabit şebeke servisleri, mobil şebeke servisleri ya da kurumsal müşteri servislerinin ilk sonlandığı noktalardır. Uçtan

uca gecikme ihtiyacının 10 ms altında olduğu durumlarda operatörler uç veri merkezlerini konumlandırabilmektedir.

Merkezi yönetim (uçtan uca orkestrasyon): Uçtan uca orkestrasyon, paketlerin akışını ve iletişim altyapısı boyunca ağ hizmetlerinin performansını sağlamada etkin rol oynamaktadır. Bu sayede, ağ genelinde etkin iletişim için gereken ağ fonksiyonlarının tahsis edilmesi, başlatılması ve etkinleştirilmesi sağlanmaktadır.

Yazılım tanımlı ağların verimliliği, ağ hizmetlerinin yaşam döngüsünü izleyen uçtan uca orkestrasyon yapabilme yeteneklerine bağlıdır. Uçtan uca orkestrasyon, PNF (Physical Network Function- Fiziksel Ağ Fonksiyonları), sanal ağ fonksiyonları, geniş alan ağı için yazılım tanımlı ağlar ve MANO bileşenlerinin entegre edilmesini sağlamaktadır.

3. AÇIK KAYNAK KOD YAKLAŞIMI

SDN/NFV teknolojileri ile birlikte ağlarda yazılım tabanlı kullanım yaygınlaşmakta olup bu noktada sağladığı birçok faydadan dolayı açık kaynak kodlu uygulamaların sayısı ve bu uygulamalara olan güven gün geçtikçe artmaktadır. Açık kaynak kod kullanım temelli projeler, şebeke dönüşümünde belirleyici rol oynayan SDN/NFV teknolojilerinin olgunlaşmasına imkan sağlamaktadır. Bu çalışmada güvenlik başta olmak üzere kolayca erişilebilir olması, geliştirmeye imkan vermesi ve tedarikçi bağımlılığını ortadan kaldırmaya yarayan standart bir yapı sunması nedeniyle açık kaynak kod bileşenlerinden yararlanılmıştır. Bu bölümde açık kaynak yazılımı oluşturan temel unsurlar, açık kaynak yazılımın kullanımının faydaları, açık kaynak yazılımların haberleşme ağ alt yapılarında kullanımı ve öncülük eden açık kaynak kod toplulukları konuları ele alınmıştır.

3.1. Açık Kaynak Yazılımın Temel Unsurları

Bazı yazılımların kaynak kodu tek bir kişiye ya da organizasyona ait olmakta, o yazılımın bakımı, kontrolü yine aynı kişi ya da organizasyon kontrolündedir işte bu yazılım tiplerine tescilli ya da kapalı kod yazılım denilmektedir. Yalnızca tescilli yazılımın orijinal yazarları bu yazılımı yasal olarak kopyalayabilmekte, inceleyebilmekte ve değiştirebilmektedir. Tescilli yazılımı kullanmak için, bilgisayar kullanıcıları (genellikle bu yazılımı ilk kez çalıştırdıklarında görüntülenen bir lisansı imzalayarak), yazılımın yazarlarının açıkça izin vermediği yazılımla hiçbir şey yapmayacaklarını taahhüt etmek zorunda kalmaktadır. Microsoft Office ve Adobe Photoshop tescilli yazılımlara örnektir [39]. Açık kaynak kod ise tamamen farklı bir kavram olup “herhangi yazılım geliştiren bir grubun bir araya gelmesi ve çalışmalarının sonuçlarını açık kaynak kod lisansı adı altında herkesle paylaşması“ olarak tanımlanmaktadır. Katılımın fazla olması açık kaynak kod projelerinin başarısını arttırmaktadır [40].

Açık kaynak lisansları, insanların yazılımı kullanma, çalışma, değiştirme ve dağıtma yöntemlerini etkilemektedir. Genel olarak, açık kaynak lisansları kullanıcılarına açık kaynak yazılımlarını istedikleri herhangi bir amaçla kullanma izni vermektedir. Bazı açık kaynak lisansları, değiştirilmiş bir açık kaynak programı yayınlayan herkesin bu programın kaynak kodunu yanında yayınlaması gerektiğini de şart koşmaktadır.

Ayrıca, bazı açık kaynak lisansları, bir programı değiştiren ve başkalarıyla paylaşan herkesin, programın kaynak kodunu lisans ücreti ödmeden paylaşması gerektiğini de şart koşturmaktadır. Tasarım gereği, açık kaynaklı yazılım lisansları, diğer kişilerin kaynak kodunda değişiklik yapmalarına ve bu değişiklikleri kendi projelerine dahil etmelerine izin verdikleri için işbirliğini ve paylaşımı teşvik etmektedir. İlave olarak bilgisayar programcılarını, başkalarının çalışmalarını paylaştıklarında aynı şeyi yapmasına izin verdikleri sürece, açık kaynak yazılımlarına istedikleri zaman erişmeye, görüntülemeye ve değiştirmeye teşvik etmektedir [39].

Esnek olmayan tescilli yazılım lisansları yüksek tedarik giderleri ve tedarikçi bağımlılığına neden olmaktadır. Tescilli yazılımın kullanımı giderek düşmektedir. Redhat firmasının profesyonellerin katılımı ile yıllık yayınladığı rapora göre, 2019 yılında katılımcıların kullandıkları yazılımın %55'i tescilli özel yazılım iken bu oran 2020 yılında %42'ye düşmüş, 2022 yılında ise bu oranın %32 seviyelerine gerilemesi beklenmektedir [41].

Stallman, Özgür Yazılım Vakfı ile birlikte 1984'te açık kaynak kodun temellerini atan, geleceği şekillendirecek olan bir fikir önermiştir. Anahtar kavram, bilgisayar programlama kodlarına sınırsız erişimin olması, herhangi bir para ödemek zorunda kalmadan herkesin bu kodları kullanabilmesi, değiştirebilmesi ve bu değişikliklerin paylaşılabilmesidir [39, 42].

Temel açık kaynak yazılım felsefesi aslında son derece basittir. Programcılar bir programın kaynak koduna özgürce erişebildiği için bu kaçınılmaz olarak gelişim sağlayacaktır çünkü programcılara arasındaki işbirliği hataları düzeltmeye yardımcı olacaktır [43]. Açık kaynaklı yazılım programcıları, oluşturdukları veya katkıda bulundukları açık kaynaklı yazılımlar için para alabilirler. Ancak bazı durumlarda, açık kaynak lisansı, başkalarına yazılım sattıklarında kaynak kodlarını yayınlamalarını gerektirebileceğinden, bazı programcılar, kullanıcıların yazılımın kendisi yerine yazılım hizmetleri ve desteği için para ödemesini tercih etmektedirler. Bu şekilde, yazılımları ücretsiz sunmakta ve başkalarının yüklemesine, kullanmasına ve sorun gidermesine yardımcı olarak para kazanmaktadırlar [39].

3.2. Açık Kaynak Yazılımın Kullanıldığı Alanlar ve Faydaları

Açık kaynak kodlu projelerin başarısını etkileyen iki önemli faktör bulunmaktadır. İlki yaygın kabul gören bir liderlik ile proje karar sürecini yönetmek, ikincisi ise yazılım geliştiricileri arasında etkili bir koordinasyon mekanizmasının kurulmasıdır [42]. Açık Kaynak kod kullanmasının avantajları aşağıda yer almaktadır [39, 41-43].

- Toplam maliyetleri daha azdır.
- Yazılımın kalitesi daha yüksektir.
- Hızlı ürün geliştirmeyi sağlamaktadır.
- Daha güvenlidir.
- Tedarikçi bağımsız mimari sağlamaktadır.
- Son yeniliklere daha hızlı erişim sağlamaya imkan vermektedir.

Açık kaynaklı teknoloji ve açık kaynaklı düşünme sadece programcılara değil birçok kişiye yarar sağlamaktadır. Örneğin internetin büyük çoğunluğu Linux işletim sistemi ve Apache Web sunucusu uygulaması gibi açık kaynaklı teknolojiler üzerine inşa edilmiştir. Bilgisayar kullanıcıları; web sayfalarını her görüntülediğinde, elektronik postalarını kontrol ettiklerinde, arkadaşları ile sohbet ettiğinde veya çok oyunculu video oyunları oynadıklarında, bilgisayarlarını, cep telefonlarını veya oyun konsollarını yönlendirmek ve iletmek için açık kaynaklı yazılım kullanan küresel bir bilgisayar ağına bağlanmaktadır.

İnsanlar gittikçe daha fazla yerel cihazlarında yapabilecekleri görevleri gerçekleştirirken uzak bilgisayarları tercih etmektedirler. Örneğin, kişisel bilgisayarlarına yüklemelikleri ve çalıştırmadıkları çevrimiçi sözcük işleme, elektronik posta yönetimi ve görüntü düzenleme yazılımlarını kullanabilmektedirler. Bunun yerine, bir web tarayıcısı veya cep telefonu uygulaması kullanarak uzak bilgisayarlardaki bu programlara erişmektedirler. Bunu yaptıkları zaman, uzaktan hesaplama (remote computing) yapmış olmaktadırlar. Küresel bir uzak bilgisayar ağını içeren etkinliklerin (dosyaları depolamak, fotoğraf paylaşmak veya video izlemek gibi) kullanıldığı uzaktan hesaplama kavramı bulut bilişim olarak adlandırılmaktadır. Bulut bilişim, internete bağlı cihazlarla günlük yaşamın giderek daha önemli bir parçası haline gelmektedir. Bulut bilişim platformları açık kaynak veya kapalı

kaynak olabilmektedir. OpenStack, açık kaynaklı bulut bilişim platformuna bir örnek teşkil etmektedir [39].

Açık kaynak kod olgusu Apple, Google, Facebook gibi teknoloji devlerinin ana odak noktasına oturmuş durumdadır ve açık kaynak koda olan güvenleri sürekli artmaktadır [44]. Açık kaynak koda yönelen şirketler sadece bilgi teknoloji şirketleri değil aynı zamanda General Motor, Wallmart gibi birçok şirket yenilikçi ve verimli olmak adına açık kaynak kod kullanımını arttırmışlardır [45].

Açık kaynak kod kullanımı, işe sıfırdan başlamış şirketlerin işlerini geliştirmesinde büyük rol oynamıştır. Örneğin, daha sonra Facebook tarafından satın alınan 19 milyar dolara satın alınan WhatsApp şirketi kuruluşunun ilk günlerinden itibaren açık kaynak kod kullanımına büyük önem vermiştir [46]. Ayrıca, mobil işletim sistemlerinin % 50'den fazlası açık kaynak yazılım kullanmaktadır [47].

3.3. Açık Kaynak Kod Toplulukları

Bu bölümde dünyanın önde gelen açık kaynak kod platform toplulukları ve bünyesinde geliştirilen projeler ele alınacaktır.

3.3.1. ONF

ONF; açık kaynak kodlu ağ tasarım topluluğudur. 2011 yılında kurulmuştur. Amaçları üretici bağımlı kutulardan oluşan ağ tasarım ve ürün sürecinin, herkesin dahil olabileceği, açık kaynaklı üretici bağımsız markasız kutulardan (whitebox) oluşan bir platformda ilettilmesidir. Operatör ihtiyaçları göz önüne alınarak kar amacı güdülmeleyen bir süreç ilettilmektedir. İşbirliğine açık olan her operatör ve üretici bu platformda yer alabilmektedir. ONF ve ON.Lab (Open Networking Lab - Açık Ağ Laboratuvarı) 2016 Ekim ayında ONF ismi altında ON.Lab'ın açık kaynak yazılım geliştirme gücü ve ONF'in standardizasyon çalışmalarını tek bir çatı altında birleştirip SDN tabanlı çalışmaları yürütmek için birleşme kararı almıştır. ONF organizasyonu içerisinde dünyanın önde gelen operatörleri, tedarikçi firmalar, entegratör firmalar, kod geliştiriciler olup 150'den fazla üyeye sahiptir.

Dünyanın en büyük bilgi teknolojileri şirketleri (ör. bulut sağlayıcıları, operatörler, ekipman tedarikçileri ve finansal hizmetler firmaları) Open Daylight [48] ve ONF [49] gibi SDN sektör konsorsiyumlarına katılmıştır.

ONF, SDN ve NFV teknolojilerinin açık kaynak olarak geliştirilmesinde söz sahibi olan toplulukların başında gelmektedir. Açık kaynaklı SDN ve NFV teknolojilerinin hayata geçirilmesinin ve standardizasyonunun hızlandırılmasını amaç edinmiştir. ONF'in kullandığı platformlar tamamen açık kaynak kodlu olup isteyen servis sağlayıcı ve üreticiler kendilerine göre özelleştirebilmektedir. Servis sağlayıcı ve üreticiler ONF'e üye olarak maddi destek ve platform gelişimine destek sağlamaktadır.

Dünyanın önde gelen operatörleri ONF hakkında aşağıdaki görüşleri beyan etmiştir [50].

- Amerika'nın önde gelen operatörü AT&T'nin teknoloji denetçisi Genel Müdür Yardımcılığı görevinde olan Andre Fuetsch, "Yenilikçiliğin önündeki engelleri azaltmak ve piyasaya sürat kazandırmak, SDN'in arkasındaki temel ilkelerdir. ONF; operatör, entegratör ve üreticilerin ötesinde bu prensipleri yerine getirecek konumdadır." beyanında bulunmuştur.
- Google Kıdemli Genel Müdür Yardımcısı olan Urs Hölzle, "Google açık kaynaklı çözümleri yoğun olarak kullanmakta ve bugün açık kaynak pek çok altyapı sorununu çözmektedir. SDN, ağların nasıl inşa edildiğini yeniden yapılandırmak için bir fırsattır. ONF'a, bu eğilimi yönlendirmede ilerlemesine yardımcı olmayı taahhüt ediyoruz." demiştir.
- Japonya'nın en büyük operatörü olan NTT'nin Teknoloji Direktörü olan Dai Kashiwa, "Açık kaynaklı yenilik, SDN'nin potansiyelini en üst düzeye çıkarmak için kritik öneme sahiptir ve gelecekteki ağlarımız için tam açık ağ oluşturma konusunda önemli bir rol oynamaktadır. ONF'i bu görevin merkezi olarak görüyoruz." ifadelerini kullanmıştır.
- Güney Kore'deki SK Telekom Genel Müdürü görevinde olan Alex Choi, "SDN ve NFV, ağ değerini hızlandırmak için hayati öneme sahiptir. ONF'in yazılım tabanlı standartlar etrafındaki yeni tüzüğüne inanıyoruz ve açık inovasyon yoluyla çeşitli yeniliği pazara sunma taahhüdümüz, bizim gibi kuruluşların ağ yeniliklerini hızlandırmalarına izin verecektir." ifadelerini kullanmıştır.

- Amerikan'nın en önemli operatörlerinden olan Verizon Genel Müdür Yardımcısı Srin Kalapala, "Açık kaynaklı yazılım merkezli mimariler, ağ dönüşümlerini hızlandırmaktadır. ONF'in açık ve yenilikçi tasarımları çok sayıda katılımcının etkili bir şekilde işbirliği yapmasına olanak tanır. ONF'in stratejisi, müşterilerin talep ettiği yenilikçi hizmetleri ve uygulamaları sunmak için açık kaynaklı yazılım ve uygulama geliştirme tarafından desteklenen standartlara dayanıyor. Açık kaynak ile sanayiye daha hızlı hareket ettirmeye yardımcı olduğumuzu görüyoruz ve ONF'yi bu hareketin merkezi olarak görüyoruz." beyanında bulunmuştur.

ONF'in yürütmüş olduğu önemli projeler aşağıda yer almaktadır [49].

SEBA: ONF çatısı altında Telekom operatörlerinin şebeke ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla, açık kaynak kod kullanılarak oluşturulmuş sanal sabit erişim şebeke teknolojisidir. Operatörlerin ve üreticilerin SEBA ile belirlenen yeni standart sayesinde ortak altyapı ve mimariden en yüksek faydayı elde etmesi hedeflenmektedir

Tümleşik çoklu erişim bulutu (Converged Multi Acces Cloud): Hem sabit hem de mobil şebekenin sanallaştırılmış tek bir platformda bütünleşmesini amaçlamaktadır.

Açık geliştirmiş mobil çekirdek şebeke (Open mobile evolved core): Açık kod kullanılarak geliştirilen ölçeklenebilir, yüksek performanslı mobil çekirdek şebeke projesidir.

Aether: Herhangi bir şirketin kendi kendine bir 5G/LTE şebekesini hali hazırda bulut altyapıları üzerinde yaratıp yönetebileceği imkanını sağlayan altyapıyı sunmaktadır.

Trellis: Veri merkezlerinde kullanılmak üzere tasarlanmış, bir anahtarlama platformudur. ONF'in ticarileştirilmiş ilk ürünüdür. Buna rağmen Trellis üzerinde halen hata giderimi ve performans arttırmaya yönelik çalışmalar devam etmektedir.

CORD: Uç ağlar için çevik veri merkezleri oluşturmak üzere SDN, NFV ve bulut teknolojilerinden yararlanarak birden çok açık kaynaklı projeyi entegre etmektedir. Telekom operatörlerinin yenilikçi hizmetler verebilmeleri için bulutta özgün, açık, programlanabilir ve çevik bir platform sunmaktadır.

Yazılım tabanlı radio erişim ağı (Software defined radio access network): O-RAN (Open Radio Access Network - Açık Radyo Erişim Şebeke) standartları ile uyumlu, ONOS tabanlı, açık kaynaklı bir akıllı radyo kontrolcüsü uygulamasıdır.

xOS: Servisleri bir araya getirmek, kontrol etmek ve oluşturmak için kullanılan model tabanlı bir platformdur.

Stratum: Yazılım tanımlı ağlar için açık kaynaklı bir anahtar işletim sistemidir.

P4: Paketlerin donanım veya yazılım anahtarı, ağ arabirim kartı, yönlendirici veya ağ cihazı gibi bir iletme ögesinin veri düzlemi tarafından nasıl işlendiğini ifade eden bir programlama dili olup ONF bünyesinde geliştirilmektedir.

Açık ve ayrıştırılmış taşıyıcı ağı (Open and Disaggregated Transport Network): Projenin amacı, ayrıştırılmış optik ekipman, açık ve ortak standartlar ile açık kaynak yazılım kullanarak veri merkezi ara bağlantıları oluşturmaktır. Operatör tarafından yönetilen bir girişimdir.

ONOS (Open Network Operating System - Açık Ağ İşletim Sistemi): Bu çalışmada SDN kontrolcü olarak ONOS kullanıldığı için ONOS bileşenlerinden ayrıntılı olarak bahsedilecektir.

Sahip oldukları pahalı ağların devamlılığını sağlamak zorunda olan telekom operatörleri SDN teknolojisinin en büyük yararlanıcısı konumundadırlar. Geleneksel yönlendiricilerin aksine SDN kontrolcülerinin geliştirilmesi endüstrinin katılımıyla açık kaynaklı projeler tarafından yönlendirilmektedir [51].

Bu tez kapsamında yapılan çalışmalarda ONOS kontrolcünün tercih edilmesinin nedeni, ONOS'un, servis sağlayıcıların ihtiyaç duyduğu performans, yüksek kullanılabilirlik ve ölçeklenebilirlik kriterlerini sağlayabilmek için tasarlanmış açık kaynaklı bir SDN kontrolcü olmasıdır [52].

ONOS gibi SDN projelerinde en önemli aktivitelerden birisi gelişen bir topluluğun yaratılması ve beslenmesidir. En büyük değer yazılım geliştiricilerinden, tedarikçilerden ve servis sağlayıcılardan oluşan ekosistem ile servis geliştirme ve devreye alma aşaması

arasında köprü kurmaktır. Çevik operasyonlar, esnek dağıtım modelleri, tedarikçi bağımlılığının azaltılması ve açık kaynak kod toplulukları ve standartlarını etkilemesi faydaları arasında sayılmaktadır [53].

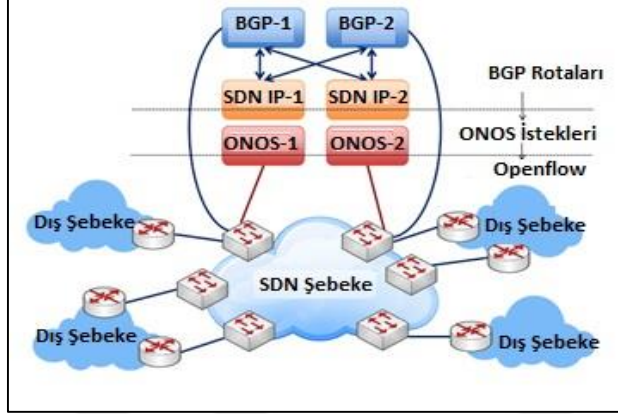
ONOS yeni nesil SDN/NFV çözümleri oluşturmak için kullanılan açık kaynaklı SDN kontrolcüsüdür. ONOS, Stanford Üniversitesi ve Berkeley Üniversitesi yardımıyla 2012 yılında kurulan ve kar amacı gütmeyen ON.Lab tarafından geliştirilmiştir. Basitleştirilmiş programlı ara yüzler sayesinde yeni dinamik ağ hizmetleri oluşturma ve uygulama esnekliği sunmaktadır. Ağın hem yapılandırmasını hem de gerçek zamanlı kontrolünü destekler, ağ yapısı içindeki yönlendirme ve kontrol protokollerini değiştirme gereksinimini ortadan kaldırır. Zekayı ONOS bulut denetleyicisine taşıyarak yenilikçilik etkinleştirilir ve son kullanıcılar, veri düzlemi sistemlerini değiştirmeye gerek kalmadan kolayca yeni ağ uygulamaları oluşturabilmektedir. ONOS platformu aşağıdaki özellikleri içermektedir [54].

- Genişletilebilir, modüler, dağıtılmış bir SDN kontrolcü görevi gören bir platform ve bir dizi uygulama.
- Yeni yazılım, donanım ve hizmetlerin basitleştirilmiş yönetimi, yapılandırması ve dağıtımı.
- Taşıyıcı ortamlarının zorluklarını karşılamak için gereken esnekliği ve ölçeklenebilirliği sağlayan bir ölçeklendirme mimarisi.

ONOS, uygulamaların ağ topolojisini görüntülemesini ve bunları denetleyip kontrol etmesini sağlayan uygulama programlama ara yüzleri sağlamakta olup [54]'te belirtilen linkten yazılımın versiyonları ücretsiz olarak temin edilebilmektedir. Bununla birlikte, birçok uygulama geliştiricisi cihaz düzeyinde çalışmaktansa daha ziyade ağ düzeyinde çalışmayı tercih etmektedir. Uygulama geliştiricilerini düşük seviye parametreleri belirleme ve kontrol etme ihtiyacından kurtaran soyutlama katmanı tanımlamaya imkan vermektedir. Ayrıca ONOS, Openflow, NETCONF, PCEP (Path Computation Element Protocol - Yol Hesaplama Elemanı Protokolü), SNMP (Simple Network Management Protocol - Basit Ağ Yönetimi Protokolü) gibi birçok protokolü desteklemektedir [52].

ONOS mimarisi: ONOS, çok katmanlı taşıma için ölçeklenebilir ve yüksek oranda kullanılabilir bir açık kaynaklı ağ işletim sistemidir. ONOS dünyanın en büyük servis

sağlayıcılarının bazılarında üretimde kullanılmaktadır [21]. ONOS mimarisi Şekil 3.1 'de özetlemektedir [55].



Şekil 3.1. ONOS mimarisi

SDN-IP tarafından kontrol edilen ağ, farklı IP ağlarını birbirine bağlayan transit AS (Autonomous System - Otonom Sistem) görevi görmektedir. Her harici ağ, BGP (Border Gateway Protocol - Sınır Geçit Protokolü) konuşan sınır yönlendiricileri aracılığıyla SDN ağı ile ara yüz oluşturan farklı bir AS etki alanıdır. SDN-IP ağı ONOS tarafından kontrol edilen Openflow destekli anahtarlardan oluşmaktadır. SDN-IP ağı tek bir ONOS kullanarak oluşturulabilmektedir ancak yüksek kullanılabilirlik ve ölçeklenebilirlik için ONOS kümesi oluşturulması gerekmektedir. SDN-IP ağında bir veya daha fazla dahili BGP ile haberleşen yönlendirici bulunmaktadır. Yönlendiriciler, BGP yönlendirme bilgilerini komşu harici ağların sınır yönlendiricileriyle değiştirmek için eBGP (External Border Gateway Protocol - Harici Sınır Geçit Protokolü) protokolünü, bu bilgileri kendi aralarında ve SDN-IP uygulama örneklerine yaymak için ise iBGP (Internal Border Gateway Protocol - Dahili Sınır Geçit Protokolü) protokolünü kullanmaktadır. Ayrıca, SDN-IP, veri düzlemini kullanarak harici BGP yönlendiricilerin BGP ile haberleşen yönlendiriciler ile eşleşmesine izin verecek uygun ONOS isteklerini oluşturmaktadır. SDN-IP uygulama örnekleri arasında, her bir örnek tam olarak aynı BGP rota kümesini almaktadır [55].

ONOS yüksek kullanılabilirlik desteği: SDN-IP, sıcak yedek (hot standby) modeli kullanarak yüksek kullanılabilirlik için destek sağlamaktadır. SDN-IP uygulaması birden fazla ONOS örneğine yüklenebilmekte olup tüm SDN-IP uygulamaları BGP'den gelen rota güncellemelerini dinlemektedir. Ancak yalnızca bir SDN-IP örneği, hedefleri ONOS'a iletmekten sorumlu olan birincil örnek olarak atanmaktadır. Birincil örnek başarısız olursa,

kalan örneklerden biri, BGP güncellemelerine dayalı olarak hedefleri ONOS'a itmeye devam eden yeni birincil öge olmaktadır [55].

SDN-IP, birincil SDN-IP örneğini seçmek için ONOS lider seçim hizmetini kullanmaktadır. Her SDN-IP örneği başladığında, lider seçimine itiraz etmekte ve lider olmaya çalışmaktadır. Lider seçimi, aynı anda yalnızca bir örneğin lider olmasını sağlamaktadır. Mevcut lider başarısız olduğunda, seçim mekanizması başarısızlığı tespit eder ve başka bir örneğin liderliği devralmasına izin vermektedir. Yeni lider önce liderin öğrendiği BGP rotalarının güncel olmasını sağlayan senkronizasyonu gerçekleştirmektedir. Senkronizasyon tamamlandıktan sonra, lider, BGP güncellemelerine yanıt olarak normal işine devam etmektedir [55].

Tam bir yüksek kullanılabilirlik çözümü için, SDN AS 'nin her harici AS ile birden fazla eşleme oturumu kurması gerekmekte ve aynı AS'e her eşleme oturumu farklı bir BGP yönlendiricide sonlandırılmalıdır. Bu şekilde sistem, BGP trafiğinin geçtiği tüm veri düzlemi öğelerinin yanı sıra dahili BGP yönlendiricilerinin de muhtemel arızalarından da kurtulabilecektir [55].

ONOS kısıtlılıkları: Mevcut SDN-IP uygulamasında aşağıdaki sınırlamalar bulunmaktadır [55].

- SDN-IP, ONOS örnekleri arasında yük dengeleme yapamamaktadır.
- Harici BGP yönlendiricileri ve dahili BGP yönlendiriciler arasındaki eşleme oturumları, eşleme bağlantısının bir tarafı için 179 numaralı TCP bağlantı noktasını kullanmalıdır.
- Şu anda yalnızca IPv4 desteklenmektedir.
- 1.0.0 sürümünde sistem, yaklaşık 15000 rotayı işleyebilmektedir.

3.3.2. Openstack topluluğu

Openstack organizasyonu kar amacı gütmeyen bir kuruluş olup amacı; büyüklüklerinde bağımsız olarak özel ve genel bulutların ihtiyaçlarını karşılayacak olan açık kaynak bulut bilişim platformunu üretmektir. OpenStack, 20 milyon satırdan fazla koddan oluşmakta olup her altı ayda bir yeni sürümü yayınlanmaktadır. Aşağıdaki bileşenlerden oluşmaktadır [56].

Nova: Hesaplama kaynaklarının otomasyonu ve yönetiminden sorumludur.

Neutron: Ağ hizmetlerinden sorumludur bu kapsamda IP tahsisi, güvenlik yönetimi, yönlendirme fonksiyonlarını yerine getirmektedir.

Cinder: Blok depolama servislerinden sorumludur.

Keystone: Kimlik yönetiminden sorumludur bu kapsamda kimlik doğrulama ve servis keşfedilmesi için uygulama arayüze sağlamaktadır.

Glance: İmaj yöneminden sorumlu olup bu kapsamda kullanıcılar sunucu imajlarını kopyalayabilmekte ve yükleyebilmektedir.

Swift: Depolamadan sorumlu olup nesneleri birçok sunucuda dağıtık bir mimaride depolayabilmektedir.

Horizon: Openstack servislerine web tabanlı kullanıcı arayüzü sağlamaktadır. Bu sayede kullanıcı, sistem ve ayarlar bir gösterge paneli vasıtası ile izlenebilmektedir.

Heat: Tümüleşik bulut uygulamaları için orkestrayon hizmeti vermektedir.

Mistral: İş akışlarının yönetiminden sorumludur

Ceilometer: Faturalama sistemleri için tek temas noktasıdır.

Trove: Veritabanı hizmetlerinden sorumludur.

Sahara: Büyük verilerin işleme aracı olan Hadoop kümelerini hazırlamaktan sorumludur.

Ironi: Sanal makinelerin yerine fiziksel makinelerin hazırlanmasından sorumludur.

Zaqar: Web geliştiricileri için bulut mesaj servisleri sağlanmasından sorumludur.

Manila: Paylaşımlı dosya sistemi olup paylaşımın yönetilmesi için üretici bağımsız uygulama ara yüzü sağlamaktadır.

Designate: DNS hizmeti vermekten sorumludur.

Vitrage: Openstack alarmları ve olaylarının analiz edilmesi ve organizasyonundan sorumludur.

Aodh: Belirlenen kurallara göre aksiyon aldırılmasını sağlayan alarm servisi.

Searchlight: Openstack bulut servisleri üzerinde arama özellikleri sağlamaktan sorumludur.

Barbican: Sırların güvenli depolanması, hazırlanması ve yönetilmesinden sorumludur.

Magnum: Konteynirlerin orkestrasyonundan sorumludur.

3.3.3. Linux kuruluşu

Kar amacı gütmeyen bir kuruluş olup açık kaynak projeleri etrafında bir ekosistem inşa ederek teknoloji geliştirmeyi hedeflemektedir. Teknik bilgi ve eğitimler sağlamak suretiyle Linux topluluklarını desteklemektedir. Topluluk bünyesinde birçok proje yönetilmekte olup ağ yönetimi ile olan önemli projeler aşağıda yer almaktadır.

ONAP (Open Network Automation Platform - Açık Ağ Otomasyon Platformu): Sanal ağ işlevlerinin gerçek zamanlı ve politika tabanlı olarak yazılım otomasyonunu yapabilen açık ağ otomasyon platformu projesidir.

Opendaylight: Ağ otomasyonunu sağlamak amacı ile açık kaynak kod kullanılarak geliştirilmiş olan SDN kontrolcüsüdür.

OPNFV (Open Platform for NFV - NFV için Açık Platform): Projenin amacı, mevcut en iyi açık kaynak kodlarının test edilebileceği ve konuşlandırılabilmesi için bir referans platformun inşa edilmesidir.

OVS: Projenin amacı, bilgisayar ağlarında kullanılan çoklu protokolleri ve standartları desteklerken donanım sanallaştırma ortamları için bir anahtar yığını sağlamaktır.

DPDK (Data Plane Development Kit - Veri Düzlemi Geliştirme Aracı): Çok çeşitli CPU mimarileri üzerinde çalışan paket işleme iş yüklerini hızlandırmak için kütüphanelerden oluşan araçtır. X86, Power ve Arm marka işlemciler üzerinde çalışabilmektedir.

DANOS (Disaggregated Network Operating System - Ayrıştırılmış Ağ İşletim Sistemi): Telekom operatörünün altyapısındaki markasız kutuların kullanımını hızlandırmak için geliştirilen standartlaştırılmış bir dağıtılmış açık kaynak ağ işletim sistemidir.

Acumos yapay zeka: Yapay zeka uygulamalarını oluşturmayı, paylaşmayı ve dağıtmayı kolaylaştıran bir platform ve açık kaynaklı bir çerçevedir.

Akraino: Sanal makina ya da konteynırlarda çalışan uç uygulamaları için açık kaynaklı yazılım oluşturmayı amaçlamaktadır.

EdgeX Foundry: IoT, uç bilişim gibi hizmetler için ortak, üretici bağımsız bir açık çerçeve oluşturmak üzere oluşturulan bir açık kaynak projesidir.

Uç sanallaştırma motoru (Edge virtualization engine): Dağıtılmış uç nokta bilişim düğümlerinde eski uygulamaların geliştirilmesini, düzenlenmesini ve güvenliğini sağlayan açık kenarlı bir bilgi işlem motoru oluşturarak Android işletim sisteminin mobil cihazlar için yaptıklarını IoT uç birimler için yapmayı hedeflemektedir.

CNCF (Cloud Native Computing Foundation- Yerli bulut bilişim kuruluşu): Uygulamaları mikro servis olarak dağıtmak, her bir parçayı kendi konteynırında paketlemek ve kaynak kullanımını iyileştirmek için açık kaynaklı bir yazılım yığını geliştirilmesini içermektedir [57].

3.3.4. Açık radyo erişim şebeke topluluğu

O-RAN topluluğu, operatörler tarafından gereksinimleri açıkça tanımlamak ve hedeflerini gerçekleştirmek için bir tedarik zinciri eko sistemi oluşturmaya yardımcı olmak için

kurulmuştur. Bu topluluğun amacı radyo ağlarını daha akıllı ve daha açık hale getirerek önceki nesil teknolojilere göre daha ileriye taşıyabilmektir [58].

3.3.5 Telekom altyapı projesi

Tüm dünyada küresel erişim sağlamak amacıyla telekom ağ altyapısının oluşturulması ve devreye alınması için TIP (Telecom Infra Project - Telekom Altyapı Projesi) kurulmuştur. Amacı şeffaf bir şekilde yeni teknolojilerin geliştirilmesini sağlamak olan topluluğun operatörler, tedarikçiler, geliştiriciler, entegratörler başta olmak üzere 500'den fazla üyesi bulunmaktadır. Erişim, iletim, çekirdek ve servisler olmak üzere dört alanda birçok proje yönetilmektedir [59].

3.4. Açık Kaynak Yazılımların Haberleşme Ağ Altyapılarında Kullanılması

Ağların yazılım tabanlı hale gelmesi, ağ bileşenlerini ya da ağ üzerinden verilen servisleri tasarlamak ve yönetmek için yazılım programlama kullanan bir yaklaşım olarak tanımlanabilmektedir. Ağların yazılım tabanlı hale gelmesi geleneksel ağ dünyasını tümüyle değiştirmektedir. SDN ve NFV teknolojileri ağların yazılım tabanlı hale getirilmesinin gerçekleştirilmesinde rol oynayan iki önemli teknolojidir [60-63].

Sanallaştırmanın ve ağların yazılım tabanlı hale gelmesinin ortak kullanımı, ağ işlevlerinin donanım yerine yazılım üzerinde çalışmasına imkan sağlamakta ve ağ işlevlerini donanım platformundan ayırmaktadır. Bu sayede ağ işlevleri verilen servislerin gereksinimini karşılamak için ağın herhangi bir yerinde kurulabilecek duruma gelmektedir. Bu yaklaşımın servise verme süresini azaltma, kurulum ve bakım maliyetlerini düşürme başta olmak üzere pek çok faydası bulunmaktadır. Sanallaştırma; kullanılan donanım, işletim sistemi, depolama sistemleri ve bilgisayar ağ kaynakları üzerinde soyut katman yaratılması sayesinde yazılım/donanım ayrışmasını sağlamış olmaktadır. Böylece sanallaştırma ile birlikte yazılımlar özel donanımlar yerine ticari kullanıma hazır ekipmanlarda standart sunucular üzerinde çalışabilmektedir [28]. Tedarikçiye özel dikey entegre edilmiş sistemler tedarikçilerin iş modellerinin en önemli noktasıdır. Ancak endüstrideki genel eğilim ortak bileşenler kullanarak markasız kutu modeline geçmektir [64].

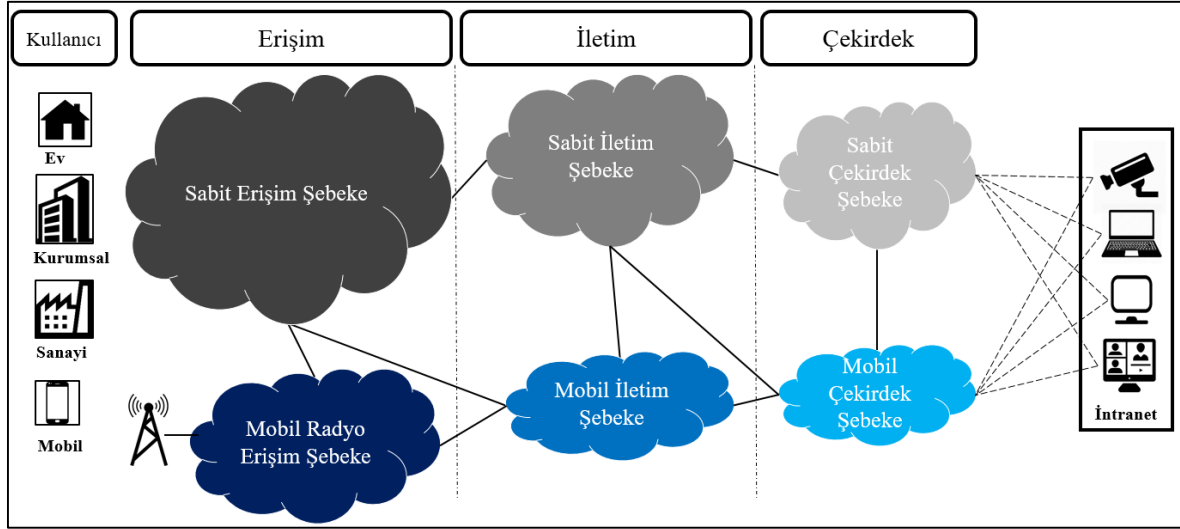
4. HABERLEŞME AĞ ALTYAPILARI VE DÖNÜŞÜM İHTİYAÇLARI

Fiber optik iletişim ağlarının ve 4G/5G teknolojilerinin yaygınlaşması ile birlikte, geniş bant kullanımı hızlı bir şekilde artmıştır. Bunun yanında yeni teknolojiler olgunlaşmakta ve günlük hayatın parçası haline gelmektedir. Mobil ve sabit şebekeler, artan geniş bant kullanımı ile baş edebilmek ve yeni nesil servis gereksinimlerini karşılayabilmesi için dönüşüme ihtiyaç duymaktadır. Söz konusu dönüşümü gerçekleştirmeyi sağlayan en önemli teknolojiler NFV ve SDN teknolojileridir. Bu bölümde yeni nesil servis gereksinimleri, şebekelerin dönüşüm ihtiyaçları ve bu dönüşüme ihtiyaç duyan haberleşme sistemlerinin ağ altyapıları ele alınmıştır.

4.1. Haberleşme Ağ Altyapıları

Operatör şebekeleri, müşterilere sunulacak servis ihtiyaçlarını karşılayabilmek için farklı katmanlardan ve her katmanın içerisinde, sunulacak servis ile ilgili fonksiyonları sağlayan bileşenlerden oluşmaktadır. Bu şebekeler müşterilerine sundukları servis çeşitliliğine göre farklı altyapılara sahiplerdir. Geleneksel servisler (Ses, internet, kısa mesaj vb.) sabit ve mobil altyapılar üzerinden sağlanabildiği gibi bazı özel servisler için farklı altyapıların sağlanması gerekmektedir. Hala sabit ve mobil şebekelerden ayrı ayrı olarak sunulan birçok servis olmakla birlikte özellikle günümüz teknolojilerinin gelişimiyle birlikte sabit ve mobil şebekelerin birbirine yakınsanması ile sunulan yeni servis ihtiyaçları artmaktadır.

Operatör şebekelerinde bulunan her katman, içerdiği fonksiyon çeşitliliği, bu fonksiyonlara hizmet eden bileşenlerin sayısı, bu bileşenler üzerinden geçen trafik karakteristiği, problem olması durumunda yaşanacak kesintinin etki alanı gibi farklı dinamiklere sahiptir. Bu dinamikler katmanları birbirinden ayırsa da özellikle yeni nesil servislerin duyduğu ihtiyaçlardan dolayı katmanlar arası yakınsama gerektiren farklı yaklaşımlar da bulunmaktadır. Şekil 4.1’de haberleşme ağ yapılarının katmanları gösterilmiştir. Bu katmanlar kullanıcı, erişim, iletim ve çekirdek olmak üzere dört temel sınıfa ayrılmaktadır. Bu katmanlara ilave olarak operatörlerin kendi iç haberleşme alt yapısını oluşturan intranet şebekeleri bulunmaktadır.



Şekil 4.1. Haberleşme ağ altyapılarının katmanlara göre gösterimi

Kullanıcı katmanı: Kullanıcı katmanı temel olarak bireysel ve kurumsal olmak üzere iki sınıfa ayrılmaktadır. Son kullanıcı eğer tüketici ise bu kullanıcı bireysel kullanıcı olarak tanımlanmaktadır. Kurumsal ifadesi ise diğer işletmelere ürün veya hizmet satan şirketleri ifade etmektedir. Bireysel ve kurumsal kullanıcılar sabit ya da mobil şebekelerden veri, ses, multimedya gibi hizmetleri alabilmektedir. Bu hizmetleri alabilmeleri için aldıkları hizmet ile uyumlu ekipmanları kullanmaları gerekmektedir. Örneğin internet hizmeti için bireysel ev kullanıcılarında modem, kurumsal kullanıcılarda yönlendirici, anahtar gibi donanımların bulunması gerekmektedir.

Erişim şebeke katmanı: Kullanıcı katmanına en yakın ve içerisinde farklı servisler için gerekli, geniş ölçekte yayılmış çok sayıda erişim bileşenini içeren bir katmandır. Müşteriye sunulacak servis tipine göre farklı terminalleri şebekeye bağlamaya olanak sağlayan dağıtık mimaride konumlandırılmış bileşenleri içeren bu katmanda problem olması durumunda yaşanacak kesintinin etki alanı diğer katmanlara kıyasla daha az olmaktadır. Sabit ve mobil erişim şebekeleri, kullanılan terminallerin ve erişim teknolojilerinin farklı olması sebebiyle birbirinden ayrılmaktadır. Son yıllarda diğer katmanlarda da olduğu gibi çeşitli yeni nesil servisler için sabit ve mobil erişim şebekelerinin birbirine yakınsaması gibi yaklaşımlar mevcuttur. Hem mobil hem de sabit erişim şebekelerinde çalışmaya konu olan yeni nesil teknolojilerin uygulanması için başlamış ve devam eden kapsamlı çalışmalar olsa da bu teknolojilerin erişim şebekelerinde uygulanabilirliği konusunda diğer katmanlara kıyasla yeterli olgunluk bulunmamaktadır. Bu çalışmada sabit erişim şebekesi için uygulanabilecek

yeni nesil teknolojiler detaylı şekilde incelenmiş, mobil erişim şebekesi için gelişmekte olan teknolojilerden ise örneklerle yer verilmiştir.

İletim şebeke katmanı: Çekirdek ve erişim şebeke arasında bulunan, erişim şebekeden gelen trafiği çekirdek şebekeye taşımak için daha çok yönlendiriciler, anahtarlar gibi iletim bileşenlerinden oluşan ve bir toplama noktası görevini gören katmandır. Sabit ve mobil iletim şebekeleri birbirine yakın mimari ve bu mimarileri oluşturan benzer bileşenlerden oluşmaktadır. Aynı zamanda bu şebekeler iç içe geçmiş yapıda tasarlanabilmektedir. Bazı yapılarda mobil iletim şebeke trafiğinin sabit iletim şebeke üzerinden taşınması bu duruma örnek verilebilir. Yeni nesil servis ihtiyaçlarını karşılayabilmek için katmanlar arası yakınsama gerektiren farklı yaklaşımları bir kenara bıraktığımızda bu katmanı oluşturan temel bileşenlerin yönlendiriciler ve anahtarlar olduğunu söyleyebiliriz. Bu kapsamda yönlendiriciler ve anahtarlar için yazılım ve donanım katmanının ayrıştırılarak donanım bağımlılığını ortadan kaldıran ve açık kaynak kodlu yazılımlara olanak veren çeşitli sayıda belirli olgunluğa ulaşmış çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışma içerisinde bu katmanda yapılan yeni nesil teknoloji çalışmalarına örnek gösterilebilecek bugüne kadar uygulanmış yazılım ve donanım katmanlarını ayrıştırma yaklaşımlarını bir adım öteye taşıyan örneklerle yer verilmiştir.

Çekirdek şebeke katmanı: Merkezi ve yüksek kapasiteli bileşenler içerirken, erişim şebekeye doğru inildikçe bu katmanlarda çekirdek şebekeye göre düşük kapasiteli bileşenler daha dağınık bir yapıda konumlandırılmaktadır. Çekirdek şebeke bileşenlerinin merkezi olmalarının getirdiği risk nedeniyle iletim ve erişim şebeke bileşenlerine kıyasla etki alanları geniş olabilmektedir ve süreklilikleri müşterilere sunulan servisler için hayati öneme sahiptir. Sabit ve mobil çekirdek şebeke bileşenleri genellikle benzer fonksiyonları yerine getirseler de sunulan servisler bakımından farklı bileşenlerden oluşmaktadır. Bununla birlikte servisten bağımsız ortak merkezi bileşenleri de içermektedirler. Çalışmaya konu olan yeni nesil teknolojiler çerçevesinden çekirdek şebeke bileşenlerini değerlendirdiğimizde bu teknolojilerin olgunluk seviyesi diğer katmanlara kıyasla daha iyi durumdadır ve bu konuda çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmada da değinilen yöntemlerden bir tanesi mobil çekirdek şebekede uygulanabilecek bir teknoloji olsa da benzer şekilde sabit çekirdek şebeke için de uygulanması muhtemeldir.

Intranet şebeke katmanı: Daha çok kurumsal alanda kullanılan kullanıcı bilgisayarları, fax, modem, yazıcı, video konferans çözümleri gibi kuruma özel bileşenleri ve bu bileşenlerin haberleşmesini içeren katmandır. Her bir intranet şebekesi kuruma özel ve genellikle kapalı bir haberleşme sistemi üzerinden farklı ihtiyaçları adresleyecek şekilde kurulmaktadır. Genellikle daha küçük çapta konumlandırıldığından etki alanı azdır ve yeni nesil teknolojilerin uygulanabilmesi için diğer katmanlara kıyasla daha çok olanak sunmaktadır. Bu çalışmada intranet şebekelerinde uygulanabilecek yeni nesil teknolojiler detaylı şekilde incelenmiştir.

4.2. Yeni Nesil Servis Gereksinimleri ve Şebekelerin Dönüşüm İhtiyaçları

Teknolojilerin gelişimi ile birlikte mobil ve sabit haberleşme ağ altyapılarında yeni nesil katma değerli servisler yaygınlaşmaya başlamıştır. Mobil şebekeler üzerinde; 3GPP'nin 5G için tanımladığı üç farklı senaryo bulunmaktadır. Bunlar, “gelişmiş mobil geniş bant”, “kitlesel makine haberleşmesi”, “ultra-güvenilir ve çok düşük gecikmeli haberleşme” teknolojileridir.

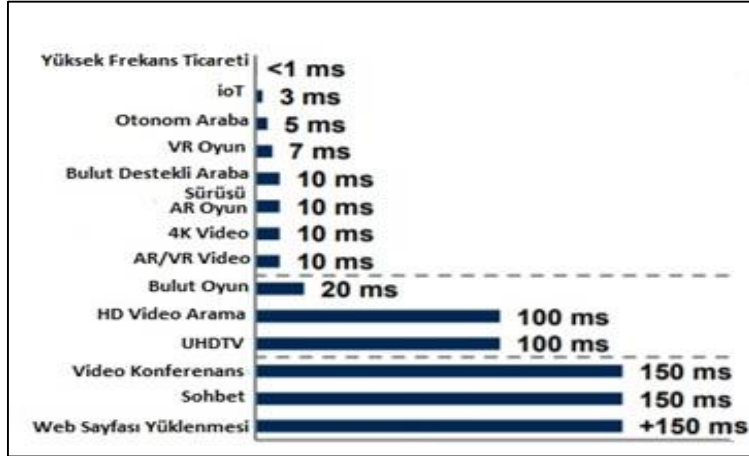
Gelişmiş mobil geniş bant senaryosunda kullanıcılara ultra yüksek çözünürlüklü videolar ve 10 Gbps iletim hızı ile deneyim sunmaktadır. 8K videolar, 3D videolar ve VR/AR gibi gelişmiş mobil geniş bant hizmetleri ana taşıyıcı ağlarda çok yüksek ağ bant genişliği talebi getirmektedir. Bu trafiği taşıyacak olan şebekelerin iletim maliyetleri çok yüksektir.

Kitlesel makine haberleşmesi senaryosunda ise milyonlarca cihazın bağlanması öngörülmektedir. Akıllı binalar, akıllı şehirler gibi alanlarda kullanılan kitlesel makine haberleşmesi çok büyük miktarlarda veri üreteceğinden, merkezi bulut sistemleri üzerinden böylesi karmaşık servisleri vermek büyük zorluklar yaratmaktadır. Bunun yerine yerleştirilmiş akıllı ağların tasarlanması önerilmektedir.

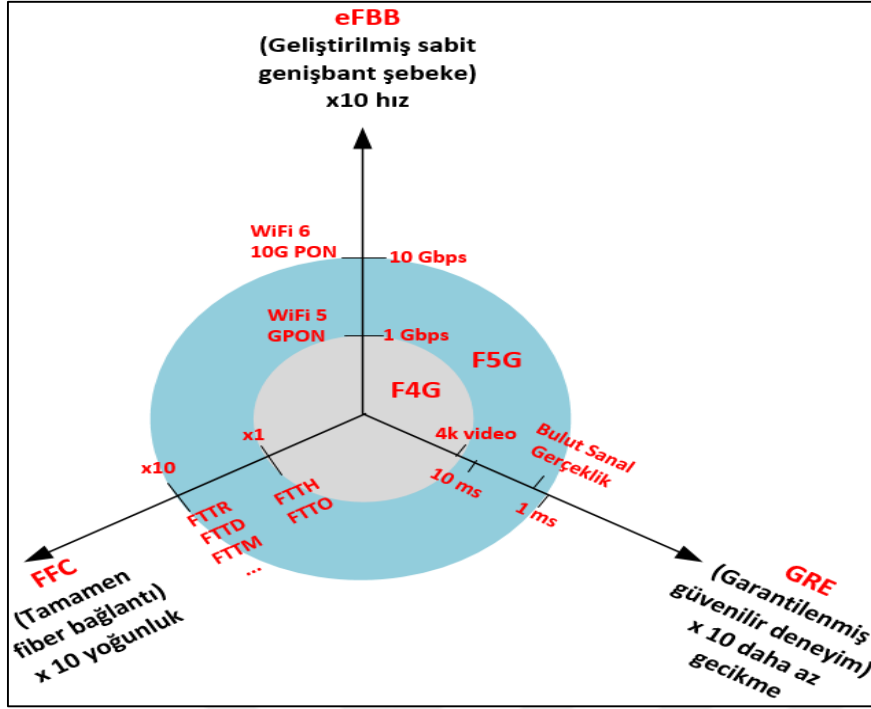
Ultra-güvenilir ve çok düşük gecikmeli haberleşme senaryosunun sunduğu çok düşük gecikme ile dikey uygulamaların verimliliği artmaktadır. Otonom araçlar gibi gecikmenin kritik önem taşıdığı alanlarda kullanılan ultra-güvenilir ve çok düşük gecikmeli haberleşme servisi uçtan uca 1 ms altında gecikme süresi gerektirmektedir. Bu kadar düşük gecikme değeri sağlamak için yeni ağ mimarisine ihtiyaç duyulmaktadır.

Yeni nesil servislerin ihtiyaç duymuş olduğu gecikme gereksinimleri Çizelge 4.1’de gösterilmiştir [65].

Çizelge 4.1. Yeni nesil servislerin gecikme değeri gereksinimleri



Sabit şebekede de mobil şebekedekine benzer yeni servisler hızla devreye girmektedir. Yeni nesil sabit şebekeler mobilite haricinde 5G’nin desteklediği hemen hemen tüm uygulama alanlarını desteklemektedir. Yeni nesil sabit şebekelerin gelecek mimarilerinin belirlenmesinde önemli rol oynayan ETSI organizasyonun alt grubu olan F5G (Fifth Generation Fixed Network - Beşinci Nesil Sabit Şebeke) grubunun kavram olarak sunduğu beşinci nesil sabit şebeke teknolojileri Şekil 4.2’de özetlenmiştir [66].



Şekil 4.2. ETSI F5G kullanım senaryoları

Yeni nesil sabit şebeke servisleri ile mobil şebeke servislerinin çok büyük oranda benzeştiği görülmektedir. Söz konusu benzeşim aşağıda belirtildiği üzere üç özellikte yoğunlaşmıştır. Bunlar;

- Çok yüksek hızları kullanıcıya sunmayı hedefleyen eFBB (Enhanced Fixed Broadband - Gelişmiş Sabit Geniş Bant),
- Fiber bağlı cihaz sayısını arttırarak daha fazla cihazın kitlesel şekilde bağlanmasını sağlayan FFC (Full Fibre Connection - Tamamen Fiber Bağlantı),
- Yüksek bant genişliği ve düşük gecikme gerektiren ev içi servisler (yüksek çözünürlüklü video, oyun, sanal gerçeklik, arttırılmış gerçeklik vb.) için müşteri deneyiminin önemini vurgulayan GRE (Guaranteed Reliable Experience - Garanti Edilmiş Güvenilir Deneyim) özellikleridir.

Bu özelliklere sahip yeni nesil sabit şebekeler Bulut VR, 4K/8K 3D video, online oyun, online eğitim, akıllı sağlık, akıllı ev, akıllı fabrika, akıllı şehir gibi uygulama alanlarında kullanılabilir. İlave olarak; sabit şebekenin, yakın gelecek içerisinde yüksek ihtiyaçları bulunan yeni nesil mobil şebekelerin kurulumunda büyük roller üstleneceği öngörülmektedir. Bu durum mevcutta zaten çok yüksek bant genişlikleri sunan sabit

şebekenin, yükünü daha da artıracaktır. Gerek bu gereksinimleri karşılamak içinde gerekse de bahsedilen söz konusu yüksek bant genişliği ve düşük gecikme gerektiren yeni servisleri sağlayabilmek için sabit şebekede kullanılan ara yüzlerin çok daha hızlandırılarak omurga tarafında 100/400 Gbps seviyelerine çıkarılmasının ve uç noktalarda ise 10 Gbps bağlantıların sunulmasının yaygınlaştırılması gerekmektedir.

Operatörler, hız artışı ve gecikmenin düşürülmesi sayesinde, yatırımlarını eskisine göre farklılaştırabilmektedirler. Önceleri yüksek hız ihtiyacını karşılayanın tek yolu, işlem gücüne sahip olan sistemlerin, müşteriye en yakın noktada konumlandırılması söz konusu iken, günümüzde hızların artırılması ve gecikmenin düşürülmesiyle bu gereklilik ortadan kaldırılmaktadır. Şebeke dönüşümünde gereksinimleri karşılamak için, optimum çözümü sağlayan teknolojiler arasında sanallaşma öne çıkmaktadır. Sanallaşma, sistemlerin daha uygun yerlerde konumlandırılmasına olanak vermekte ve operatörlerin merkezileşmenin faydalarından yararlanabilmesini sağlamaktadır. Merkezileşme ve sanallaşmanın yardımıyla, operatörler yeni servisleri daha çevik bir biçimde şebekelerine uygulayabilmekte ve hali hazırda içerik ve bulut sağlayıcıların yaptığı gibi yeni hizmetleri hızla geliştirerek, kullanıcılarına servis edebilmektedir.

İlave olarak; günümüzde operatörler şebekelerini 5G'ye dönüştürmeye başlamıştır. Amaçları, 5G'ye hazır şebeke ortamı sağlamak ve bu yeni teknolojinin ticarileşmesini hızlandırmaktır. Bu açıdan, sanallaştırılmış şebeke fonksiyonları çalıştıran yazılım tabanlı şebeke altyapısını hayata geçirirken operatörlerin sermaye ve operasyonel giderlerinde hatırı sayılır kazanımlar elde etmelerini sağlayan yazılım tanımlı şebeke ve şebeke fonksiyonlarının sanallaştırılması teknolojilerinin şebekelerin dönüşümünde önemli bir rol oynaması beklenmektedir. Abonelerine özelleştirilmiş hizmetler sunmayı amaçlayan operatörler, sağlanan çeviklik ve programlanabilirlik nedeniyle yazılım tabanlı mimarileri kullanmayı tercih etmektedir.

Telekom operatörlerinin karşı karşıya olduğu önemli miktardaki geniş bant veri büyümesi, çok düşük gecikme süresi ve çok yüksek sayılarda gelen bağlantı talepleri gibi konularda zorluklar ortaya çıkarmaktadır. Bu zorlukları geleneksel çözümlerle karşılamaya çalışmak, gelirdeki büyümeye karşılık gelmeyen yüksek tedarik giderleri ve bakım giderleri ile sonuçlanmaktadır. Operatörler yüksek maliyet ve üretici bağımlılığı olmadan dinamik bir yapıya kavuşmak için ekosistemlerini esnek, çevik ve açık ortamlara dönüştürmenin

yollarını aramaktadır. SDN ve NFV, operatörlerin altyapılarını yazılım kontrollü sanallaştırılmış yapılara dönüştürmelerine yardımcı iki kilit teknolojidir.

SDN, kontrol katmanını mantıksal olarak merkezi bir konumda birleştirirken, yönlendirme katmanını şebeke cihazında bırakarak şebeke kontrolünü ve paket yönlendirme katmanlarını birbirinden ayırmaktadır. Bu şekilde, tüm şebekeyi operatörün gereksinimlerine göre değiştirilebilen merkezi bir yazılım ile kontrol etmek mümkün olmaktadır. Dahası, yönlendirme katmanını sadece şebeke cihazında bırakmak artık yazılım lisansı gereksinimi olmadığı için cihazları daha ucuz hale getirmektedir ve kontrol ve yönlendirme katmanları arasında Openflow [22] gibi protokollerin tanımlanması operatörleri üretici bağımlılığından kurtarmaktadır.

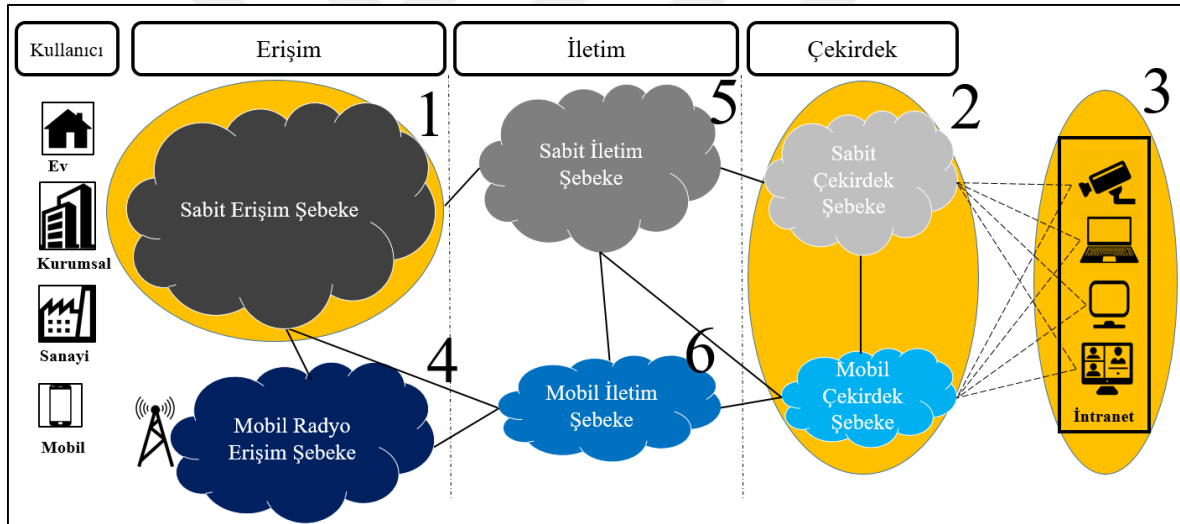
NFV ise bilgi teknolojileri sanallaştırma teknolojilerini veri merkezlerindeki, şebeke merkezi noktalarındaki ve son kullanıcı tarafında bulunan endüstri standardı yüksek kapasiteli sunucular, şebeke anahtarları ve depolama sunucularında çalışacak şekilde geliştirerek operatörlerin şebekelerini tasarlama biçimlerini dönüştürmeyi amaçlamaktadır [67]. NFV teknolojisi SDN'i oldukça tamamlayıcıdır ancak ona bağımlı değildir [67]. SDN, şebeke cihazlarının kontrolünü yazılımlaştırırken, NFV şebeke fonksiyonlarını tedarik ve bakım giderlerini düşürerek lisanslı cihazlar yerine endüstri standardındaki ticari donanımlarda sanallaştırmaktadır.

SDN ve NFV teknolojileri ayrıca açık kaynak projelerden de fayda sağlamaktadır. Açık kaynak ve üreticiden bağımsız çözümler programlanabilirliği sağlamak için oldukça önemlidir. Açık kaynak projeler, SDN ve NFV için bu teknolojilerin olgunlaşması ve bu teknolojilere daha geniş katılım sağlamak için önemlidir. Açık kaynak yazılım kullanımının faydaları;

- Kolayca anlaşılabilir çözümler olması, üretici bağımlılığı olmaması,
- Başkalarından hızlı bir şekilde öğrenme sağlanabilmesi,
- Herkes tarafından düzeltilebilir olduğundan daha güvenli ve hızlı geliştirilebilir olması,
- Yaygın kullanılması, katkıda bulunanların fazla olmasıdır.

5. NFV/SDN TEKNOLOJİLERİNİN FARKLI ŞEBEKE ALTYAPILARI ÜZERİNDEKİ UYGULAMALARI

Bu bölümde açık kaynak kodlu NFV/SDN teknolojilerinin haberleşme ağ altyapılarının farklı alanlarına uygulanması ele alınmıştır. Bu kapsamda; Şekil 5.1’de gösterildiği üzere geliştirilen abone farkındalığına sahip dinamik servis fonksiyon zinciri çerçevesinin mobil şebeke altyapısına, geliştirilen SDN tabanlı platformun intranet şebeke altyapısına ve açık kaynak kod kullanılarak oluşturulmuş SDN tabanlı geniş bant erişim teknolojisi olan SEBA teknolojisinin sabit şebeke altyapısına uygulanmasına yer verilmiştir. Uygulamalar canlı bir telekom laboratuvarında test edilmiş, maliyet analizleri yapılmış ve elde edilen bulgular geleneksel şebekeler ile kıyaslanmıştır.



Şekil 5.1. NFV/SDN teknolojilerinin bu çalışma kapsamındaki uygulama alanları

İlave olarak Şekil 5.1’de gösterildiği gibi diğer katmanlarda (mobil erişim, sabit ve mobil iletim) uygulanabilecek yeni nesil teknolojiler de ilerleyen bölümlerde gelecek çalışma yaklaşımları adı altında incelenmiştir.

5.1. Abone Farkındalığına Sahip Dinamik Servis Fonksiyon Zinciri

SDN ve NFV’nin mobil şebekelerde kullanılabileceği alanlardan biri olarak, müşteri verisine bu veri şebekede taşınırken farklı katma değerli IP tabanlı servisler sunan SGi-LAN (SGi Local Area Network - SGi Yerel Alan Ağı) karşımıza çıkmaktadır. SDN ve NFV gibi

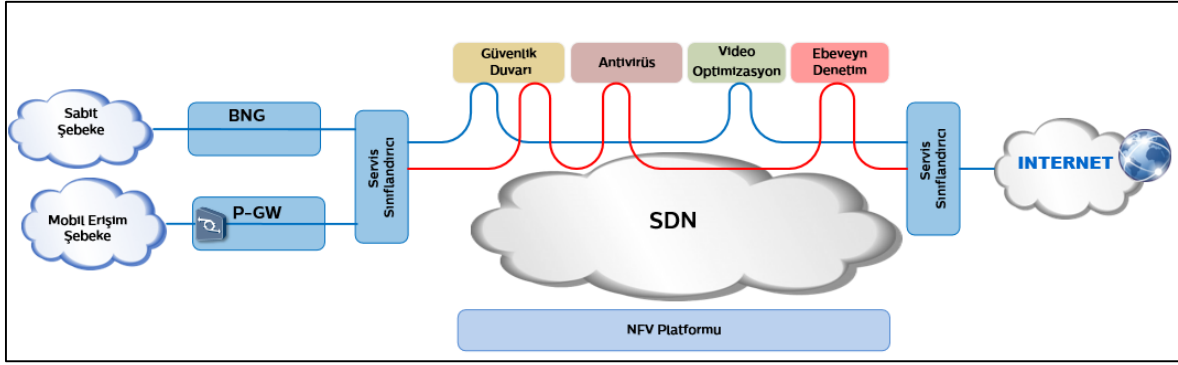
gelişmekte olan teknolojilerin vaatleri göz önüne alındığında, SFC politikasının uygulanmasının bu teknolojilerin entegrasyonunda da büyük ölçüde fayda sağlayabileceği düşünülmektedir [68].

Bu çalışmada, açık kaynaklı SDN ve NFV çözümlerini kullanarak kullanıcı trafiği başına servis zinciri sağlamak ve SGi-LAN servislerini sanal şebeke fonksiyonlarına dönüştürmek amacıyla yeni bir abone farkındalığına sahip dinamik servis fonksiyon zinciri çerçevesi geliştirilmiştir. Bu SFC çerçevesi ile çok fazla çaba gerektirecek manuel operasyona gerek kalmadan müşteri bazlı dinamik uygulanan katma değerli servisler verilebilecektir. Önerilen çerçevenin performansını ve ölçeklenebilirliğini göstermek için çözüm, farklı sayıda kullanıcı, trafik ve işlem ile canlı bir telekom laboratuvarında test edilmiş ve maliyet analizleri yapılmıştır.

5.1.1. SFC teknolojisi

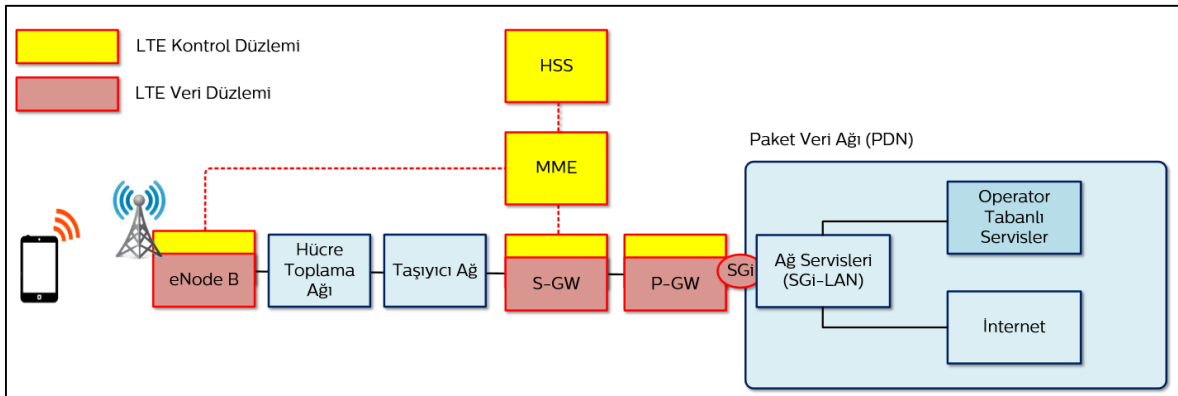
Servis oluşturmak için ağ fonksiyonlarının bir biri ile olan bağlantısına servis zinciri ismi verilmektedir. IETF (Internet Engineering Task Force - İnternet Mühendisliği Görev Gücü), servis fonksiyon zincirini sıralı ya da kısmen sıralı soyut servis fonksiyonları kümesi ve sınıflandırma sonucu seçilen paketler, çerçeveler ve/veya akışlara uygulanması gereken sıralı kısıtlamalar olarak tanımlamaktadır [69]. Trafik birden fazla servise gitmeyi gerektiriyorsa SFC gereklidir [70] ve pek çok şebeke senaryosunda uygulanabilmektedir [71].

SDN ve NFV teknolojilerinin yükselişi ile birlikte servis zinciri uygulamaları operatörlerin şebekelerinde ve kurumsal şebekelerde yaygınlaşmaya başlamıştır [68]. SFC, SDN teknolojisinin yardımıyla servis zinciri kullanarak verilen ağ servislerinin (güvenlik duvarı, yük dengeleyici, TCP optimizasyon, video optimizasyon, derin paket inceleme, içerik filtreleme, ağ adres dönüştürücü, saldırı tespit ve önleme sistemleri vb.) oluşturduğu şebeke trafiği için yapılan etkin planlamanın etkisini artırmaktadır. SFC yeteneği ile NFV ortamında çok sayıda sanal şebeke fonksiyonu birbirine bağlanabilmektedir. Şekil 5.2, SFC mimarisinde verilerin nasıl hareket ettiğini göstermektedir [72].



Şekil 5.2. Servis fonksiyon zinciri yapısı

Şekil 5.3’de 4G mobil şebeke mimari gösterilmiştir [73]. SGi arayüzü, PGW (Packet Gateway - Paket Ağ Geçidi) ve PDN (Packet Data Network - Paket Veri Ağı) arasındaki 3GPP referans noktasıdır. PDN ise 3G şebekedeki Gi arayüzüdür. PDN, SGi-LAN’da bulunan internet ve ağ servislerini içermektedir. SGi-LAN servis fonksiyonları geleneksel mobil şebekedeki fiziksel şebeke cihazlarında çalışmaktadır. Şekil 5.3’de ilave olarak S-GW (Serving Gateway - Servis Ağ Geçidi), HSS (Home Subscriber Server - Ev Abone Sunucusu), MME (Mobility Management Entity - Hareketlilik Yönetim Birimi) ve PCRF (Policy and Charging Rule Function - Politika ve Ücretlendirme Kural Fonksiyonu) düğümleri bulunmaktadır.



Şekil 5.3. SGi-LAN şebeke mimarisi

5.1.2. İlgili araştırmalar ve problem durumu

Literatürde SFC teknolojisinin mobil ağlara uygulanmasına yönelik bazı çalışmalar mevcuttur ancak bu çalışmaların bazı önemli eksiklikleri bulunmaktadır.

Abone farkındalığı olan servis zincirleme ile SGi-LAN üzerindeki servisleri sanallaştırmak için bir çözüm uygulanması önerisinde bulunulan çalışmada sanallaştırma için kilit öneme sahip metriklerin performans değerlendirmesi sunulmuştur. Ancak, bu çalışma tedarikçi bağımlılığı içermektedir ve dinamik abone farkındalığı olan SFC' yi ele almamaktadır [74]. VNF'lerin yerleştirilmesi problemi ele alan başka bir çalışmada SFC provizyonlama sorunu formüle edilmiştir. Uçtan uca gecikme performansı ve hesaplama süresi gösterilerek VNF'lerin yerleştirilmesi konusunda bir algoritma önerilmiştir [75]. VNF'lerin bir veri merkezinde konumlandırılmasının kritik bir soruna neden olduğunu ortaya çıkaran araştırmada ise bant genişliği tüketimini azaltmak için çözüm önerileri getirilmiştir. Ancak, trafiğin yönlendirmesini sağlamak için SDN faktörü dikkate alınmamıştır [76]. Servis zincirleme üzerine odaklanan başka bir çalışmada etkili bir servis zinciri elde etmek için gereksinimleri içeren açık araştırma alanlarını tanımlamıştır [77]. Servis zincirini yönetmek için politika tabanlı şebeke yönetimi sunulan başka bir araştırmada ise birden çok VNF arasında zincirlemeyi başarmak için politika tabanlı bir çözüm önerilmiştir. Ancak, bu araştırmada trafik yönlendirmenin nasıl yapıldığını içermemektedir ve operator sınıfı bir şebeke hesaba katılmamıştır. Ek olarak, gelen paketlerin sınıflandırılması tamamen üreticiye GGSN (The Gateway GPRS Support Node - GPRS Destek Düğüm Geçidi) , SGSN (Serving GPRS Support Node - GPRS Destek Düğüm Hizmeti) gibi özel mobile çekirdek cihazlarına bağlıdır [78].

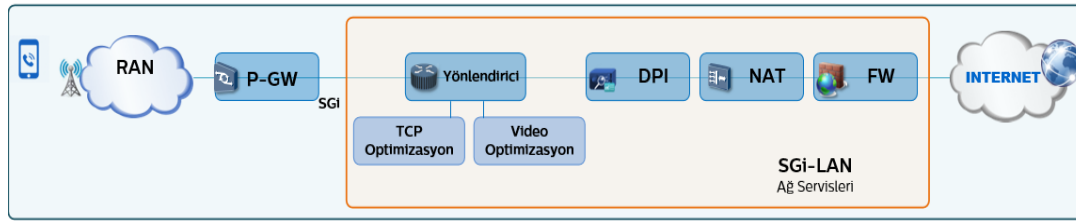
Dinamik şebeke servis zincirine olan ihtiyacı tanımlayan çalışmada, SFC için uygulama, şebeke hizmeti sunumu, güvenlik ve sistem gereksinimlerini içeren tasarım konuları tanıtılmıştır [79]. Sanal makineler için bant genişliği tahsisi sorununa odaklanılan araştırmada ise, SFC kullanarak en uygun bant genişliği tahsisi yapan algoritma geliştirilmiştir [80]. SFC gecikmesinin zincirin boyutuna bağlı olduğu ifade edilen çalışmada, kopyalamaya dayalı paralel paket işleme kullanılarak zincirdeki gecikmeyi azaltmak için bir çözüm önerisi getirilmiştir [81]. Başka bir çalışmada, birçok mobil şebeke operatörün ölçeklenebilirlik eksikliği ve servis işlevlerinin tutarsız sıralanması gibi bazı dezavantajları olan donanım cihazına dayalı servis fonksiyonlarından oluşan Gi-LAN mimarisi için statik SFC kullandığı belirtilmiştir [82]. Son olarak maliyeti düşürmek için şebeke servis zincirlemelerini ağ altyapısına yönlendiren bir algoritma önerilmiştir [83].

Özetle, bu çalışmaların hiçbiri, çeşitli şebeke servis senaryolarında kullanılabilecek dinamik ve abone farkındalığı olan servis fonksiyon zincirinin nasıl gerçekleştirileceğini dikkate almamıştır.

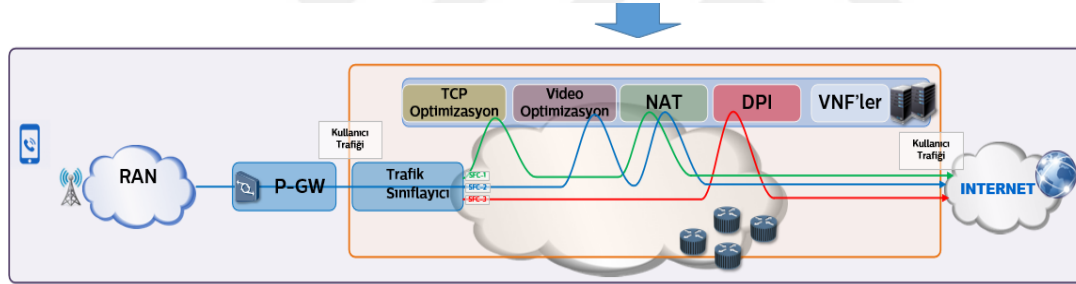
SGi-LAN, müşteri verisinin derin paket izleme, video optimizasyon, güvenlik duvarı ve TCP optimizasyon gibi servislerden geçtiği paket veri şebekesinden hemen önceki telekom şebekesinin bir parçasıdır. Geleneksel yapıdaki mobil şebekelerde, bu servisler özellikle birbirine statik konfigürasyonlarla bağlı olan üreticiye özel donanımlarda çalışmaktadır. Bu geleneksel çözüm donanımı çalıştıracak alanı güç ve ilaveten donanımın çalışmasının devamlılığını sağlayacak yetenekli iş gücü gerektirerek güncellemesi ve koruması zor servis yapıları doğurmaktadır. Şekil 5.4’de gösterilen geleneksel fiziksel bağlantıya sahip servis zinciri aşağıdaki sıkıntılara sahiptir [68-69,82,84]:

- Topolojik bağımlılıkları dayatması,
- VLAN, politika tabanlı yönlendirme, sanal yönlendirici fonksiyonlarının manuel olarak konfigüre edilmesinden dolayı konfigürasyon karmaşasına sahip olması,
- Fiziksel cihaz zincirinden dolayı yeni servis yüklemede zorluk yaşanması,
- Geleneksel şebekelerde SFC trafik yönlendirmesinin özel donanım cihazlarının kullanımından dolayı karmaşık olması,
- Mevcut fiziksel servisler için ve ayrıca sanallaştırılmış servis fonksiyonları kurulduğunda, servis fonksiyonlarının kolayca taşınamaması, yaratılamaması veya kaldırılamaması,
- Sıkı bağlantılı servis fonksiyon zinciri ve alttaki yerel alan ağı topolojisi,
- Birçok servis sağlayıcının cihaz tabanlı çözümlere büyük yatırımlar yapmış olduğu için fiziksel ağ fonksiyonlarını SFC mimarisinde yönetmeyi beklemektedir ancak geleneksel SFC çözümleri sanal ağ fonksiyonları ile fiziksel ağ fonksiyonlarını birlikte yönetmeyi desteklememesi,
- Geleneksel SFC çözümleri fiziksel cihaz kurulumuna dayalı çalışmaktadır. Fiziksel her bir ayrı cihaz ayrı bir fonksiyon yerine getirmektedir. Bir çok fonksiyonu kullanarak servis zinciri tanımlayabilmek için farklı tedarikçilere özel donanımları kullanmak gerekmekte olup zincirler esnek özellik göstermemektedir. Genelde servis gereği ilgili paketlerin ilgili hedefe yönlendirilmesi yerine tüm paketler tüm donanımlara uğramakta olup bu durum ihtiyaçtan fazla kapasite kullanılmasına neden olmaktadır.

Servis zincirini Şekil 5.4’de gösterilen geleneksel şebekeden vermek için servis başına ayrı APN (Access Point Name - Erişim Noktası Adları) tanımlanması ve bunların ilgili servislere yönlendirilmesi ya da şebekede PBR (Policy Based Routing - Politika Tabanlı Yönlendirme) gibi işlemler gerekmekte olup çok ciddi manuel çaba gerektirmektedir. İlave olarak, Şekil 5.4’de gösterilen seri bağlantıya sahip mimaride herhangi bir ekipmanda yaşanacak problem tüm servis zincirinin olumsuz etkilenmesine sahip olmaktadır ve tüm trafiğin tüm ekipmanlardan geçmesi bakım ve tedarik giderlerini ciddi oranda arttırmaktadır.



Şekil 5.4. Geleneksel şebeke üzerinden SFC’nin uygulanması



Şekil 5.5. Şebeke fonksiyonlarının VNF’lere dönüşümü

Bu çalışmada her bir kullanıcı başına servis zincirini sürdürmek ve SGI-LAN servislerini Şekil 5.5’de gösterilen sanal şebeke fonksiyonlarına dönüştürmek amacıyla abone farkındalığı olan dinamik SFC modeli önerilmiştir. Bu sayede, yüksek maliyetli yönlendirici ve anahtarlar ile aynı performansı gösteren düşük maliyetli Openflow markasız kutu anahtarlama altyapısının kullanılmasıyla donanım ve üretici bağımlılığının ortadan kaldırılması hedeflenmiştir.

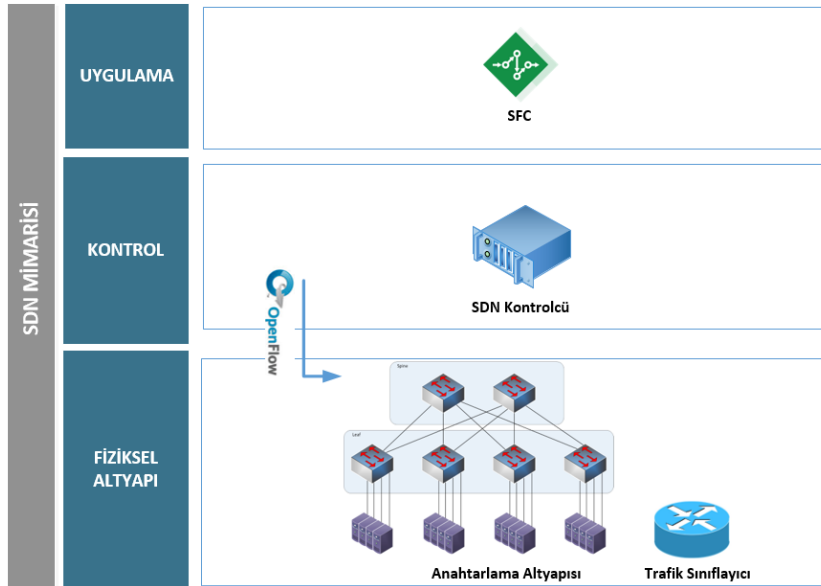
5.1.3. Önerilen sistem mimarisi

SDN kontrollü şebeke temel olarak Şekil 5.6 ‘da gösterildiği üzere üç katmanlı bir yapıdan oluşmaktadır.

Uygulama katmanı: Uygulama katmanı, kontrol ve veri düzlemleri ile hızlı ve kolay entegre edilebilen uygulamaların geliştirilmesi için açık, programlanabilir ara yüzler sağlamaktadır. Bu katmanda SFC uygulaması bulunmaktadır.

Kontrol katmanı: Kontrol katmanı, yazılım temelli şebekelerde fiziksel katmanın kontrolünü gerçekleştirir. SDN kontrolcüsü bu katmanda yer almaktadır. SDN kontrolcüsü, endüstri standardı sunucular üzerinde çalışır ve istenirse yüksek erişilebilir yapıyı sağlamak amacıyla yedekli olarak kurulabilmektedir. ONOS alt katman kontrol, bölüm temelli yönlendirme (segment routing) uygulaması ile yaprak-omurga (leaf-spine) anahtarlayıcılardan oluşan veri katmanının yönetimini sağlamaktadır.

Veri katmanı/Fiziksel katman: Fiziksel katmanda SDN kontrolcü tarafından Openflow protokolü ile yönetilen anahtarlayıcılar, TC (Traffic Classifier - Trafik Sınıflayıcı) ve fiziksel ağ fonksiyonları bulunmaktadır. Anahtarlayıcıların temel fonksiyonu; kontrol düzleminde bulunan kontrolcü tarafından tanımlanan akış kuralları doğrultusunda veri düzleminde trafiğin uç cihazlara iletimini sağlamaktır. SDN kontrolcü ile anahtarlayıcılar arasında kontrol protokolü endüstri standardı olan Openflow protokolüdür.



Şekil 5.6. SDN kontrollü şebeke mimarisi

Önerilen çözümde, abone farkındalığı olan dinamik SFC sanallaştırılmış bir çözüm sunmaktadır. Bu çözüm, VNF ve/veya PNF fonksiyonlarını içeren örneklemelerin kontrolcü üzerinden birer fonksiyon olarak konfigüre edilmesi ve ilgili fonksiyonların seçilerek zincir

oluşturacak şekilde tanımlanması şeklinde özetlenebilir. Bu yapıda PNF'ler için topolojide bulunan herhangi bir fiziksel sunucu seçilebilir. Üreticiye özel donanım bazlı cihazlar yerine sanal fonksiyonlar sanal makinalarda çalışmaktadır ve ihtiyaç duyuldukça zincirlenmektedir. Bu sanal zincirler herhangi özel bir donanım satın alınmadan değiştirilebilir, farklılaştırılabilir ve örneklendirilebilmektedir.

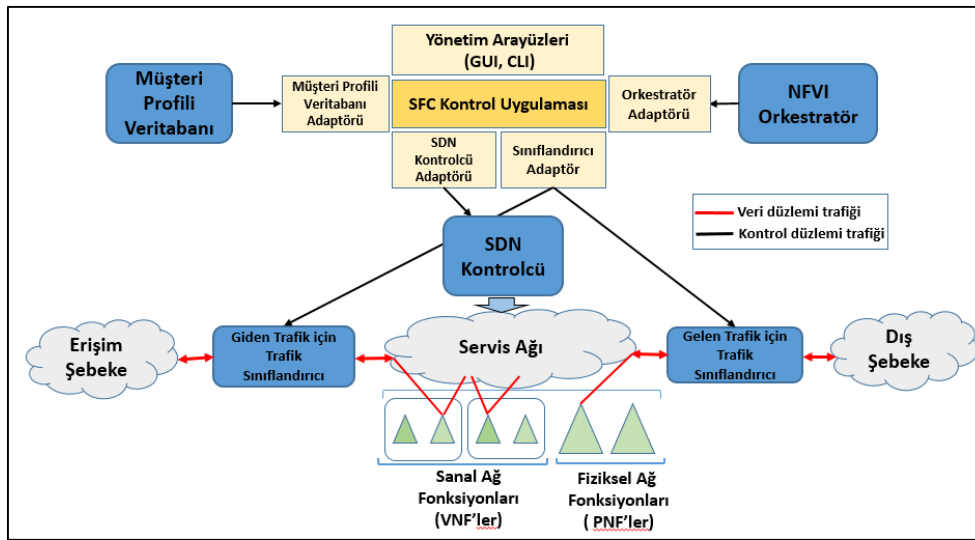
Abone farkındalığı olan dinamik SFC, arka uç sanallaştırma sisteminde gerekli sanal fonksiyonların otomatik olarak başlatılmasını, abone profiline göre Gi hızında akan paketlerin sınıflandırılmasını ve paket akışlarını uygun fonksiyon zincirlerinden geçirmeyi sağlamaktadır. Sanal fonksiyonlar müşteri tarafından seçilmektedir ve satın alınmaktadır. Abone IP adresleri ve profilleri servis sağlayıcı şebekenin politika ve ücretlendirme kural fonksiyonu tarafından öğrenilmektedir. Her bir müşteriye özel servis zinciri şebekede uygulanabilmektedir.

Önerilen kullanıcı farkındalığı olan dinamik SFC çözümü, şebekenin P-GW ve dış şebekeye çıkış için yapılan NAT (Network Address Translation - Ağ Adres Dönüştürücüsü) fonksiyonu arasında yer almaktadır. P-GW çıkışında (Gi arayüzü) ve internet girişinde trafik, son kullanıcının sahip olduğu servis profiline göre sanal veya fiziksel servisler (VNF/PNF) arasında dolaşması sağlanacak şekilde Gi-LAN uygulamasının trafik sınıflayıcı fonksiyonu tarafından işaretlenmekte ve yönlendirilmektedir. Trafik sınıflayıcı fonksiyonu tarafından işaretlenen trafiğin sanal veya fiziksel servisler arasında nasıl dolaşacağı Gi-LAN uygulamasının SFC fonksiyonu ile belirlenmektedir. Yani, trafik sınıflayıcının trafik yönetim politikasını (traffic steering policy) trafik yönetimi ve servis zinciri parametre ve prosedürlerine dönüştürerek uygun şekilde fiziksel veri katmanına yönlendiren bu fonksiyondur. VLAN etiketi ile eşleşen, daha önceden konfigüre edilmiş servis zincirine göre trafik yönlendirilmektedir.

PGW çıkışında trafik, veri katmanına yaprak (leaf) seviyesinden girmeden önce ve internet girişinde trafik sınıflayıcı fiziksel katmanından geçmektedir. Abone temelli servis yönetimini mobil şebeke operator altyapısında PCRF sağladığından, abone temelli trafik yönetimi ve dinamik SFC kontrolünün de uygun politikalarla bu birimce yapılması doğal görülmektedir. PCRF entegrasyonu ile son kullanıcı başına dinamik olarak istenen şekilde trafik akışı sağlanabilmektedir. Bunun için, temel olarak, PCRF'teki trafik yönetim politikalarının bunu uygulayacak olan yazılım temelli şebeke katmanına dinamik olarak

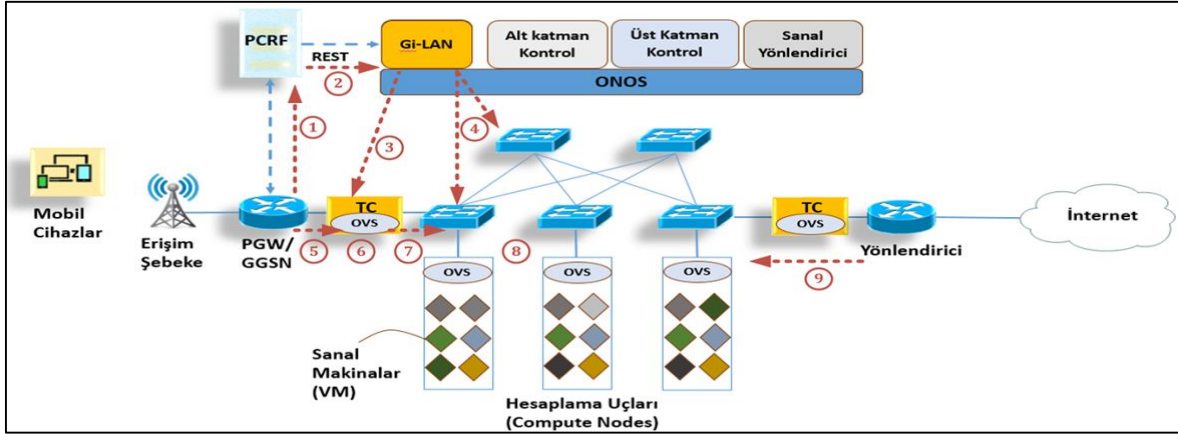
provizyonu yapılmaktadır. Bu çalışmada SDN kontrollü Gi-LAN çözümü, PCRF ile REST (Representational State Transfer - Temsili Durum Aktarımı) ara yüzü kullanılarak Gi-LAN uygulaması üzerinden entegre edilmiştir.

Önerilen çözümün avantajlarından bir tanesi, servis sağlayıcılara mevcut fiziksel şebeke fonksiyonlarını yerine getirdikleri cihazları kullanmaya devam etmesine yardımcı olmasıdır. Kullanıcı farkındalığı olan dinamik SFC'nin etkileşimde olduğu yapılar Şekil 5.7'de gösterilmiştir.



Şekil 5.7. Kullanıcı farkındalığı olan dinamik SFC mimarisi

Çözüm iki kısımdan oluşmaktadır. Sınıflandırıcı kısım veri katmanında çalışırken, yönetici kısım kontrol katmanında çalışmaktadır. Kullanıcı farkındalığı olan dinamik SFC, erişim ve dış şebeke arasındadır. Paket trafiği her iki yöndedir. Dışa (erişim şebekeden dış şebekeye) doğru ve içe (dış şebekeden erişim şebekeye) doğru paketler farklı fonksiyon zincirlerinden geçmektedir. Veri katmanında SFC operasyonu kolaydır. Paketler IP adreslerine göre etiketlenmektedir ve ilgili fonksiyon zinciri örneğinin giriş bağlantı noktasına gönderilmektedir. Paketler zincir boyunca ilerledikçe, zincirin çıkış noktasından alınmaktadır ve son olarak etiketi çıkarılıp zıt yöne doğru gönderilmektedir. Abone profil veritabanı, NFV orkestratör, SDN kontrolcüsü ve sınıflandırıcı farklı müşteri veya uygulamalar için farklı üreticilerden oluşabilmektedir. Bu nedenle, önerilen SFC yöneticisinin bu bileşenlerden soyut ara yüzler ile ayrılması gerekmektedir. Soyut ara yüzler minimal olmalıdır, bileşenlerin kullanılmayan fonksiyonları/servisleri soyutlama ile modellenmemektedir.



Şekil 5.8. Çalışma prensibinin mesajlarla açıklanması

Şekil 5.8’de önerilen mimarinin nasıl çalıştığı aşağıda adım adım gösterilmektedir.

1. Adım: Oturum kuran müşteri PCRF’e bildirilir.
2. Adım: PCRF, müşteriye uygulanacak SFC (hangi uygulamalara gideceğini) bilgilerini müşteri kaynak IP bilgisi ile birlikte Gi-LAN uygulamasına iletir.
3. Adım: Gi-LAN uygulaması TC’e sınıflandırıcı adaptör aracılığı ile müşteri kaynak IP’si ile hangi SFC’nin verileceği ve dolayısı ile hangi kuralın uygulanacağını (ilgili VLAN etiketini) bildirir.
4. Adım: Aynı uygulama ağ bileşenlerine SDN kontrolcü adaptör üzerinden TC’ye iletilen VLAN için hangi VxLAN tünellerinin (hangi uygulamalara SFC yapılacağı) uygulanacağını iletir. Böylece kontrol düzlemi içerisindeki SFC kurulum prosedürleri tamamlanmış olur ve veri düzlemi prosedürleri başlar.
5. Adım: Müşteri trafiği TC’ye iletilir.
6. Adım: Gi-LAN içindeki SFC uygulamasının 3.adımda TC’ye bildirdiği kurala istinaden müşteri kaynak IP’si TC’de yakalanır ve ilgili VLAN etiketine işlenir.
7. Adım: Müşteri trafiği ilgili VxLAN tünele atılarak yaprak anahtara gelir.
8. Adım: Yaprak-omurga anahtarı ve OVS tarafından VxLAN tünel aracılığı ile ilgili VNF’lere uğrayarak SFC uygulanır ve son olarak müşteri internete erişir.
9. Adım: İnternette dönüş trafiğide benzer şekilde TC’den geçerek dönüş için SFC kuralları uygulanır. Bu kapsamda dönüş trafiğine ilgili VLAN etiketleri hedef IP adresine göre atanır. Daha sonra paketler servis ağındaki SFC’deki ilgili VNF’lere yönlendirilir ve erişim şebekesine teslim edilir.

Önerilen çözümün tasarımı aşağıdaki varsayımlara dayanmaktadır:

- Her bir aboneye abonenin bağlantısı düşmediği müddetçe değişmeyecek özel IPv4 adres atanmaktadır.
- PCRF eşleme değiştikçe abone IP adreslerini ve eşlenmiş profil numarasını sağlamaktadır.
- Bir çok farklı profil, dolayısı ile farklı fonksiyon zincirleri bulunabilmektedir.

Paket sınıflandırıcı P4 veya Openflow taşıyıcı sınıfı anahtarda çalışmaktadır. P4 şebeke cihazları tarafından paketlerin nasıl yönlendirileceğini tanımlamaktadır ve şebekeyi programlamak için soyutlama seviyesi sunmaktadır [85]. Trafik yönlendirme için başlangıç basamağı trafik sınıflandırmadır [86]. SFC’de trafik yönlendirme SDN ve NFV temelleri ile elde edilebilmektedir [21]. Bu çalışmada paket sınıflandırıcı, Openflow anahtar üzerinde çalışmaktadır. Sınıflandırıcı iki bölümden oluşmaktadır. Fiziksel bir donanım olan veri katmanını paket işlemcisi ve pakete sınıflandırma direktifleri gönderen ve buna göre veri katmanını konfigüre eden kontrol katmanını trafik sınıflandırıcısı modülüdür. Abone profil veritabanı, NFV orkestratörü ve SDN kontrolcüsü dış uygulamalara API’ler (Application Programming Interface - Uygulama Programlama Ara yüzü) sağlayan uzak işlemlerdir. Bu çalışmada, SFC yöneticisi dış uygulamadır. API’ler REST tabanlı HTTPS (Hypertext Transfer Protocol Secure - Güvenli Hiper Metin Aktarım İletişim Protokolü)’tir. SFC uygulaması servis zincirini gerçekleştirmek için geliştirilmiştir. ONOS şebekeler için yüksek erişilebilirlik ve ölçeklenebilirlik sağlayan açık kaynak şebeke işletim sistemidir. İşlenebilecek toplam trafik kapasitesi çözüm için önemli bir mesele olmaktadır. Büyük telekom operatörlerin internet erişim noktalarını düşündüğümüzde tüm SFC çözüm bileşenleri (trafik sınıflandırıcılar, alt şebeke bileşenleri, openstack uçları) saniyede yüzlerce gigabit işleyebilme yetkinliğinde olmak zorundadır.

Bir diğer konu, çözümün destekleyebileceği aktif abone sayısıdır. Kurulum alanına bağlı olarak, SFC çözümü 1-2 milyon kadar eş zamanlı abone trafiği kaldırabilmelidir. Bu gereksinim, eşleştiği servis profiline göre her bir abone trafiğinin etiketlenmesi gereken trafik sınıflandırıcısı üzerinde büyük etkiye sahiptir. SGI arayüzünden gelen trafik abone IP adresine göre sınıflandırılmaktadır ve abone profilinde tanımlanan politikalara göre uygun servis zincirine yönlendirilmektedir. Servis zincirinden geçtikten sonra, internet yönlendiricisine abone trafiği tekrar yönlendirilmektedir. Dönüş trafiği tekrar sınıflandırılır

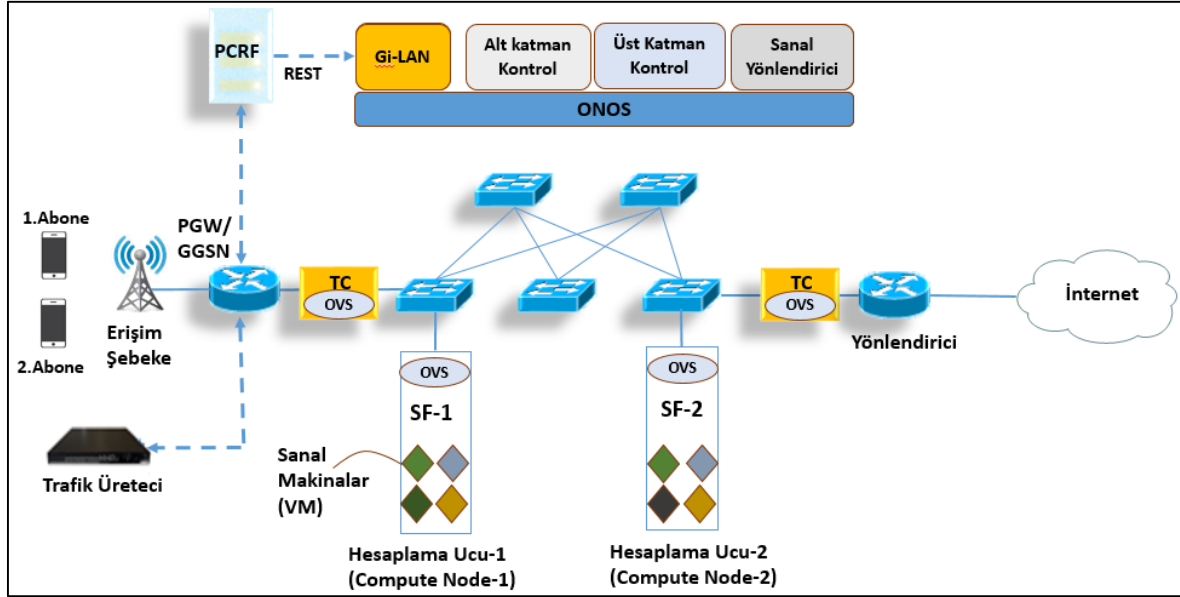
ve indirilen trafik politikalarına göre SFC'lere yönlendirilmektedir. Belirli bir abonenin indirme ve yükleme trafiği için farklı fonksiyon zincirleri tanımlamak mümkündür. Abone profil bilgisi PCRF tarafından sağlanmaktadır.

5.1.4. Deneysel çalışmalar

Deneysel uygulama düzeneği: Bu çalışmada, kullanıcı trafiği başına servis zinciri gerçekleştirmek ve SGi-LAN servislerini VNF'lere dönüştürmek için ONOS platformu kullanılarak SFC uygulaması geliştirilmiştir. Kurulumda kullanılan öğeler aşağıda yer almaktadır.

- OF-DPA (OpenFlow Data Plane Abstraction - OpenFlow Veri Katmanı Soyutlaştırma) destekleyen markasız kutu anahtarlardan oluşan yaprak- omurga yapısında alt katman şebeke,
- Yaprak-omurga alt katman şebekesinde (openstack) çalışan sanallaştırma platformu,
- Üstkatman şebekeyi kontrol eden ONOS kontrolcü (ONOS – SGi-LAN, APN, PPPoE Uygulaması),
- Trafik sınıflandırıcısı (200 Gbps trafik üretebilen, 1 Mpps),
- Baz istasyonu (2G, 3G, 4G teknolojilerini destekleyen, 4x40 W),
- Yönlendirici (100 GE arayüzler, 2.4 Tbps anahtarlama kapasitesi),
- PCRF (3GPP standartları ile uyumlu),
- İki sanal şebeke servisi (güvenlik duvarı, trafik optimizatörü),
- İki mobil telefon ve trafik üretici,
- Baş uç (Head Node) olarak davranan sunucu (1 CPU, Xeon D-1518, 4 çekirdekli, 35W, 2x 16GB DDR4 2133Mhz ECC RDIMM, 240GB SSD, her biri 1Gb 4 portlu Ethernet, Dual 10G SFP+),
- Hesaplama ucu olarak davranan iki sunucu (1 CPU, Xeon D-1518, 4 çekirdekli, 35W, 2x 16GB DDR4 2133Mhz ECC RDIMM, 240GB SSD, her biri 1Gb 4 portlu Ethernet, Dual 10G SFP+) kullanılmıştır.

Önerilen kullanıcı farkındalığı olan SFC modeli Şekil 5.9 'da gösterilen deney düzeneği çerçevesinde canlı telekom laboratuvarında test edilmiştir.



Şekil 5.9. Önerilen SFC platformunun deney düzeneği

Ölçümleme yöntemi: Önerilen dinamik SFC çözümünün performansının ölçülebilmesi için değişen eş zamanlı abone SFC istekleri ve değişen işlem (thread) sayıları kullanılmıştır. Her bir testte, PCRF'ten abonelik verileri okumak için harcanan süre ile ilgili kuralların trafik sınıflayıcı ve servis ağı üzerinde uygulanmasını kapsayan SFC süresi ölçümlenmiştir. Her trafik akışı sırasında SFC tarafından harcanan süre, değişen eş zamanlı abone SFC istekleri ve servis fonksiyon işlem sayıları ölçülmüştür. İlave olarak farkındalığına sahip dinamik servis fonksiyon zinciri platformunda kullanılan trafik sınıflandırıcısının performansını ölçümleyebilmek adına trafik üretici kullanılmış olup tekil 2 milyon eş zamanlı abone için Çizelge 5.1'de belirtilen dağılımda trafik oluşturulmuştur. Bu trafik dağılımı gerçek ağ trafiğinin ölçümlerine dayanmakta olup daha önce yakalanan gerçek trafiğe göre oluşturulmuştur. Söz konusu önceden kaydedilen trafik modeline dayalı trafik üretilerek trafik sınıflandırıcıya doğru gönderilen farklı trafik yükleri altında trafik sınıflandırıcısının CPU tüketim değerleri ölçülmüştür.

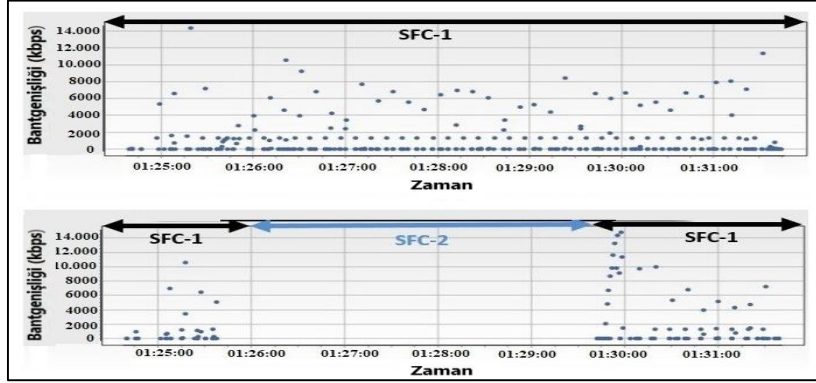
Çizelge 5.1. Trafik sınıflandırıcısı performans testleri için trafik dağılımı

Trafik Tipi	Trafik Dağılımı (%)
Bit Torrent	6,4
DNS	0,4
E bay	2
Facebook	5
Google Browsing	3
Gmail	2
Google Maps	1
HTTP	9,2
Netflix	39
SMTP	1
Generic TCP	6
Generic UDP	4
YouTube	21

Deneysel bulgular ve değerlendirme: Şekil 5.9'daki deneysel düzenekte; iki abone, kullanıcı ekipmanı 1 (KE_1) ve kullanıcı ekipmanı 2'nin (KE_2) internete dinamik SFC platform üzerinden bağlı olduğu çözümün işlevselliği test edilmiştir. Başlangıçta, KE_1 ve KE_2 servis fonksiyonu 1'e (SF_1) atanmıştır. İki kullanıcı ekipmanından izlenebilecek şekilde bir video başlatılmıştır. Video oynatılırken KE_2 'nin servis profili değiştirilmiş ve böylece KE_2 ; SF_2 'ye atanmıştır ve trafiği hesaplama ucu 2'ye yönlendirilmiştir. SF_2 'de herhangi bir video akışını engelleyen bir güvenlik duvarı vardır, bu nedenle video oynatma KE_2 'de durmaktadır. Bir süre sonra, KE_2 'nin profili, ilk hesaplama ucundan tekrar servis alacak şekilde değiştirilmiştir ve bu da video oynatımının devamı ile sonuçlanmaktadır.

Anahtarlama servis fonksiyonlarının sonucu Şekil 5.10'da gösterilmektedir; burada KE_1 video akışını kesintisiz olarak alırken KE_2 , SF_2 'nin çalıştırılması sırasında herhangi bir video

paketi almamaktadır. Böylelikle önerilen çözümün abone başına dinamik SFC'yi desteklediği fonksiyonel olarak görülmüştür.

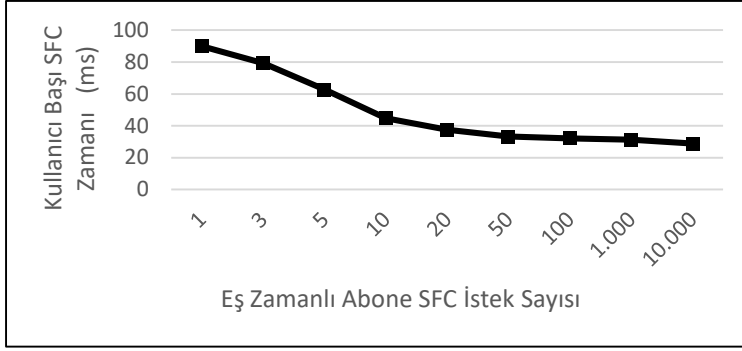


Şekil 5.10. İki kullanıcı ekipmanından elde edilen verihızı değerleri

SFC çözümünün performansı ve ölçeklenebilirliği değişen eş zamanlı abone SFC istekleri ve değişen işlem sayıları kullanılarak Şekil 5.9'da verilen kurulum doğrultusunda test edilmiştir. Çizelge 5.2'de gösterilen sonuçlara göre eş zamanlı abone SFC isteği arttıkça kullanıcı başı SFC hazırlama süresinin azaldığı ve yaklaşık 30 ms'de yakınsadığı gözlemlenmiştir. PCRF'den veri okumak için geçen sürenin, her bir abone için ilgili SFC'leri hazırlamak için izlenen adımlardan daha uzun olması nedeni ile aynı eğilim Şekil 5.11 'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.2. Farklı sayıdaki oturumlar (aboneler) için test sonuçları

SFC istek sayısı	İşlem (thread) sayısı	Toplam SFC süresi (ms)	Kullanıcı başına SFC süresi (ms)	CPU kullanımı
1	1	90	90,00	0,10%
3	1	238	79,33	0,10%
5	1	314	62,80	0,10%
10	1	448	44,80	0,10%
20	1	749	37,45	0,10%
50	1	1664	33,28	0,30%
100	100	32	32,00	0,90%
1000	100	302	30,20	4,50%
10000	100	2883	28,83	6,30%



Şekil 5.11. Kullanıcı başına SFC süreleri

Bu sonuçlara göre;

- x86 tabanlı sunucular, artan oturum sayısı ve çoklu işlemlerde iyi performans sağlamaktadır.
- SFC kuralları 10000 eş zamanlı aboneye kadar çok kısa sürede (yaklaşık 2,9sn) uygulanabilmektedir.
- Dinamik SFC çözümü büyük donanım yatırımlarına gerek kalmadan uygulanabilmektedir.
- Servis fonksiyonunda çoklu işlemler CPU kullanımını ve harcanan zamanı belirgin şekilde etkilemektedir.

Trafik sınıflandırıcı, tüm trafik kendi üzerinde etiketlendiğinden trafik kapasitesini kaldırabilmek için SFC mimarisindeki en kritik uçlardan biridir. Bu nedenle, trafik sınıflandırıcı yüksek miktarda paket akış kuralını ve değişiklik taleplerini desteklemelidir.

Çizelge 5.3. 10 Gbps trafik altındaki test sonuçları

TC'ye doğru üretilen trafik	Test süresi (sn)	Toplam paket sayısı	Saniyede eklenen akış sayısı	Saniyede silinen akış sayısı	CPU
10 Gbps	1200	3,1E+09	-	-	0,2 – 0,5
	1800	4,65E+09	-	-	0,2 – 0,5
	400	9,42E+08	10	10	0,2 – 0,5
	400	9,42E+08	100	100	0,2 – 0,5
	400	9,42E+08	1000	1000	2,5 - 5
	400	9,42E+08	10000	10000	2,5 -11

Çizelge 5.4. 100 Gbps trafik altındaki test sonuçları

TC'ye doğru üretilen trafik	Test süresi (sn)	Toplam paket sayısı	Saniyede eklenen akış sayısı	Saniyede silinen akış sayısı	CPU
100 Gbps	1200	4,50E+10	-	-	0,2 – 0,5
	1800	6,75E+10	-	-	0,2 – 0,5
	400	1,57E+10	10	10	0,2 – 0,5
	400	1,57E+10	100	100	0,5 – 0,8
	400	1,57E+10	1000	1000	6,5 - 8,4
	400	1,57E+10	10000	10000	23,5 - 28,5

Trafik sınıflandırıcısının performansı Çizelge 5.2’de yer alan trafik dağılımı ile oluşturulan 10 Gbps ve 100 Gbps yapay trafik ile test edilmiştir. Bu trafik tekil 2 milyon eş zamanlı abone için uygulanmıştır. Her test sırasında değişen sayıda paket akış kuralı eklenmiş veya silinmiştir ve her durum için trafik sınıflandırıcısının CPU kullanımı ölçülmüştür. Çizelge 5.3 ve 5.4’de belirtilen ilk iki satır, TC'nin kararlı durum (steady state) performansını göstermekte olup; burada TC'de kurulu akış kuralları test sırasında değiştirilmemiştir. Bu,

mevcut abonelerin servis profillerini değiştirmeden şebeke üzerinden hizmet aldıkları duruma karşılık gelmektedir. Sonraki dört satır ise, akış ekleme ve kaldırma işlemleri yapıldığı durumlardaki çözümün performansını göstermektedir. Yeni bir abone bir hizmet talep ettiğinde bir akış ekleme talebi alınmakta ve bu da bir SFC'ye karşılık gelmektedir. Mevcut bir abone hizmet profilini değiştirmeyi talep ettiğinde ise bir akış silme talebi alınmaktadır. Her satır, saniyede alınan değişen sayıda akış ekleme ve silme talebi için CPU tüketimini göstermektedir. Önerilen çözüm 10,100,1000,10000 eş zamanlı akış ekleme ve silme senaryoları için test edilmiştir. Burada saniyede 10000 akış değişikliği talebinin gerçek kullanım senaryolarında beklenenden çok daha fazla olduğu unutulmamalıdır. Yalnızca önerilen çözümün yoğun trafik altında ölçeklenebilirliğini ve performansını göstermek için kullanılmıştır. Çizelge 5.3 ve 5.4'de verilen sonuçlar, trafik sınıflandırıcısının 2 milyon eşzamanlı abone için 10 Gbps yük altında iken CPU kullanımının en fazla %11 seviyelerinde, 100 Gbps yük altında iken ise en fazla %28,5 seviyelerinde herhangi bir paket kaybı olmadan kararlı olarak çalıştığını göstermiştir.

5.1.5. Maliyet analizi

Müşteri açısından bakıldığında bit başına maliyet düşerken operatörlerin tedarik ve bakım giderleri sürekli artış eğilimi göstermektedir. Bakım giderlerinin azaltılması için ağlarda insanın yapacağı görevleri ve ağ ekipmanlarının yönetimini destekleyecek şekilde otomasyon çözümlerinin artması gerekmektedir. Tedarik giderleri ise tedarikçi bağımlı özel donanım gerektiren çözümler yerine standart ticari kullanıma hazır donanımlar kullanılması ile azaltılabilir [87]. NFV ve SDN teknolojilerinin kullanılması, telekom operatörlerinin çeviklik ve manevra kabiliyetlerini arttırırken tedarik ve bakım giderlerinin azaltılmasını sağlamaktadır [88].

Bu bölüm, ONOS tabanlı SFC çözümü ile geleneksel ağ arasında operatörlerin tedarik ve bakım harcamaları açısından karşılaştırmaları içermektedir. ONOS tabanlı SFC çözümü SDN tabanlı bir altyapıda çalıştığından dolayı, ekonomik kazançlar ilk yatırımdan sonra elde edilecek tasarruflar olarak açıklanabilir, böylece ağın işletilmesi sırasında ortaya çıkan maliyetler ve kapasite arttırım maliyetleri azaltılır.

Varsayımlar: Maliyet analizinde yapılan varsayımlar aşağıda yer almaktadır.

- Operatör ağlarına yapılan yatırımlar genellikle beş yıllık dönemlere göre hesaplanmakta olduğu için beş yıllık toplam maliyet analizi yapılmıştır.
- İki servisin geleneksel ve önerilen çözümden hizmete sunulduğu durum karşılaştırılmış olup, servislerdeki yıllık büyüme oranı %40 olarak alınmış, ilk servis için ilk yıl 200000 müşteri, ikinci servis için ise 300000 müşteri öngörüsünden bulunulmuştur.
- Servislere kapasite bazında lisans ödendiği varsayılmıştır.
- Geleneksel yapıda söz konusu servisleri almak isten müşterilerin trafiği dinamik olarak yönetilemeyeceği için servis lisansına temel oluşturan kapasite kullanımının yüksek olacağı düşünülerek bu servisleri verebilmek adına mevcut ağlarına yeni kapasite ekledikleri varsayımında bulunulmuştur.
- Operatörlerin ONOS tabanlı SFC çözümüne sıfırdan yatırım yaptığı ve servis sürekliliğini sağlamak için yedekli kurduğu varsayılmıştır.
- Tedarik giderleri için artacak veri trafiği maliyetlerini dikkate alarak 100 Gbps hız sağlayan kartlar ve cihazlar düşünülmüştür. Benzer şekilde, SDN ağı açısından, yaprak omurga anahtarları ve sunucularının da gerekli veri hızlarını desteklediği düşünülmektedir.

Bu çalışmada yapılan maliyet hesaplamasında toplam maliyeti bulabilmek için bazı değişkenler kullanılmıştır. $M_{Geleneksel}$ değişkeni geleneksel ağı toplam maliyetini (tedarik ve bakım) temsil etmektedir. M_{SDN} değişkeni ise bu çalışmada önerilen çözümün toplam maliyetini (tedarik ve bakım) göstermektedir.

A değişkeni altyapı yatırımlarını göstermekte olup bunun içerisinde yeni yönlendirici veya mevcut yönlendiricilere ilave edilen yüksek kapasiteli kart yatırımları bulunmaktadır. B değişkeni ise servislerin verilebilmesi için gerekli olan lisans ücreti maliyetine karşılık gelmektedir. Kapasite ve ilgili servisi kullanan abone sayısındaki artışlar oldukça ilgili cihazlarda (güvenlik duvarı, DNS, CGNAT vb.) yüksek kapasite lisansları tedarikçilere ödenmektedir. C değişkeni ise bakım giderlerini göstermektedir. D değişkeni SDN tabanlı mimaride sunulan servislerin yazılım maliyetini göstermektedir.

Maliyeti ifade etmek için birim fiyat olarak “x” kullanılmıştır. Tedarik ve bakım maliyetlerini hesaplayabilmek için gereken kalemlerin beş yıllık (A,B,C,D değişkenleri) maliyet öngörülleri Çizelge 5.5’de yer almaktadır.

Çizelge 5.5. Tedarik ve bakım giderleri karşılaştırması

A. Altyapı Yatırım	1.Yıl	2.yıl	3.Yıl	4.Yıl	5.Yıl	Toplam
Geleneksel Şebeke Yatırım	1,8X	0,6X	0,4X	0X	0,2X	3X
ONOS Tabanlı SFC Çözüm Yatırım	1,1X	0X	0X	0X	0X	1,1X
B. Lisans Yatırım						
Geleneksel Şebeke	10,7X	3,2X	1,6X	3,2X	3,2X	21,9X
ONOS Tabanlı SFC Çözüm	1,8X	0X	0X	0X	0,8X	2,6X
C. Bakım Giderleri						
Geleneksel Şebeke	1,5X	2X	2,2X	2,6X	3X	11,2X
ONOS Tabanlı SFC Çözüm	0,5X	0,9X	1,4X	2X	2,8X	7,3X
D.ONOS Tabanlı SFC Yazılım Maliyet						
ONOS Tabanlı SFC Çözüm Yazılım Maliyet	3,9X	1,2X	1,2X	1,2X	1,8X	9,2X

Geleneksel ağ üzerinden söz konusu iki servisin verilebilmesi için gerekli tedarik maliyetleri Eş. 5.1’de gösterildiği üzere, altyapı yatırımlarından oluşan (A) maliyet ile servis lisans maliyetlerinin (B) toplamından oluşmaktadır.

$M_{Geleneksel_T}$ değişkeni geleneksel ağ üzerindeki tedarik maliyetlerini, $M_{Geleneksel_B}$ ise geleneksel ağ üzerindeki bakım maliyetlerini göstermektedir.

$$M_{Geleneksel_T} = A_1 + B_1 \quad (5.1)$$

Bakım giderleri, Eş. 5.2’de C_1 ile ifade edilmiştir.

$$M_{Geleneksel_B} = C_1 \quad (5.2)$$

Tedarik ve bakım giderlerini içeren toplam yatırım maliyeti, Eş. 5.3’de gösterildiği gibi hesaplanmıştır.

$$M_{Geleneksel} = M_{Geleneksel_T} + M_{Geleneksel_B}$$

$$M_{Geleneksel} = A_1 + B_1 + C_1 \quad (5.3)$$

ONOS tabanlı SFC ağ üzerinden söz konusu iki servisin verilebilmesi için Eş. 5.4’de belirtildiği üzere gerekli tedarik maliyetleri altyapı yatırımlarından oluşan (A) maliyeti, servis lisans maliyetlerinin (B) ve yazılım maliyeti (D) toplamından oluşmaktadır. M_{SDN_T} değişkeni geleneksel ağ üzerindeki tedarik maliyetlerini, M_{SDN_B} ise geleneksel ağ üzerindeki bakım maliyetlerini göstermektedir.

$$M_{SDN_T} = A_2 + B_2 + D_2 \quad (5.4)$$

Bakım giderleri, Eş. 5.5’de C_2 ile ifade edilmiştir.

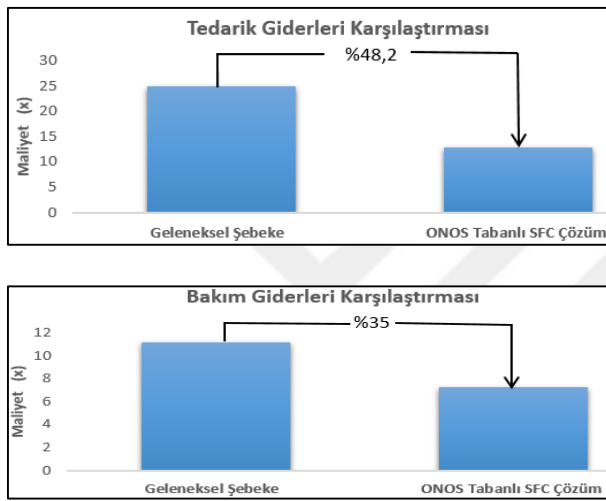
$$M_{SDN_B} = C_2 \quad (5.5)$$

Tedarik ve bakım giderlerini içeren toplam yatırım maliyeti Eş. 5.6’da gösterildiği gibi hesaplanmıştır.

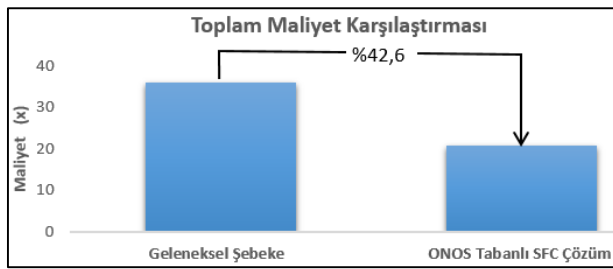
$$M_{SDN} = M_{SDN_T} + M_{SDN_B}$$

$$M_{SDN} = A_2 + B_2 + C_2 + D_2 \quad (5.6)$$

Belirtilen formüller ışığında gerekli hesaplamalar yapılmıştır.



Şekil 5.12. Beş yıllık tedarik ve bakım giderleri karşılaştırması



Şekil 5.13. Beş yıllık toplam maliyet karşılaştırması

Çizelge 5.6’da sonuçlar geleneksel şebeke ve önerilen çözüm için gerekli maliyetler yıllık bazda karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır.

Çizelge 5.6. Toplam maliyet karşılaştırması

Tedarik Giderleri	1.Yıl	2.yıl	3.Yıl	4.Yıl	5.Yıl	Toplam
Geleneksel Şebeke (A+B)	12,5X	3,8X	2X	3,2X	3,4X	24,9X
ONOS Tabanlı SFC Çözüm (A+B+D)	6,8X	1,2X	1,2X	1,2X	2,6X	12,9X
Tedarik Giderleri Farkı (%)	45,7%	68,7%	40,8%	63,4%	24,7%	48,2%

Bakım Giderleri	1.Yıl	2.yıl	3.Yıl	4.Yıl	5.Yıl	Toplam
Geleneksel Şebeke (C)	1,5X	2X	2,2X	2,6X	3X	11,2X
ONOS Tabanlı SFC Çözüm (C)	0,5X	0,9X	1,4X	2X	2,8X	7,3X
Bakım Giderleri Farkı (%)	64%	51,4%	33,9%	20,7%	4,9%	35%

Toplam Maliyet	1.Yıl	2.yıl	3.Yıl	4.Yıl	5.Yıl	Toplam
Geleneksel Şebeke (A+B+C)	14X	5,8X	4,2X	5,8X	6,4X	36,1X
ONOS Tabanlı SFC Çözüm (A+B+C+D)	7,3X	2,1X	2,6X	3,2X	5,4X	20,7X
Toplam Maliyet Farkı (%)	47,6%	62,8%	37,2%	44,4%	15,4%	42,6%

Çizelge 5.6’da gösterilen analiz sonuçlarına göre tedarik giderleri açısından ONOS tabanlı SFC çözümüne Şekil 5.12’de gösterildiği gibi beş yılda %48,2 daha az yatırım yapılacağı öngörülmektedir. Bakım giderleri açısından ise ONOS tabanlı SFC çözümüne Şekil 5.12’de gösterildiği gibi beş yılda %35 daha az yatırım yapılacağı tahmin edilmektedir. Toplam maliyet açısından değerlendirdiğimiz bu çalışmada önermiş olduğumuz ONOS tabanlı SFC çözümüne Şekil 5.13’de gösterildiği gibi beş yılda %42,6 daha az yatırım yapılması ortaya çıkmaktadır.

5.2. İntranet Servisleri için SDN Tabanlı Yönetim Platformu

İntranet, bir kuruluş bünyesindeki bilgilerin paylaşılmasına olanak sağlayan haberleşme ağıdır. Temel amacı, kuruluş bünyesindeki birçok iletişim aracını (bilgisayarlar, telefonlar, video konferans sistemleri, kameralar vb.), yerel alan ağlarını ve geniş alan ağlarını birbirine bağlamaktır.

Günümüzde geleneksel telekom hizmetleri fiziksel topolojilere ve tedarikçilere özgü donanımlara bağımlıdır. Bu bağımlılıkları ortadan kaldırmak için tasarlanmış olan SDN teknolojisi, ağların tasarlanma ve yönetilme şeklini değiştirmektedir. SDN; trafiğin nasıl ele alınacağına karar veren kontrol düzlemini veri düzleminden ayırır. Böylelikle SDN kontrol

düzlemi, ağın veri düzlemi öğeleri (yönlendiriciler, anahtarlar vb.) üzerinde doğrudan kontrol sağlamaktadır. Bu sebeple SDN, uygulamalarda gittikçe daha önemli hale gelmektedir.

Telekom operatörleri, geleneksel şebekelerine ve intranet servislerinin büyük çoğunluğuna yazılım tanımlı ağ tabanlı dinamik şebeke kuralları yönetim mekanizmalarını entegre etmek istemektedirler. SDN tabanlı mimariler sayesinde, operatörler müşterilerine kolayca farklı servisleri tanımlayabilmektedirler. Operatörler genellikle kendilerine ait geniş intranet alanlarına sahiptir. Bu çok geniş intranet alanlarının yönetimi oldukça zordur.

5.2.1. İlgili araştırmalar ve problem durumu

Telekom operatörleri geleneksel şebekelerde intranet servislerinin yönetiminde VLAN yönetimi, bant genişliği yönetimi ve erişim yönetimi uygulamaları başta olmak üzere ciddi problemler yaşamaktadırlar. Bu problemleri özetlemek gerekirse, geleneksel intranet ağlarında;

- Tedarikçi bağımlılığı bulunmaktadır ve maliyetler yüksektir.
- Özellikle aynı segmentteki cihazların birbiri ile olan haberleşmesi kontrol edilemediğinden dolayı güvenlik zafiyetleri bulunmaktadır.
- Anlık değişen ihtiyaçlara göre intranet içerisindeki cihazlara özel bant genişliği tanımlamaları yapılamamaktadır.
- Ağın performansını sürekli izleyebilmek, raporlayabilmek için ilave ürünler tedarik edilmesi gerekmektedir.
- Dinamik yönetim yapılamadığı için ağa bağlı bir cihaz yer değiştirmek istediğinde tanımlamaların baştan yapılma zorunluluğu bulunmaktadır.
- Ağ içerisindeki cihazların otomatik olarak keşfedilmesi için ilave ürünlerin tedarik edilmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada, söz konusu problemleri ortadan kaldırmaya yönelik olarak intranet hizmetleri için ONOS tabanlı SDN platformu geliştirilmiştir. Bu yapının geleneksel yapı ile çalışabilmesi kapsamında çalışmalar yapılmış ve bu kapsamda ONOS'ta birçok geliştirme yapılmıştır. Geliştirdiğimiz platform, mevcut şebeke üzerine entegre edilerek yeni bir

topoloji oluşturulmuştur. Oluşturulan bu topolojide intranet ağ elemanlarını geleneksel anahtara bağlamak yerine, yeni nesil SDN anahtara bağlanmıştır. Oluşturulan bu çözüm canlı şebeke üzerinde farklı trafik yükleri altında test edilerek geleneksel ağlar ile performans kıyaslaması (gecikme, seğirme, paket kaybı, akış kurulum süreleri) ve işlevsel kıyaslama (dinamik VLAN yönetimi, dinamik bant genişliği yönetimi, dinamik erişim yönetimi, istatistik yönetimi, otomatik cihaz keşif ve topolojik gösterim dikkate alınarak) yapılmıştır.

SDN, ağların tasarlanma ve yönetilme şeklini değiştirmektedir. SDN, trafiğin nasıl ele alınacağına karar veren kontrol düzlemini veri düzleminden ayırmaktadır. Böylelikle SDN kontrol düzlemi, ağın veri düzlemi öğeleri (yönlendiriciler, anahtarlar ve diğer orta kutular) üzerinde doğrudan kontrol sağlamaktadır. SDN, sektörde gittikçe daha fazla önemli hale gelmektedir. Birçok ticari anahtar Openflow API destekler hale gelmiştir. Birçok farklı SDN kontrolcü platformu ortaya çıkmıştır [89-91].

Ağ endüstrisi liderlerinin çoğu artık kendi SDN kontrolcülerini üretmiştir (ör. Cisco ACI, Juniper Contrail, Big Switch'in BNC'si, Brocade Vyatta Kontrol Cihazı vb.). Yine de SDN araştırma ve geliştirme çalışmaları devam etmekte olup aşağıda yer verilen açık kaynak projeleri üzerinde yoğunlaşmaktadır [51].

- Linux Foundation tarafından desteklenen OpenDaylight [48],
- Stanford ve Berkeley üniversitelerinin başlatıp ONF'in proje haline getirdiği ONOS [54],
- Big Switch tarafından desteklenen Floodlight projesi [92],
- Juniper ve diğerleri tarafından desteklenen OpenContrail [93].

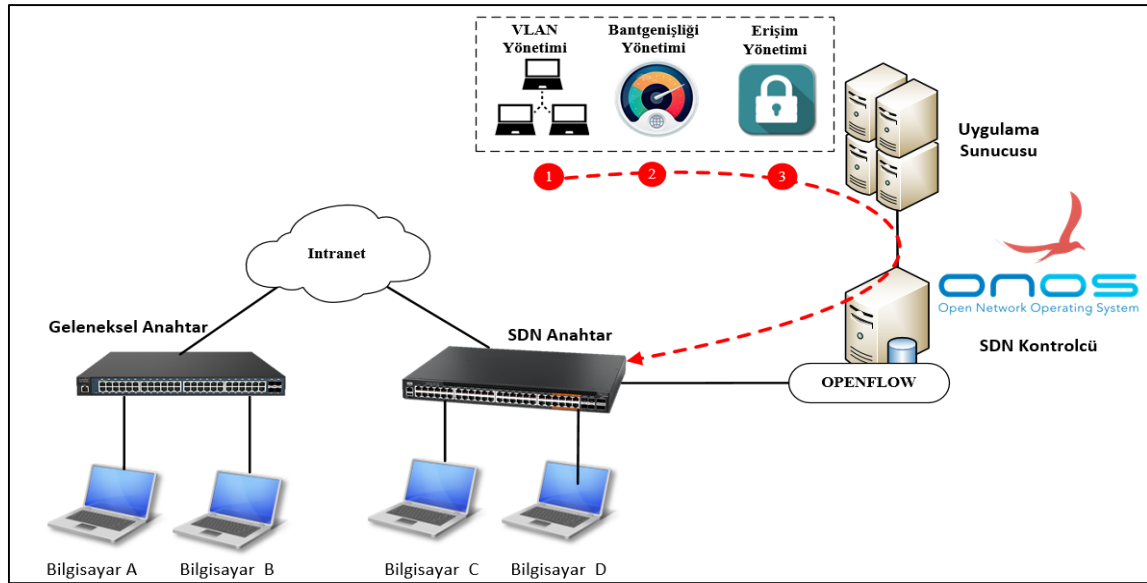
Literatürde açık kaynak kodlu SDN kontrolcülerin performansının ölçülmesi konusunda bir takım çalışmalar yapılmıştır. Bunlardan bir tanesi mininet kullanılarak açık kaynak kodlu Floodlight SDN kontrolcüsünün performans ölçümlerinin yapıldığı çalışmadır [94]. Açık kaynak kod SDN kontrolcülerinden olan ODL ve ONOS'un mimari yapılarının analiz edilerek performans kıyaslamasının yapıldığı çalışmalar mevcuttur [51],[95-96]. Bunların yanında, daha önce yapılan çalışmaları biraz daha genişleterek ONOS, ODL, Floodlight ve Ryu gibi açık kaynak kodlu SDN kontrolcülerinin performans yönüyle karşılaştırmalarının yapıldığı çalışma bulunmaktadır [97]. Yine başka bir çalışmada, ONOS, ODL ve Ryu gibi

popüler SDN kontrolcileri Cbench kullanılarak performansları açısından değerlendirilmiştir [98]. Son olarak, SDN kontrolcileri için mimari yönergeler tanımlanmış ve birçok kontrolcü gecikme, ölçeklenebilirlik ve anahtarlama kapasitesi konusundaki performansları açısından karşılaştırılmıştır [99].

Ancak bu çalışmaların hiçbiri, ağ denetimine esneklik ve çeviklik kazandırmak için SDN paradigmasının intranet ağına nasıl uygulanacağı üzerine yoğunlaşmamıştır. Bizim çalışmamızı mevcut çalışmalardan farklılaştıran ONOS tabanlı SDN platformunun büyük ölçekli intranet altyapılarına uygulanabilirliğini anlayabilmek adına gerçek şebekede performans ve işlevsel testlerin gerçekleştirilmesi, maliyet analizlerin yapılması ve tüm bu parametrelerin geleneksel şebeke ile kıyaslanmasıdır.

5.2.2. Önerilen ONOS tabanlı SDN platform mimarisi

Bu çalışmada, Şekil 5.14'te gösterildiği üzere kurumsal ağlara ve intranet altyapısının problemlerine çözüm oluşturmak amacıyla geliştirilen ONOS tabanlı SDN platformu, kurumsal ağların intranet altyapısına entegre edilerek, politika tabanlı dinamik VLAN yönetimi, dinamik bant genişliği yönetimi ve dinamik erişim kontrol yönetimi sağlanmasına yönelik yeni bir uygulama yöntemi ortaya konulmuştur.

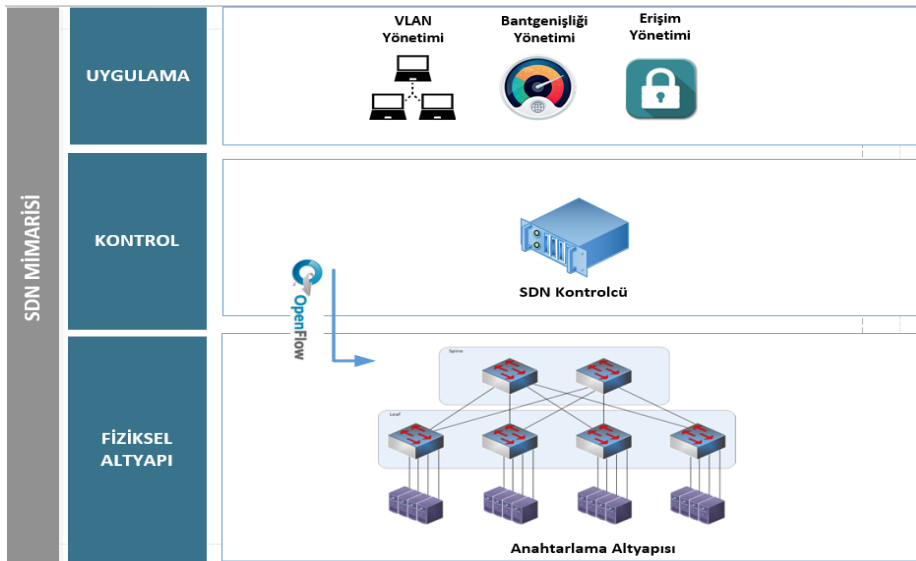


Şekil 5.14. İtranet hizmetleri için ONOS tabanlı SDN çözümü

Servis sağlayıcıların yüksek kullanılabilirlik, ölçeklenebilirlik ve performans ihtiyaçlarını karşılamak için tasarlanmış açık kaynaklı bir SDN kontrolcü olduğu için çalışmamızda ONOS SDN kontrolcü kullanılmıştır [52]. Kablolulu internet, kablosuz internet ve ses gibi intranet servislerinin geliştirilen platform ile entegrasyonunu sağlamak amacıyla üç farklı senaryo geliştirilmiştir. Geliştirilen ONOS tabanlı SDN platformunun özellikleri;

- Politika tabanlı dinamik VLAN yönetimi,
- Politika tabanlı dinamik bant genişliği yönetimi,
- Dinamik erişim yönetimi olarak belirlenmiştir.

Sistem mimarisi: ONOS tabanlı SDN çözüm mimarisi Şekil 5.15’de gösterildiği üzere fiziksel, kontrol ve uygulama olmak üzere üç ana katman içermektedir. SDN şebekenin fiziksel katmanında, ONOS tabanlı SDN kontrolcü ile yönetilmekte olan anahtarlar Openflow protokolü desteklemektedir. Bu anahtarların temel fonksiyonu; kontrol düzleminde bulunan kontrolcü tarafından tanımlanan akış kuralları doğrultusunda kullanıcı trafiğinin ağ iletimini sağlamaktır. Kontrol katmanında, SDN kontrolcü kontrol düzleminde kenar anahtarlar arasındaki Openflow protokolü aracılığıyla yönetim fonksiyonu sağlamaktadır. Uygulama katmanında, dinamik VLAN atama, bant genişliği yönetimi ve ağ erişim kontrol özellikleri mevcuttur. Bu uygulamalar kontrolcünün çalıştığı sunucu üzerinde konumlandırılmıştır. Tasarladığımız bu platform ile geleneksel platform karşılaştırması deneysel çalışmalar başlığı altında detaylıca açıklanmıştır.



Şekil 5.15. ONOS tabanlı SDN çözümünün mimari yapısı.

Çalışma sırasında gözlemlenen ve aşağıda sıralanan problemlerin çözümü için ONOS'ta aşağıdaki geliştirmeler yapılmıştır:

1. Önerilen platform, geleneksel çözümle birlikte kullanıldığında ve bilgisayarlar bu ağlar arasında gidip geldiğinde söz konusu mobil bilgisayarlar için akış kuralları oluşturmada yaşanan sorunlar.
2. IP telefon ve çağrı yöneticisi arasındaki akışlarda yaşanan sorunlar.
3. Aynı anahtarda farklı bir porta taşınan cihazların akışlarında sorunlar.
4. SDN anahtarına da bağlı olan geleneksel bir anahtara bağlı bir bilgisayarın bağlantısı kesildikten sonra silinmeyen akışların neden olduğu sorunlar.

Politika tabanlı dinamik VLAN yönetimi: Geleneksel ağlarda segmentasyon, genellikle VLAN-ID kullanılarak yapılmaktadır. Bu yüzden, şebekeye erişen her bir uç cihaz için VLAN tanımları 2.seviye (layer 2) anahtar üzerinde tanımlanmış olmalıdır. Şebekede farklı bir lokasyona hareket eden bir uç cihaz için, bu tanımların yeni lokasyondaki anahtar portunda yeniden tanımlanması ihtiyacı bulunmaktadır. Bu konfigürasyonlar şebeke yönetimi düşünüldüğünde ciddi bir operasyon yükü ve çaba gerektirmektedir.

Önerilen ONOS tabanlı SDN platformu çözümünde VLAN yönetim modülü Şekil 5.14'de 1 numara ile gösterilmiştir. Tanımlanan kaynak MAC adresinden gelen trafik geleneksel şebekeden ayrılmadan önce politika tanımlı VLAN-ID ile etiketlenir. Bu sayede, uç cihazların bağlı olduğu anahtar portları dinamik olarak, statik yapılandırma ihtiyacı olmadan yönetilmiş olur.

Geleneksel ağlarda anahtarlar üzerinde yapılan statik VLAN yönetiminin yerine bu çalışmada önerilen SDN çözüm ile ağ alt yapısındaki cihazlardan bağımsız merkezi VLAN tanımı yapılabilmekte ve belirlenen politikalar ile dinamik olarak yönetilebilmektedir. Bu sayede servis aktivasyonu kolaylaşmakta ve gerçek zamanlı olarak kurallar uygulanabilmektedir.

ONOS tabanlı SDN platformu kullanılarak VLAN yönetiminin nasıl yapıldığını daha iyi anlamak için SDN kontrolcünden alınan örnek IP paketleri Şekil 5.16'da sunulmuştur. VLAN'lar istemcilere Şekil 5.16'da gösterildiği gibi kaynak IP adreslerine göre atanmıştır.

No.	Time	Source	Destination	Protocol
1	0.000000000	10.244.0.203	10.244.0.1	OpenFlow
2	0.024687948	10.244.0.203	10.244.0.1	OpenFlow
3	0.091407752	10.244.0.203	10.244.0.1	OpenFlow
4	0.129352150	10.244.0.203	10.244.0.1	OpenFlow

> Frame 2: 436 bytes on wire (3488 bits), 436 bytes captured (3488 bits) on interface 0
> Linux cooked capture
> Internet Protocol Version 4, Src: 10.244.0.203, Dst: 10.244.0.1
> Transmission Control Protocol, Src Port: 6653, Dst Port: 34782, Seq: 305, Ack: 1, Len: 368
▼ OpenFlow 1.3
▼ Match
Type: OFPMT_OXM (1)
Length: 12
▼ OXM field
Class: OFPXMC_OPENFLOW_BASIC (0x8000)
0001 011. = Field: OFPXMT_OFB_IPV4_SRC (11)
....0 = Has mask: False
Length: 4
Value: 192.168.5.101
Pad: 00000000
▼ Instruction
Type: OFPIT_APPLY_ACTIONS (4)
Length: 48
Pad: 00000000
> Action
▼ Action
Type: OFPAT_SET_FIELD (25)
Length: 16
▼ OXM field
Class: OFPXMC_OPENFLOW_BASIC (0x8000)
0000 110. = Field: OFPXMT_OFB_VLAN_VID (6)
....0 = Has mask: False
Length: 2
...1 = OFFVID_PRESENT: True
... 0000 1100 1000 Value: 200
Pad: 000000000000

Şekil 5.16. VLAN yönetimi için paket yakalama ekran görüntüsü

Politika tabanlı dinamik bant genişliği yönetimi: Geleneksel ağlarda bant genişliği yönetmek için politika uygulamak pek çok operasyonel yük getirmektedir çünkü tüm aktif uç cihazlarda kullanıcı bazlı ve statik yapılandırma ihtiyacı bulunmaktadır. Bu yüzden, anlık değişen ihtiyaçlara göre politikalarda güncelleme yapmak zordur. Ayrıca canlı sistemlere sürekli müdahalede bulunmak insan hatasına bağlı kesinti risklerini arttırmaktadır.

Önerilen ONOS tabanlı SDN Platformu Çözümünde, tanımlı bant genişliği politikaları Şekil 5.14’de 2 numara ile gösterilmiş olup SDN şebekedeki tüm uç cihazlar için anlık olarak erişilebilir durumdadır. Bant genişliği politikaları, hiç bir cihaz için ayrı tanımlama yapılmasına gerek olmadan şebekeye de gerçek zamanlı olarak uygulanabilir durumdadır. Uygulama, kullanıcı ve alan adı gibi ölçütlere göre esnek bant genişliği politikaları oluşturabilmektedir. Örneğin, farklı bant genişliği politikaları SDN kontrolcü alanındaki Wi-Fi erişim noktalarına dışarıdan bir Wi-Fi yöneticisine ihtiyaç duymadan uygulanabilmektedir. Her bir intranet kullanıcısına ya da her bir intranet cihazına belirli miktar bant genişliği tahsis etmek şebekenin verimli kullanılmasına olanak tanımaktadır.

Geleneksel ağlarda kullanıcıların bağlantılı olduğu anahtar üzerinde kullanıcılara özgü manuel operasyon ile statik olarak yapılabilen kullanıcı bazlı bant genişliği tanımlamaları, bu çalışmada önerilen SDN çözüm ile merkezi olarak tanımlanabilmekte ve dinamik olarak yönetilebilmektedir.

ONOS tabanlı SDN platformu kullanılarak bant genişliği yönetiminin nasıl yapıldığını göstermek için SDN kontrolcünden alınan örnek IP paketleri Şekil 5.17'de gösterilmiştir. Bant genişliği istemciye Şekil 5.17'de gösterildiği gibi kaynak IP adresine göre atanmıştır.

No.	Time	Source	Destination	Protocol
1	0.000000000	10.244.0.203	10.244.0.1	OpenFlow
2	0.024687948	10.244.0.203	10.244.0.1	OpenFlow
3	0.091407752	10.244.0.203	10.244.0.1	OpenFlow
4	0.129352150	10.244.0.203	10.244.0.1	OpenFlow

Frame 4: 172 bytes on wire (1376 bits), 172 bytes captured (1376 bits) on interface 0				
OpenFlow 1.3				
Match				
Type: OFPMT_OXM (1)				
Length: 12				
OXM field				
Class: OFPXM_OPENFLOW_BASIC (0x8000)				
0001 011. = Field: OFPXM_OFB_IPV4_SRC (11)				
.... 0 = Has mask: False				
Length: 4				
Value: 192.168.5.103				
Pad: 00000000				
Instruction				
Type: OFPIT_METER (6)				
Length: 8				
Meter ID: 1				
Meter band				
Type: OFPMBT_DROP (1)				
Length: 16				
Rate: 25000				

Şekil 5.17. Bant genişliği yönetimi için paket yakalama ekran görüntüsü

Dinamik erişim yönetimi: Geleneksel şebekelerde, segmentler arası ağ erişimi güvenlik duvarı politikaları ya da erişim kontrol listeleri (ACL - Access Control List) ile kontrol edilmektedir. Bu sebeple, aynı ağ segmentinde ki uç cihazların birbiri ile iletişimini kontrol etmek mümkün olmamaktadır. Özellikle servis dışı bırakma (DoS - Denial of Services) atağına maruz kalan uç cihazın aynı ağ segmentindeki diğer uç cihazları etkilemesi önlenemeyebilmektedir.

Önerilen ONOS tabanlı SDN platformu çözümünde SDN şebekelerde akışlar SDN kontrolcünün akış kuralları ile ele alındığından, akışlar iki uç cihaz aynı segmentte olsa bile akış kurallarına tabi olmaktadır. Bu kurallar çerçevesinde tanımlanmamış bir akış oluşturulamaz. Aynı zamanda, politika kuralları ve erişimler Şekil 5.14'de 3 numara ile gösterildiği üzere VLAN tanımlarından bağımsız olarak yönetilebilmektedir. Ayrıca MAC,

IP ya da port tabanlı erişim kontrolleri de mevcuttur. İntranet şebekelerde üçüncü şahıslara erişim temin etmek önem arz etmektedir. Bu tip kullanıcı yetkilendirme ve detaylı izin işlemlerine olanak sağlamak için şebekeye bağlantı yapılması sağlanabilmektedir. Aynı zamanda servis seviyeleri ve izin seviyeleri dinamik olarak değiştirilebilmektedir.

ONOS tabanlı SDN platformu kullanılarak erişim yönetiminin nasıl yapıldığını göstermek için SDN kontrolcünden alınan örnek IP paketleri Şekil 5.18’de gösterilmektedir. Örnek olarak, Şekil 5.18’de belirli bir IP adresine erişim reddedilmiştir.

```

No.      Time      Source      Destination      Protocol
-----
1 0.000000000 10.244.0.203 10.244.0.1      OpenFlow
2 0.001679408 10.244.0.203 10.244.0.1      OpenFlow
3 0.001407752 10.244.0.203 10.244.0.1      OpenFlow
4 0.129352150 10.244.0.203 10.244.0.1      OpenFlow
> Frame 1: 372 bytes on wire (2976 bits), 372 bytes captured (2976 bits) on interface 0
> Linux cooked capture
> Internet Protocol Version 4, Src: 10.244.0.203, Dst: 10.244.0.1
> Transmission Control Protocol, Src Port: 6653, Dst Port: 34782, Seq: 1, Ack: 1, Len: 384
> OpenFlow 1.3
> OpenFlow 1.3
> OpenFlow 1.3
> OpenFlow 1.3
▼ OpenFlow 1.3
  Version: 1.3 (0x04)
  Type: OFPT_VFLOW_MOD (14)
  Length: 64
  Transaction ID: 3
  Cookie: 0x00b0000b660d187
  Cookie mask: 0x0000000000000000
  Table ID: 1
  Command: OFPFC_ADD (0)
  Idle timeout: 0
  Hard timeout: 0
  Priority: 2000
  Buffer ID: OFP_NO_BUFFER (4294967295)
  Out port: OFPP_ANY (4294967295)
  Out group: OFPG_ANY (4294967295)
  > Flags: 0x0001
  Pad: 0000
  Match
    Type: OFPMT_OXM (1)
    Length: 12
    ▼ OXM field
      Class: OFPXNC_OPENFLOW_BASIC (0x8000)
      0001 011. = Field: OFPXNT_OFB_IPV4_SRC (11)
      .... ...0 = Has mask: False
      Length: 4
      Value: 192.168.3.33
      Pad: 00000000

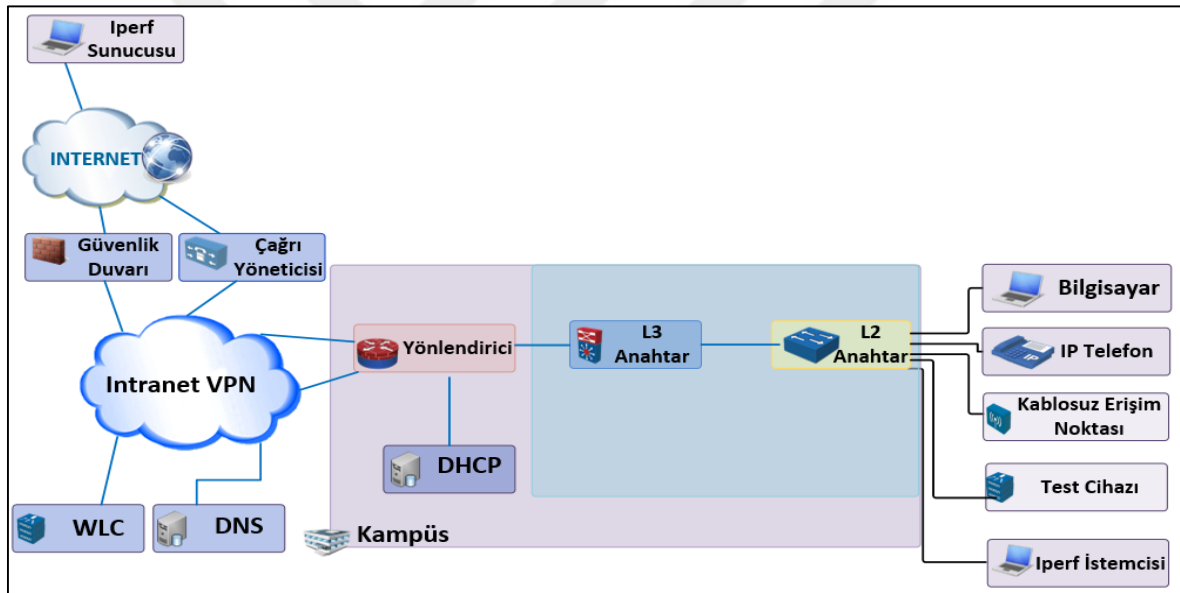
```

Şekil 5.18. Erişim yönetimi için paket yakalama ekran görüntüsü.

Dinamik erişim yönetim özellikleri 2.seviye, 3.seviye ve 4.seviye katmanlarda erişim kontrolünü, alan adı ve dinamik konfigürasyonla erişim engellemeyi içermektedir. Söz konusu erişim engellemelerini yapabilmek için geleneksel ağlarda ilave olarak güvenlik duvarı kullanılmasını gerektirmektedir. Bu çalışma da geleneksel yapılardan farklı olarak ilave güvenlik duvarı kullanmak yerine, SDN kontrolcü üzerinde merkezi olarak politikalar belirlenmektedir. Böylece uç cihazlardan bağımsız olarak tüm intranet ağında ilgili erişim politikaları uygulanabilmektedir. Bunun yanında güvenlik duvarları ile Şekil 5.15’de görülen bilgisayar A ile bilgisayar B gibi uç terminallerin birbiri ile erişim güvenliği sağlanamazken geliştirilen platformdaki SDN kontrolcü sayesinde ilave güvenlik duvarına ihtiyaç duymadan bilgisayar C ve bilgisayar D’de erişim güvenliği sağlanabilmektedir.

5.2.3. Deneysel çalışmalar

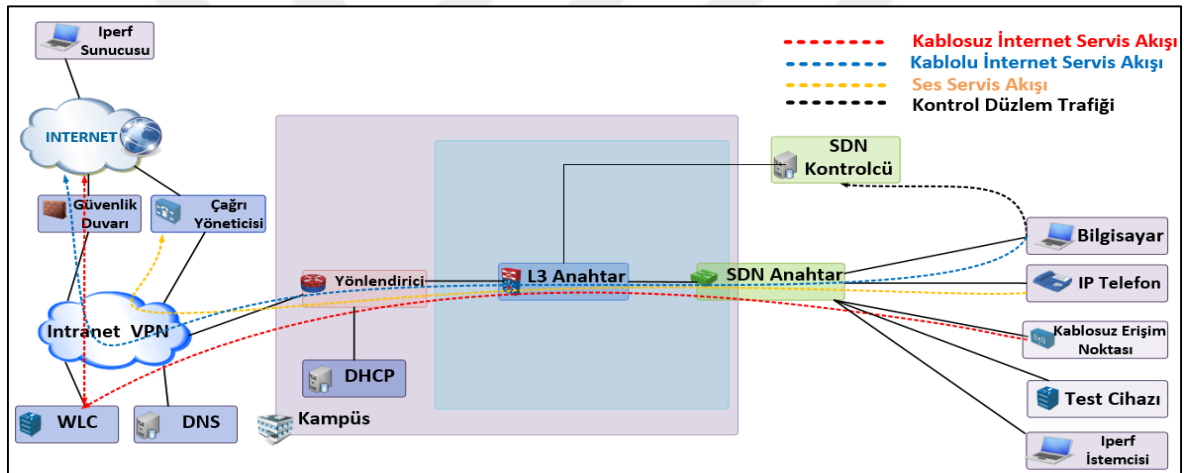
Deneysel uygulama düzeneği: Geleneksel intranet mimarisini yansıtmak amacıyla oluşturulan deney düzeneği Şekil 5.19’da gösterilmektedir. Bu mimaride, L2 anahtarları, L3 toplama anahtarları, internet erişimi için yönlendiriciler, DHCP (Dynamic Host Configuration Protocol - Dinamik Host Yapılandırma Protokolü) sunucuları, güvenlik duvarları, WLC (Wireless Local Area Network Controller - Kablosuz Yerel Alan Ağ Kontrolcüsü) ve DNS (Domain Name Server - Alan Adı Sunucusu) yer almaktadır. L2 anahtarları üzerinde ise, intraneti oluşturan bilgisayar, IP telefon ve kablosuz erişim noktası gibi uç elemanlar ile performans ve fonksiyonel testlerin yapılmasını sağlayabilmek için konumlandırılan test cihazı ile iperf istemcisi yer almaktadır.



Şekil 5.19. Geleneksel intranet mimarisini içeren deney düzeneği

Geliştirilen SDN platformu mimarisi için oluşturulan deney düzeneği Şekil 5.20’de gösterilmiştir. Fiziksel test topolojisi Şekil 5.20’de görüldüğü gibi L2 anahtarının yerine SDN anahtar ve bunu yöneten SDN kontrolcü konumlandırılmıştır. Bu platform şebeke üzerine kurularak entegre edilmiştir. İtraneti oluşturan ekipmanlardan bilgisayar, IP Telefon ve kablosuz erişim noktası gibi elemanlar ile performans ve fonksiyonel testlerin yapılmasını sağlayabilmek için konumlandırılan test cihazı ve iperf istemcisi doğrudan SDN anahtar üzerine bağlanmıştır.

Bu elemanlarla sağlanan intranet servisleri (kablolu internet, kablosuz internet, ses) canlı olarak şebeke üzerinde teste tabi tutulmuş olup servis akışları Şekil 5.20’de yer almaktadır. SDN kontrolcü ise fiziksel olarak L3 anahtara bağlanmıştır. Kablo ile internet servisi için bilgisayardan gelen trafik yol üzerindeki anahtarlara ve yönlendiriciye uğradıktan sonra güvenlik duvarına ulaşmakta ve buradan internete erişmektedir. Ses servisi için IP telefon yol üzerindeki anahtarlar ve yönlendiriciden geçtikten sonra çağrının yönetildiği çağrı yöneticisi (call manager) ekipmanına gelmekte ve çağrı kurulumunu yapmaktadır. Son olarak kablosuz internet servisi için kablosuz erişim noktasından gelen trafik ise kablosuz yerel alan ağ kontrolcüsüne yönlendirilmekte ve buradan güvenlik duvarına uğrayarak internete erişim sağlanmaktadır. Tüm servislerin kontrol düzlem trafiği yani sinyalleşmesi SDN kontrolcüsü tarafından merkezi olarak kontrol edilmektedir.



Şekil 5.20. Geliştirilen intranet şebeke mimarisi için oluşturulan deney düzeneği

Deney düzeneğinde kullanılan öğeler aşağıdaki çizelgede gösterilmiştir.

Çizelge 5.7. Deney düzeneğinde kullanılan ağ elemanları ve özellikleri

Ağ elemanı	Özellikleri
SDN Kontrolcü	• Xeon E5-2620 v4 2.1GHz,20M Cache,8.0GT/s QPI, Turbo • 1x 16GB DDR4 • 4x 1GE
SDN Anahtar	• 48 x 1GE • 4 x 10 Gigabit SFP+ • 16 Gbps anahtarlama kapasitesi • 2 GB DDR3

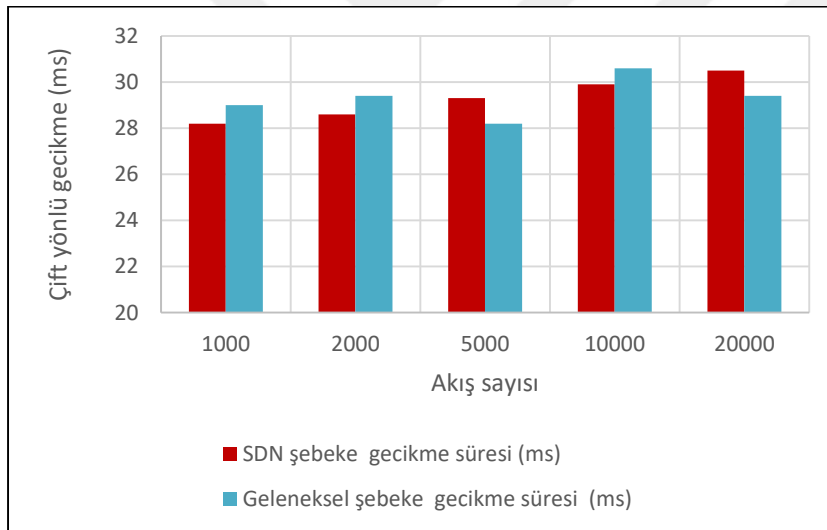
Çizelge 5.7. (devam) Deney düzeneğinde kullanılan ağ elemanları ve özellikleri

L2 Anahtar	• 48 x 1GE • 4 x 10 Gigabit SFP+ • 16 Gbps anahtarlama kapasitesi • 64 MB DRAM
L3 Anahtar	• 24 x 1GE • 12 x 10 Gigabit SFP+ • 32 Gbps anahtarlama kapasitesi • 128 MB DRAM
Yönlendirici	• 24 x 1GE • 16 x 10 Gigabit SFP+ • 1,8 Gbps anahtarlama kapasitesi • 512 MB DRAM
DHCP	Windows DHCP Sunucu
WLC	• 500 adet erişim noktasına desteği • 8 x Gigabit SFP
DNS	Windows DNS Sunucu
Çağrı Yöneticisi	• Standart protokoller, IP Telefon, Video Konferans ve zengin içerik destekleri
Güvenlik duvarı	• Aynı anda 10M eş zamanlı oturum desteği
Iperf sunucusu	• Iperf aracı kullanılarak farklı sayıda akış üretmektedir.
Iperf istemcisi	• Iperf aracı kullanılarak farklı sayıda akışı almaktadır.
Test cihazı	• Gecikme, seğirme (jitter), paket kaybı gibi performans parametrelerini ölçümlemektedir.

Ölçümleme yöntemi: Önerilen ONOS tabanlı SDN platformunun performansını ölçümleyebilmek adına iperf aracı kullanılarak değişen sayıda trafik akışı (1000, 2000, 5000, 10000 ve 20000) eş zamanlı olarak oluşturulmuş olup her trafik akışı 400 saniye sürmektedir. Söz konusu trafik akışları; Şekil 5.19 ve 5.20'deki topolojilerde görüleceği üzere değişen trafik yükü altında geleneksel şebeke ile önerilen intranet şebekesi arasındaki performans kıyaslaması yapabilmek amacıyla iperf sunucu ile iperf istemci arasında oluşturulmaktadır. Performans ölçümleri, test cihazı tarafından gönderilen ICMP (Internet Control Message Protocol - İnternet Kontrol Mesaj Protokolü) paketlerinin iperf sunucularına gönderilmesi yoluyla elde edilen gecikme, seğirme ve paket kaybı parametrelerine göre yapılmaktadır. Gecikme, seğirme ve paket kaybı ölçümleme testleri

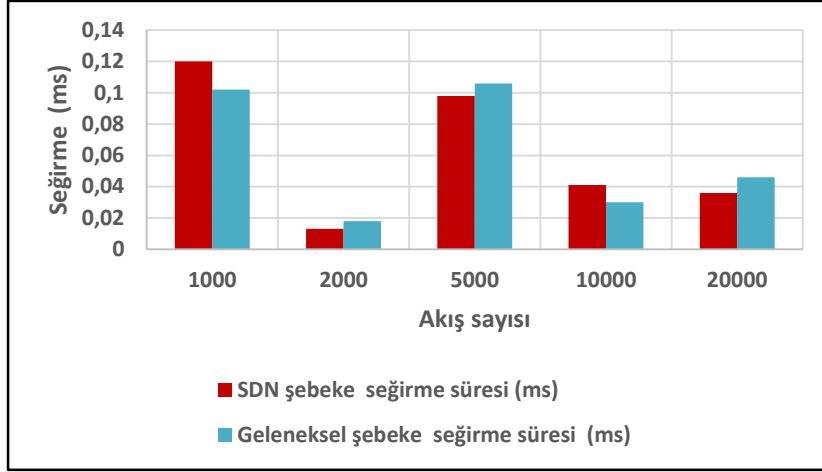
için her test adımında 100 adet ICMP paketi iletilmiş ve başarı durumu raporlanmıştır. Her paketin boyutu 64 byte'dır. Buna ek olarak, akışın ilk paketinin anahtarda alınması ile paket iletiminin [100] tamamlanması arasındaki süre olarak tanımlanan akış kurulum süresi, değişken trafik yükü altındaki testlerde ölçümlenmiştir. Bu parametreyi ölçümleyebilmek için, hem iperf istemcisinden hem de SDN anahtarından giden paket trafiği yakalanmaktadır ve ardından birbiriyle karşılaştırılmaktadır. Iperf istemcisinin giden paketleri ile SDN anahtarı arasındaki zaman farkı, akış kurulum süresini belirlemektedir.

Deneysel bulgular ve değerlendirme: Geleneksel intranet şebekesi mimarisi ile geliştirmiş olduğumuz ONOS tabanlı SDN mimarisi performans açısından karşılaştırılmıştır. Farklı trafik yükleri altında yapılan testlerde Şekil 5.21'de gösterilen çift yönlü gecikme sürelerinin 28 ms ile 31 ms arasında değiştiği görülmüştür.



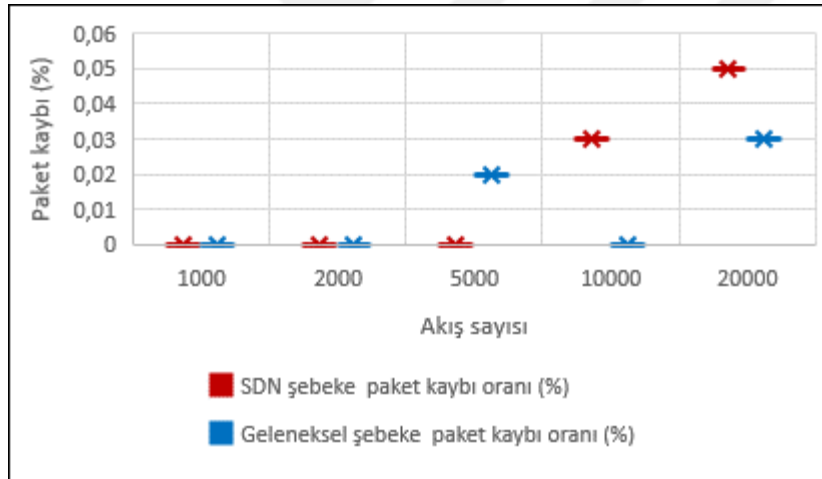
Şekil 5.21. Gecikme süresine göre performans karşılaştırması

Yapılan seğirme testlerinde Şekil 5.22'de gösterildği gibi seğirme sürelerinin 0,013 ms ile 0,12 ms arasında değiştiği gözlemlenmiştir.



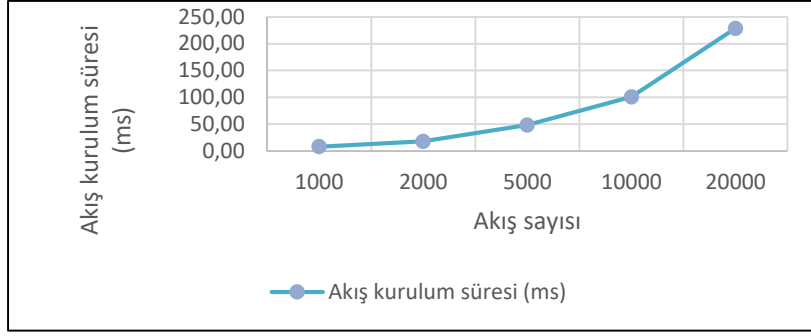
Şekil 5.22. Seğirme süresine göre performans karşılaştırması

Paket kaybını tespit etmeye yönelik yapılan testlerin neticesinde ise paket kayıplarının 0 ile %0,05 arasında değiştiği gözlemlenmiştir.



Şekil 5.23. Paket kaybı oranına göre performans karşılaştırması

Farklı trafik yükleri altında yapılan testler neticesinde elde edilen Şekil 5.21, 5.22 ve 5.23'deki gecikme, seğirme ve paket kaybı sonuçlarında görüleceği gibi her iki mimaride de performans değerlerinin yaklaşık olarak birbirine eşit olduğu görülmüştür. Değişen sayıda eşzamanlı akış için ölçülen ortalama akış kurulum süreleri Şekil 5.24'de gösterilmektedir. Ortaya çıkan değerlerden de anlaşılacağı gibi, önerilen platform yoğun trafik altında iyi ölçeklenmektedir ve eşzamanlı 20000 akışın oluşturduğu trafik altında 250 ms'den daha az toplam akış kurulum süresine sahiptir. Ayrıca, akış başına akış kurulum sürelerinin 8 ila 14 mikrosaniye arasında olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 5.24. Eşzamanlı alınan akışlar için akış kurulum süreleri

Geleneksel intranet ağı ile ONOS tabanlı platformun işlevsel olarak karşılaştırılması:

Geleneksel intranet ağları ile ONOS tabanlı SDN platformu kullanılan intranet şebekesinin işlevsellik açısından kıyaslanması Çizelge 5.8’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.8. Geleneksel şebeke ile önerilen platformun işlevsel olarak karşılaştırılması

	Geleneksel intranet şebekesi problem	Önerilen çözüm sonucu	Test senaryosu
Dinamik VLAN Yönetimi	Şebekeye erişen her bir uç cihaz için VLAN tanımları L2 anahtar üzerinde önceden tanımlanmış olmalıdır. Şebekede farklı bir lokasyona hareket eden bir uç cihaz için, bu tanımların yeni lokasyondaki anahtarda yeniden tanımlanması ihtiyacı bulunmaktadır. Bu tanımlamalar şebeke yönetimi düşünüldüğünde ciddi bir operasyon yükü ve çaba gerektirmektedir.	SDN kontrolcü üzerinde tanımlanan politikalara göre kullanıcılar istenen VLAN ile etiketlenebilmektedir. Böylece uç cihaz bağımsız merkezi olarak tanımlanabilen dinamik bir VLAN yönetimi sağlanabilmektedir.	Farklı uç cihazların (Bilgisayar, IP telefon vb.) farklı VLAN ile etiketlenmesi için gerekli politikalar kontrolcü üzerinde tanımlanmıştır. Uç cihazlardan bilgisayar olan SDN anahtarın bir portuna bağlanmıştır. Bilgisayarın kendisi için önceden belirlenen IP havuzundan IP olarak ağ erişimi sağladığı görülmüştür. Tanımlamalarda herhangi bir değişiklik yapmadan aynı porta IP telefon bağlanmış ve yine ilgili cihaz için belirlenen IP havuzundan IP olarak ağ erişim sağladığı görülmüştür. İki farklı uç cihazın aynı porta bağlanarak daha önceden ilgili cihazlara için belirlenen VLAN üzerinden IP alması ve çalışması sağlanmıştır.

Çizelge 5.8. (devam) Geleneksel şebeke ile önerilen platformun işlevsel olarak karşılaştırılması

Dinamik Bant Genişliği Yönetimi	Bant genişliği yönetimini de içeren servis kalite yönetimi için politika uygulamak pek çok operasyonel yük getirmekte ve tüm aktif uç cihazlarda kullanıcı bazlı ve statik yapılandırma ihtiyacı bulunmaktadır.	SDN kontrolcü üzerinde tanımlanan bant genişliği, servis kalitesi politikaları tüm ağa uygulanabilmektedir. Bu sayede merkezi ve dinamik bir servis kalitesi yönetimi yapılabilmektedir.	Farklı uç cihazlar için farklı veri indirme ve veri yükleme hızlarında sınırlandırma yapıldığı görülmüştür. Kontrolcü üzerindeki sınırlamalarda değişiklik yapılarak değişikliklerin uygulandığı gözlemlenmiştir.
Dinamik Erişim Yönetimi	Segmentler arası ağ erişimi güvenlik duvarı ya da erişim kontrol listeleri ile kontrol edilmektedir. Aynı ağ segmentinde ki uç cihazların birbiri ile iletişimini kontrol etmek mümkün olmamakta bu durumda güvenlik zafiyetlerine sebep olmaktadır.	Akışlar SDN kontrolcü tarafından anahtarlara iletilen akış kuralları ile gerçekleştiği için iki uç cihaz aynı segmentte olsa dahi erişimleri akış kurallarına tabidir. Aynı zamanda VLAN tanımından bağımsız olarak MAC adres, IP adres, port bazlı politika kuralları ile erişimler yönetilebilmektedir.	Aynı segmentteki iki uç birim arasındaki erişimin kontrolcü üzerinde tanımlanan erişim politikaları ile engellendiği trafik başlatılarak trafiğin geçmediği görülmüştür.
İstatistik Yönetimi	Performans, alarm vb. yönetim araçları olarak ilave ürünler temin edilmek zorundadır. Ayrıca performans metrikleri kısıtlı ve cihaz performansına bağımlı olarak sunulabilmektedir.	Kontrolcü üzerinde ilave bir ürüne gerek kalmadan akış bazlı trafik metrikleri toplanmaktadır.	Kontrolcü üzerinde akış bazlı trafik metrikleri toplandığı gözlemlenmiştir. Ayrıca ağ bileşenleri (kontrolcü, anahtar vb.) içinde istatistik bilgileri görülmüştür. (Örnek olarak kontrolcü Cpu, Ram ve Ddisc)

Çizelge 5.8. (devam) Geleneksel şebeke ile önerilen platformun işlevsel olarak karşılaştırılması

VNF Entegrasyonu	Geleneksel ağlarda anahtarların yetenekleri ile sınırlı kalmaktadır ve farklı bir yetenek ihtiyacı olduğunda o yeteneklere sahip yeni bir donanım (Güvenlik duvarı, DPI vb.) kullanılmaktadır.	Uç cihaz olarak x86 cihazlar kullanılabilmesi ile bu cihazlar üzerinde istenilen yetenekler sanal ağ fonksiyonları kullanılarak sağlanabilmektedir.	Kurulan açık kaynaklı bir VNF uygulaması üzerinden trafik bilgileri gözlemlenmiştir. Uygulama bazı erişim engelleme yeteneği görülmüştür.
Otomatik Cihaz Keşfi ve Topolojik Gösterim	Geleneksel ağlarda anahtarların otomatik keşfi ve topolojik gösterim için ilave ürünler temin edilmek zorundadır.	Tüm cihaz ve kullanıcı bilgileri ve ağ içerisindeki tüm değişiklikler ilave bir ürüne gerek kalmadan merkezi SDN kontrolcüye bildirilmektedir. Bu sayede çözüm içerisinde istenilen şekilde kendilerinin geliştirdiği topolojik gösterim arayüzü verilmekte ve otomatik cihaz keşif yeteneği sunulmaktadır.	SDN anahtara bağlı uç cihazların bağlantı durumları anlık olarak gözlemlenmiştir. Uç cihazlar topoloji üzerinde görülebilmüş, uç cihaz bağlantısını koparma ve tekrar bağlama yapılarak dinamik topoloji değişimi görülmüştür.

5.2.4. Maliyet analizi

Geleneksel intranet şebekesi ile ONOS tabanlı SDN platformunun maliyet karşılaştırması yapılırken aşağıdaki varsayımlar dikkate alınmıştır.

- Operatör ağlarına yapılan yatırımlar genellikle beş yıllık dönemlere göre hesaplanmakta olduğu için beş yıllık toplam maliyet analizi yapılmıştır.
- İşletmenin 1.yıl 2000 adet, 2. ve 3. yıllarda 1000'er adet 4. ve 5.yıllarda ise 500'er adet anahtar tedarik ettiği varsayılmıştır (Çizelge 5.9).

- Yedekli iki merkeze kurulacak olan SDN kontrolcü maliyetleri SDN çözümünün tedarik maliyetine yansıtılmıştır.

Çizelge 5.9. Kurulan anahtar sayılarının yıllara göre değişimi

1.Yıl	2.yıl	3.Yıl	4.Yıl	5.Yıl	5 Yıl Toplam
2.000	1.000	1.000	500	500	5000

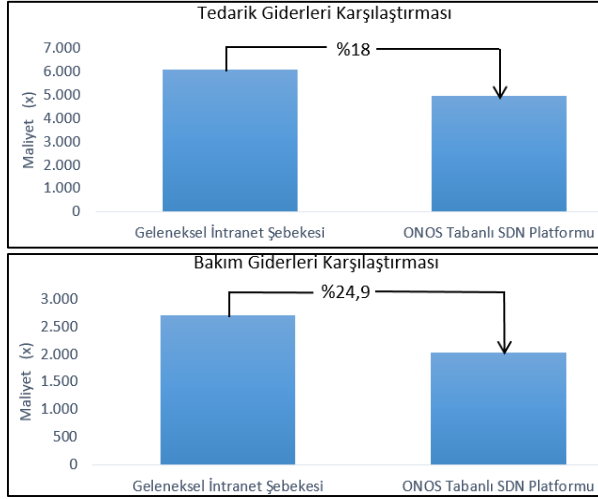
Maliyeti ifade etmek için birim fiyat olarak “x” kullanılmıştır. Çizelge 5.10'da sonuçlar geleneksel intranet şebeke ve önerilen çözüm için gerekli maliyetler yıllık bazda karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır.

Çizelge 5.10. ONOS tabanlı SDN platform ile geleneksel şebeke maliyet karşılaştırması

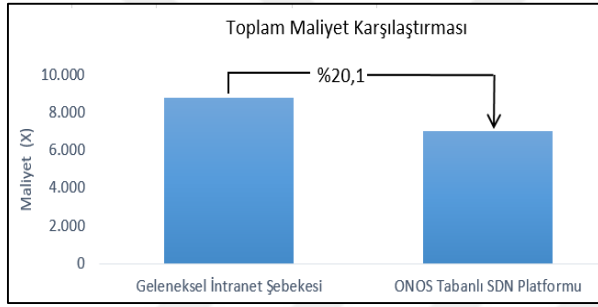
Tedarik Giderleri	1.Yıl	2.Yıl	3.Yıl	4.Yıl	5.Yıl	Toplam
Geleneksel İtranet Şebekesi	2441X	1220X	1220X	610X	610X	6.101X
ONOS Tabanlı SDN Platformu	2002X	1000X	1000X	500X	500X	5.002X
Tedarik Giderleri Farkı	18,0%	18,1%	18,1%	18,1%	18,1%	18,0%

Bakım Giderleri	1.Yıl	2.Yıl	3.Yıl	4.Yıl	5.Yıl	Toplam
Geleneksel İtranet Şebekesi	293X	439X	586X	659X	732X	2.709X
ONOS Tabanlı SDN Platformu	220X	330X	440X	495X	550X	2.035X
Bakım Giderleri Farkı	24,8%	24,8%	24,9%	24,9%	24,9%	24,9%

Toplam Maliyet	1.Yıl	2.Yıl	3.Yıl	4.Yıl	5.Yıl	Toplam
Geleneksel İtranet Şebekesi	2734X	1660X	1806X	1269X	1343X	8.812X
ONOS Tabanlı SDN Platformu	2222X	1330X	1440X	995X	1050X	7.037X
Toplam Maliyet Farkı	18,7%	19,9%	20,3%	21,6%	21,8%	20,1%



Şekil 5.25. Beş yıllık tedarik ve bakım giderleri karşılaştırması



Şekil 5.26. Beş yıllık toplam maliyet karşılaştırması

Yapılan analiz sonuçlarına göre tedarik giderleri açısından ONOS tabanlı SDN platformu çözümüne Şekil 5.25’de gösterildiği gibi beş yılda %18 daha az yatırım yapılacağı öngörülmektedir. Bakım giderleri açısından ise ONOS tabanlı SDN platformu çözümüne beş yılda %24,9 daha az yatırım yapılacağı tahmin edilmektedir. Toplam maliyet açısından değerlendirdiğimiz bu çalışmada önermiş olduğumuz ONOS tabanlı SDN platform çözümüne geleneksel intranet şebekesine oranla Şekil 5.26’da gösterildiği gibi beş yılda %20,1 daha az yatırım yapılması ortaya çıkmaktadır.

5.3. SDN Tabanlı Genişbant Erişim Platformu

PON (Passive Optical Network – Pasif Optik Ağ), son kullanıcılara geniş bant ağ erişimi sağlamak için kullanılan fiber optik telekomünikasyon teknolojisidir. Geleneksel pasif optik ağ teknolojileri, uzun bir geçmişe ve yaygın kullanıma sahip olsalar da, operatörlerin bu teknolojileri kullanırken karşılaştıkları bazı zorlukların olduğu bilinmektedir. Bu çalışmada, ONF çatısı altında geliştirilen SEBA teknolojisinin sabit erişim şebekeye uygulanarak tedarikçi bağımlılığını önemli ölçüde azaltarak söz konusu bu problemlere çözüm getirilmesi hedeflenmiştir.

5.3.1. Bakır ve fiber teknolojilerin gelişimi

Günümüzde operatörlerce sahalarda kullanılan ve benimsenen çeşitli sabit erişim şebeke teknolojileri bulunmaktadır. Operatörler tarafından sahada çoğunlukla bakır ve fiber uygulamalar kullanılsa da, sabit şebekede daha esnek yapılar kurulmasını sağlayan kablolu çözümler de erişim çözümlerinin arasında yer almaktadır.

Erişim şebekesinde daha eski geçmişe sahip olan ve operatörlerce çok yaygın kullanılan xDSL (Digital Subscriber Line - Dijital Abone Hattı) ve DOCSIS (Data Over Cable Service Interface Specification - Veri Aşkın Kablo Hizmeti Arabirim Kuralı) teknolojileri ise bakır üzerine geliştirilen ve aktif kullanımı olan teknolojilerdir. Uzun bir geçmişe sahip olmasına karşı, bakır teknolojileri de artan hız ihtiyaçlarını karşılamak için gelişimine devam etmektedir. Bakır üzerinden kısa mesafelerde gigabit üzeri hızlar verilmesini hedefleyen G.Fast (Gigabit Fast - Gigabit Hız) [101] ve G.Hn (Gigabit Home Network - Gigabit Ev Ağları) gibi teknolojiler olduğu gibi, uzun mesafede 300 Mbps hedefine sahip 35 MHz teknolojileri de hızla gelişimine devam etmektedir.

Fiber optik ağ çözümleri, günümüzde yüksek hızda veri transferi sağlaması, daha uzun mesafelere verilerin taşınabilmesi, çevresel etmenlerden etkilenmediği için daha kaliteli servis sunulmasını sağlaması gibi nedenlerden ötürü bakır teknolojilerine kıyasla avantajları bulunmaktadır. Son kullanıcıya pasif bir şebeke üzerinden optik sinyalleşmeyi sağlayan PON şebekesi, geniş uygulama alanına sahip olması ve yeni ihtiyaçlara karşı çözümler sunabilmesi sayesinde güncelliğini korumaktadır. PON mimarisinde OLT (Optical Line Terminal - Optik Hat Terminalleri) servis sağlayıcının merkezi ofisine konumlandırılırken,

ONU (Optical Network Unit - Optik Ağ Üniteleri) son kullanıcıların yakınında konumlandırılmaktadır. Yüksek trafik ihtiyacını karşılarken, diğer birçok sabit erişim teknolojisine göre düşük gecikme sağlayabilen PON şebekesi, mobil erişim cihazlarının da toplama noktası olarak tartışılmaya başlanmıştır [102].

Dünyada yaygın kullanımı olan PON çözüm teknolojileri arasında GPON (Gigabit Passive Optical Network - Gigabit Pasif Optik Ağ), EPON (Ethernet Passive Optical Network - Ethernet Pasif Optik Ağ), X gigabit pasif optik ağ XG-PON (X Gigabit Passive Optical Network – X Gigabit Pasif Optik Ağ) ve XGSPON (X Gigabit Symmetric Passive Optical Network - X Gigabit Simetrik Pasif Optik Ağ) bulunmaktadır. Bunların yanı sıra NG-PON2 (Next Generation Passive Optical Network 2 - Yeni Nesil Pasif Optik Ağ 2), gelişime açık alanlardan birisi olan fiber teknolojileri içerisindeki yeni nesil PON teknolojisidir. NG-PON2’de tek bir fiber kılı üzerinden 40 Gbps hıza erişebilen [103] TWDM (Time and Wavelength Division Multiplexed - Zaman Bölümlü Dalga Çoklayıcı) yapısı erişim şebekesine uygulanabilmektedir.

5.3.2. İlgili araştırmalar ve problem durumu

Standartları uygulayarak üretilen geleneksel PON sistemleri, çoğunlukla aynı işlevselliklere sahiptir ve operatörlerin çoğu isteğini karşılayabilmektedir. Ancak standartların kapsamadığı alanlar olduğu için, üreticilerin hazırladıkları son ürünlerde bazı farklılıklar oluşabilmektedir. Bu durum operatör tarafında farklı üreticiler için farklı uzmanlıklara sahip insan kaynağını bulundurma yükünü getirmektedir. Çünkü üreticiler kendi komut ve yönetim ara yüzlerini kullanmaktadırlar. Bununla birlikte, sistemlerdeki farklılıklar aynı zamanda operatörlerin operasyon ve entegrasyon noktalarını kötü yönde etkilemektedir. Çünkü tüm üreticiler için farklı entegrasyon tanımları ve operasyonel kaynak ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Operatörlerin karşılaştığı diğer bir zorluk ise, şebekede ihtiyaçların değişmesiyle yapılması gereken geliştirmelerdir. Geleneksel şebekelerde yenilikler ve geliştirmeler, bütünüyle üreticiler tarafından üstlenilmektedir. Bu durum hem son üründe üreticiler arasında farklılaşmaya, hem de geliştirme süresinin uzamasına neden olmaktadır. Üreticiler, bütün operatörlerden aldıkları geliştirme isteklerini yılın belli dönemlerinde tek bir yazılım ile karşılamayı hedefler ancak buna rağmen her operatörün ihtiyacını karşılamakta güçlük çekmektedirler. Hatta üreticiler zamanla ürünlerin yaşam döngülerini bitirerek, bu ürünlerde karşılaşılan yeni problemlere çözüm sağlayacak yazılım desteklerini

tamamıyla sonlandırabilmekte ve operatörlerin ihtiyaçlarını yok sayabilmektedir. Operatörler bu durumda yazılımla çözüm sağlanabilecek sistemler için yatırım ihtiyacı duyar hale gelmekte ve üreticiler tarafından sistemleri değiştirilmeye zorlanmaktadır. Geleneksel GPON ağlarda karşılaşılan bir başka büyük problem ise diğer birçok erişim sisteminin aksine üreticiler arası birlikte çalışabilirlik yeteneğinin çok kısıtlı olmasıdır. OLT ve ONU sistemleri üreticiye özel lisans ve sinyalleşmeler ile sınırlandırılmış ve bağımlılığa sebep olmuştur. Bu durum ise operatörlerin sahaya yayılım planlamalarını büyük ölçüde etkilemektedir.

Bu çalışmada, ONF çatısı altında geliştirilen SEBA teknolojisinin sabit erişim şebekeye uygulanarak, söz konusu bu problemlere çözüm getirilmesi hedeflenmiştir.

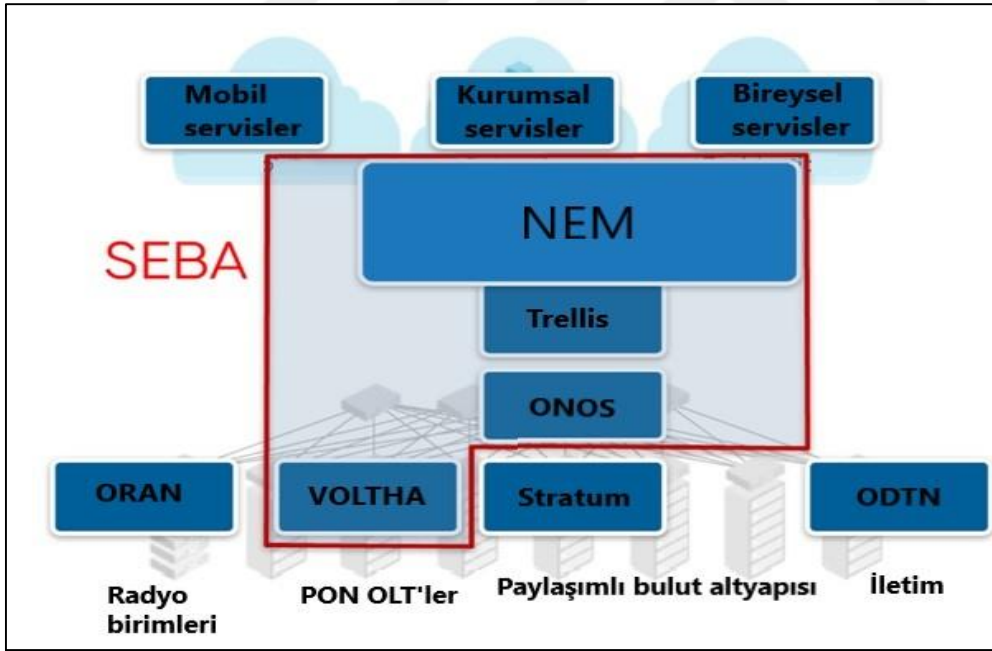
5.3.3. SEBA mimarisi

Sanallaşma kavramının internet altyapı sağlayıcılarının gündemine gelmesi ile birlikte, geleneksel ağların kurulma yöntemlerinde değişiklikler olması öngörülmektedir. Bu da operatörler tarafından müşterilere sağlanan servislerin altyapılarında değişikliğe neden olacaktır. Bilgi teknolojileri sektörünün uzun zamandır aşına olduğu sanallaşma terminolojisi, telekom sektöründe nispeten yeni bir kavram olarak ortaya çıkmaktadır. Bu yeni yapı, altyapı sağlayıcılara yeni pazar alanları açmaktadır. Sanallaşma ile birlikte operatörlere sağlanabilecek yenilikler şu şekilde sıralanabilir: sanallaşma ile birlikte altyapının üçüncü şahıslara tekrar satılabilmesi, özel ihtiyaçları karşılayarak şebeke farklılaştırılmasının sağlanması, özel ağların oluşturulabilmesi, şebeke altyapı maliyetlerinin azaltılması ve altyapı sağlama sürecinin yönetilebilir servisler olarak sunulabilmesi mümkün olacaktır [104].

Operatörlerin alt yapısında kullandıkları donanımların sanallaşma süreçleri farklı seviyelerde değişiklik göstermektedir. Sayıca daha az olan çekirdek şebeke donanımlarında ve veri merkezlerinde ki sanallaşma belirli bir olgunluğa ulaşarak operatörlerin kullanımına uygun hale gelmiştir. Müşteri servisleri geleneksel yapıda, ethernet ve IP seviyesinde ayrıştırılmaktadır. Ancak sanallaşmanın tüm şebekeye uygulanması ile birlikte, ortak altyapı kullanan servislerde ethernet ve IP seviyesindeki ayrıştırmanın ötesine geçerek daha özelleştirilebilir ağların kurulması mümkün olacaktır. Sanallaşmadan elde edilmesi planlanan faydanın en yüksek seviyeye çıkarılmasını hedefleyen operatörler, çekirdek

şebeke donanımlarındaki sanallaştırmanın tek başına yeterli olmayacağı, uçtan uca sanal bir yapının oluşturulmasının gerekliliğini öngörmüştür. Bu nedenle, erişim şebekesinde sanallaştırma da diğer alanlardaki gibi araştırılmaya başlanmıştır.

Kar amacı gütmeyen, açık kaynaklı ve yenilikçi çözümler sunmak için referans tasarımlar oluşturarak telekom sektörüne katkı sağlamayı hedefleyen ONF, erişim alanında sanallaştırma ile ilgili öncü ve sahada kullanılabilir kavramlar oluşturmaktadır. 2016 yılında oluşturdukları CORD kavramı ile birçok operatör ve tedarikçinin ilgisini çekmeyi başarmıştır. Üç ana başlığa ayrılan CORD mimarisinde bireysel, kurumsal ve mobil çözümler bulunmaktadır. Zamanla bu çözümlerin ortak altyapıyı kullanarak, bir uç bulut yapısında birleştirilme seçeneği operatörler tarafından yakından takip edilmektedir. Markasız kutu donanımlardan gücünü alan ve ortak altyapıyı kullanan, mobil ve sabit teknolojileri yakınsayan bulut çözümünün, tedarik ve bakım maliyetlerini büyük oranda düşürebileceği öngörülmektedir. Bu amaçla ONF'in hedeflediği uçtan uca mimari aşağıdaki şekilde gösterilmiştir [49].



Şekil 5.27. Sabit ve mobil servislerin ortak altyapıyı kullanması

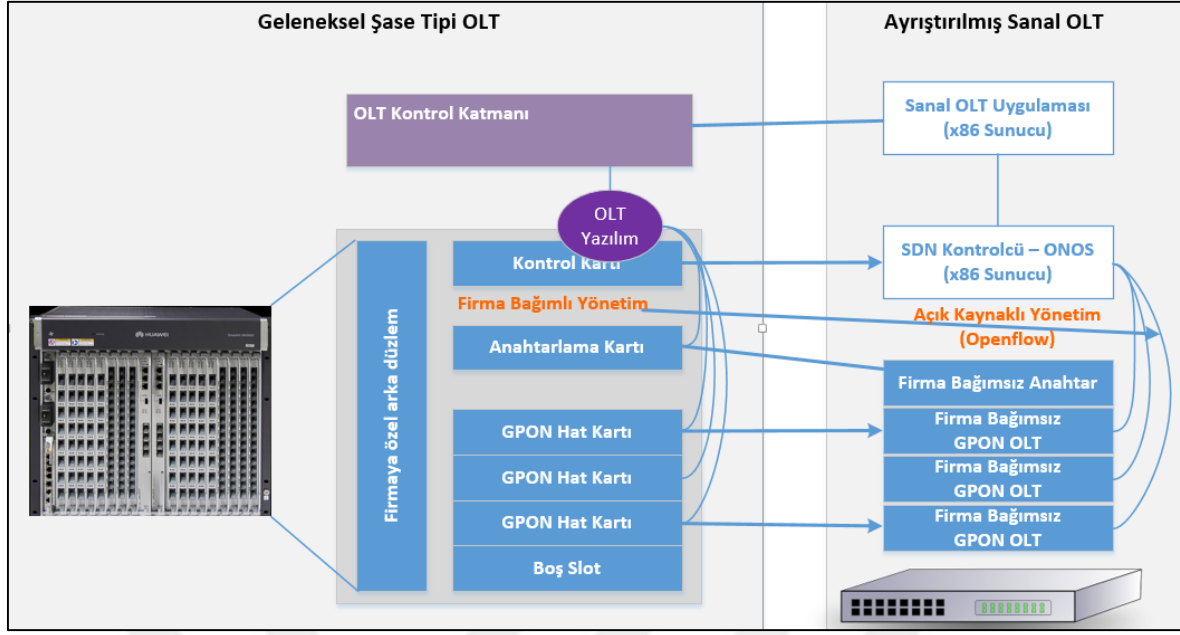
Diğer alanlarda olduğu gibi erişim şebekesinde sanallaştırmanın uygulanabilmesi konusunda ONF bünyesinde önemli çalışmalar yapılmaktadır. SEBA, ONF çatısı altında telekom operatörlerinin şebeke ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla, açık kaynak kod kullanılarak oluşturulmuş sanal sabit erişim şebeke teknolojisidir. Operatörlerin ve

üreticilerin SEBA ile belirlenen yeni standart sayesinde ortak altyapı ve mimariden en yüksek faydayı elde etmesi hedeflenmektedir [105].

SEBA ilk faz çalışmaları kapsamında sadece PON, XGSPON erişim teknolojilerini destekler nitelikte olsa da, uygun donanımla ile NG-PON2, EPON, Gfast, Ethernet, DOCSIS, xDSL ve ileride geliştirilecek yeni tüm erişim teknolojilerini de kapsamayı hedeflemektedir. SEBA açık kaynaklı bir kod havuzuna sahiptir ve bu havuzun içerisinde diğer birçok açık kaynaklı yazılım bileşeni de bulunmaktadır. SEBA, referans tasarıma uygun olarak yapılacak küçük yazılım değişiklikleri ile ileride geliştirilecek yeni sabit erişim teknolojilerine hazır hale gelmeyi ve bu sayede güncelliğini korumayı hedeflemektedir [106].

Mevcut PON sistemleri standardizasyonundaki bazı alanların zorunlu olmamasından dolayı, üreticilerin firma bağımlı bir ortam oluşturması telekom sektöründe bilinen bir problemdir. Bu probleme karşı SEBA, VOLTHA (Virtual OLT Hardware Abstraction - Donanımdan Soyutlanmış Sanal Optik Hat Terminali) adlı bileşeni ile çözüm bulmayı hedeflemektedir. VOLTHA ile OLT ve ONU arasında mevcutta bulunan üretici bağımlı sinyalleşme yapısı, açık kaynaklı ve adaptörler ile yönetilen yeni bir yapı kazanmaktadır. Bu yeni yapıda, OLT ve ONU arasında üreticiye özel olan OMCI (ONU Management Control Interface - Optik Ağ Birimi Yönetim Kontrol Ara yüzü) mesajları, daha üst katmanda donanıma uygun OLT ve ONU adaptörleri aracılığıyla yönetilmektedir. Bu sayede OLT ve ONU arasındaki özelleşmiş sinyalleşmelerin, daha üst seviyede soyutlanarak yönetilmesi sağlanacaktır. Bu yeni yapı karmaşık donanım iletişimini yazılım katmanında daha anlaşılır ve okunabilir kılmaktadır.

Geleneksel PON çözümlerinde OLT tümleşik bir sistem olup, OLT'nin tüm kontrol ve veri katmanları tek bir şase yapısındaki sistem tarafından yönetilmektedir. Şekil 5.28'de yer verildiği gibi [107] bu şase tipi geleneksel OLT ler üzerinde, işleme gücü için kontrol kartları, kullanıcı tarafı ve ONU'ları toplamak için de hat kartları ve diğer şebeke sistemlerine bilginin paylaşılması için çıkış yolu kartları veya OLT'lerin diğer sistemler ile iletişimini sağlayan bağlantı kartları bulunmaktadır. Bu kartların birbiriyle iletişiminin sağlanması için uyumlu iç bağlantı yapısına veya arka düzlem yapısına sahip olan şaselere ihtiyaç duymaktadır. SDN ve NFV yapısının telekomünikasyon sektöründeki etkilerinden olan ayrıştırma, sanallaştırma ve merkezileştirme yaklaşımlarının, erişim şebekesinde SEBA ve VOLTHA ile gerçekleştirilmesi hedeflenmektedir.



Şekil 5.28. SEBA ile geleneksel OLT karşılaştırması

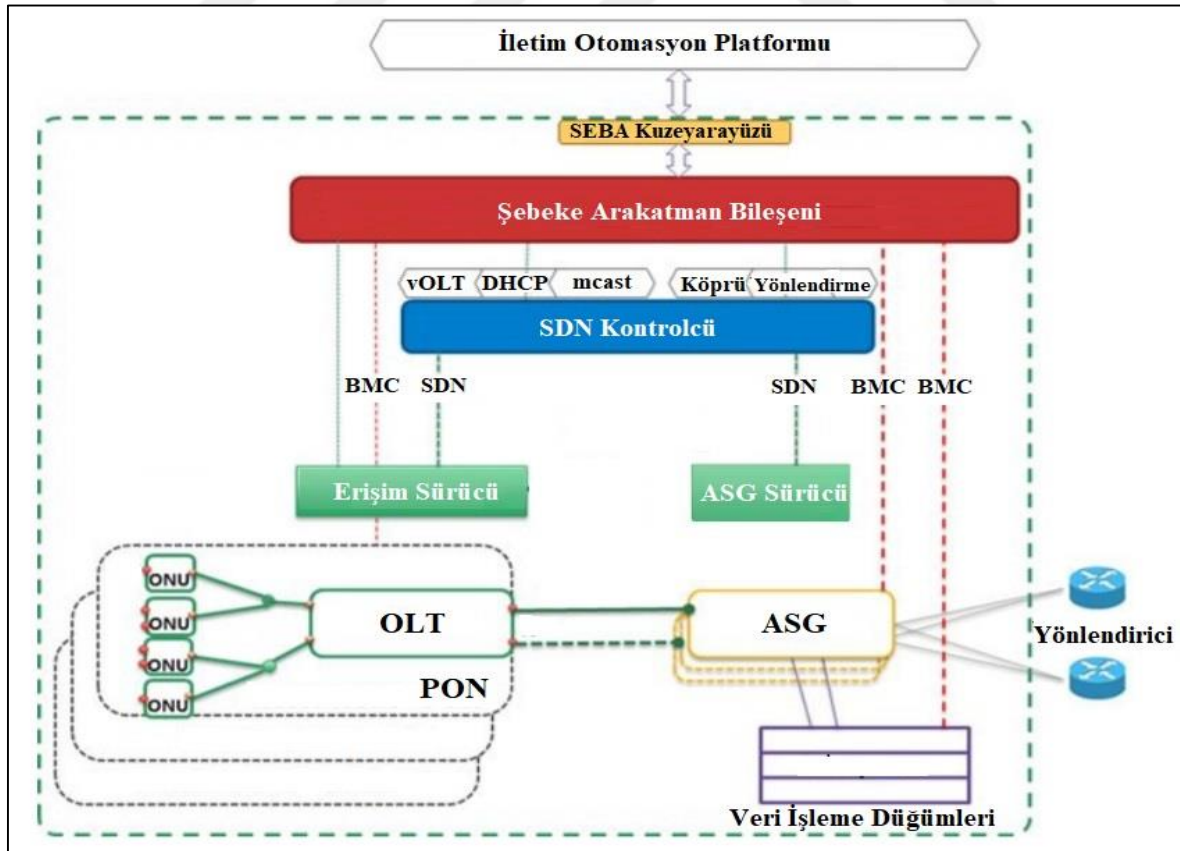
Sanallaşma ile birlikte, tekil ve özelleştirilmiş donanımların kullanılmayarak daha genel donanımlar ve bu donanımlardan ayrılaştırılmış bir merkezi yönetim yapısının kurulması gündemde yer almaktadır. SEBA ile donanım katmanında geleneksel OLT'lere göre bazı değişiklikler yapılmaktadır. SEBA için hazırlanan donanımlarda üreticilere özel çözümlerle birlikte, çoğunlukla açık referans tasarıma sahip, birden fazla projede kullanılabilecek yapıda olan ve programlanabilen anahtarlara odaklanılmaktadır. ONF tarafından hazırlanan SEBA referans tasarımındaki odak nokta markasız kutu donanımlarıdır. SEBA yazılım geliştirmeleri donanım değişikliklerine uygun altyapıyı sağlarken, geliştirmeleri açık kaynak yapısında ilerletmektedir. Yazılım alanında açık kaynak ile birlikte açık ara yüzler tanımlanmıştır. Açık ara yüz ve açık kaynak standartlarının belirlenmesiyle, proje ile ilgilenen tüm geliştiricilerin istedikleri geliştirmeleri zorlanmadan ve üretici ile irtibata geçmeden kendi ihtiyaçları doğrultusunda programlayabilmesine olanak vermektedir.

SEBA ayrıştırması sonucu oluşan donanımsal değişiklikler şu şekilde sıralanabilir. Arka düzlem tamamen ortadan kalkmaktadır ve bunun yerine tüm donanımlar yüksek hızda çalışabilen ara yüzler ve fiber ile desteklenmektedir. Geleneksel kontrol kartının yerine fiziksel linux sunucular kullanılmaktadır. Tüm kontrol mesajlaşması bu sunucular tarafından algılanmakta ve gerekli trafik yönlendirme süreci sunucular aracılığıyla yapılmaktadır. Sunucular kendi içerisinde yüksek kullanılabilirlik yapısına sahip olup, tüm uygulamaların yedekliliği bu şekilde sağlanmaktadır. Geleneksel PON hat kartlarının yerine markasız kutu

OLT cihazları kullanılmaktadır. Markasız kutu OLT'lerin ana görevi, veri katmanındaki mesajların en az gecikme ile bir sonraki anahtara veya noktaya göndermektir. Son olarak geleneksel anahtarlama kartları yerine, markasız kutu anahtarlar kullanılmakta olup, bu anahtarlar birçok markasız kutu OLT'nin toplama noktası ve erişim trafiğinin teslim noktası olarak kurgulanmıştır.

SEBA ayrıştırması sonucu oluşan yazılımsal geliştirmeleri şu şekilde sıralanabilir. SEBA konteynır düzenleme sistemi (Kubernetes) ortamında, mikro servis mimarisine uygun biçimde konumlandırılmış uygulamalardan oluşturulan bir konteynır kümesidir. Şekil 5.29'da gösterilen üst seviye SEBA mimarisinin yazılım bileşenleri aşağıdaki gibidir [106]:

- Erişim sürücüsü (Access Node Drive)
- Toplama noktası ve servis ağ geçidi sürücüsü (Aggregation/Service Gateway Driver)
- SDN kontrolcü
- Şebeke ara katman bileşeni (NEM – Network Edge Mediator)



Şekil 5.29. Üst seviye SEBA mimarisi

Erişim Sürücüsü: SEBA’da tanımlanan ve Şekil 5.29’da gösterilen erişim sürücüsü bileşeni, ONF tarafından VOLTHA ismi ile oluşturulmuştur. VOLTHA, Kubernetes ortamındaki uygulamalar bütününden oluşmaktadır. Hedefi, OLT üzerinde bulunan kontrol katmanı mesajlarını veri katmanı mesajlarından ayırmak ve verinin en az gecikme ile bir sonraki noktaya paylaşılmasını sağlamaktır. Kubernetes ile kurulumu yapılan uygulama havuzu ile OLT ve ONU mesajlaşmalarını OLT’den daha üst katmanda soyutlar ve anlaşılır bir yapıya dönüştürerek yönetir. Uygulamalar OLT’den ayrı bir yerde sunucular üzerinde çalışır. Bu sunucuların oluşturduğu yapıya veri işleme düğümü (Compute Node) adı verilmektedir. Veri işleme düğümü bilginin anlamlandırılarak işlendiği kontrol alanına verilen isimdir. Veri işleme düğümünde kurulumu yapılan VOLTHA’nın içerisinde ise OLT ve ONU’ları yönetmeye yönelik bilgiler bulunmaktadır. Cihaz yönetimi ile ilgili bilgiler OLT ve ONU adaptörleri aracılığıyla yönetildiği için, OLT ve ONU adaptörleri VOLTHA’nın en önemli parçaları arasındadır. Bu adaptörler OLT donanımına göre farklılık göstererek OLT’lerin nasıl davranması gerektiğini OLT’ye paylaşan bileşenlerdir. SEBA adaptörler konusunda öncü bir adım atarak, yeni bir standart tanımlama yönünde geliştirmeler yapmıştır. Bu kapsamda tanımlanan açık OLT ve açık ONU adaptörleri sayesinde üretici bağımsız yeni bir PON standartı belirlenmiş ve bu standarta uygun üretimlerin yapılabilmesi için tüm kod tabanını dünya ile açık kaynak ortamında paylaşılmıştır.

VOLTHA, gecikmeyi azaltmak için tüm akışları önceden tanımlamayı hedefleyen bir yapı ile oluşturulmuştur. Bunu sağlamak için tüm akışlar önceden tanımlanmıştır. Tanımlanmayan ve kontrol katmanında bir tanımı olmayan tüm trafikler düşürülmektedir. Kontrol katmanında oluşan bu mesajlaşma trafiği için Openflow protokolü kullanılmaktadır. Sonuç olarak, geleneksel şebeke yapısında kullanılan L2 ve L3 mesajlaşmaları bu yapıda gerekli akışlar kullanılmadığı sürece anlamsızdır. OLT’de oluşan veri trafiğinin hangi portlara yönlendirileceğine kanaat getirmek için gelen kontrol mesajları bir defaya mahsus kontrol katmanına çıkarılmakta ve kontrol katmanından alınan cevaba göre OLT’ye ilgili akış tanımlamaları yapılmaktadır. BMC (Board Management Controller - Yönetim Denetleyicisi); ekipman yönetim fonksiyonları için geliştirilmiş olan ara yüzdür.

ASG Driver – (Aggregation and Service Gateway -Toplama Noktası ve Servis Ağ Geçidi Sürücüsü): OLT’lerin bağlı olduğu anahtarlara yaprak anahtar adı verilmektedir. Tıpkı OLT’lerde olduğu gibi markasız kutu mimarisine sahip olan yaprak anahtarlar Openflow protokolü ile kontrol edilmektedir. Bu sayede geleneksel anahtarların aksine sunucuların

yardımı ile üst katmanda programlanabilen bir yapı oluşturulmaktadır. Bu yapıda kontrol ve veri katmanları birbirinden ayrılmakta ve verinin en az gecikme ile ilgili porta yönlendirilmesi sağlanmaktadır. SEBA referans tasarımında kullanılacak sürücü, kullanıcının isteğine bırakılsa da, ONF topluluğu anahtarın yönetilmesi için OFDPA (Openflow Data Path Abstraction - Openflow Veri Yolu Soyutlama) isimli sürücüyü geliştirmiştir. OFDPA sürücü, anahtar üzerine kurulmakta ve kontrol katmanından anahtara Openflow protokolü ile yapılan tanımlamaların anahtarın anlayacağı şekle çevirmektedir ve bu şekilde anahtarın yönetimine yardımcı olmaktadır.

SDN kontrolcü: Tüm sanal tanımlanan şebekelerde olduğu gibi SEBA tarafından tanımlanan sanal şebekede de bir SDN kontrolcüsü bulunmaktadır. ONOS olarak adlandırılan bu kontrolcü, ONF tarafından geliştirilmiş ve birçok diğer açık kaynaklı projeye de kaynaklık etmektedir. ONOS, SEBA’da kullanılan bütün markasız kutu ekipmanlarını birer sanal anahtar olarak tanımlamakta ve fiziksel portlara karşılık sanal port eşleştirmesi yaparak yönetmektedir. Kontrol katmanının önemli parçalarından biri olan ONOS, fiziksel bir ara yüze gelen mesajların hangi sanal ara yüzlere yönlendirileceğine karar vermekte ve gerekli akışların markasız kutu cihazlara tanımlanmasını sağlamaktadır. ONOS tıpkı VOLTHA gibi veri işleme düğümü üzerinde kurulmakta ve Kubernetes ortamında çalışmaktadır.

NEM: Yukarıda anlatılan bütün bileşenlere sahip bir SEBA yapısının, SEBA dışında bir sistemden yönetilmesine imkan sağlaması amacıyla NEM bileşeni oluşturulmuştur. Bu bileşenin amacı içindeki birçok donanım ve yazılım bileşeni bulunduran SEBA yönetiminin kuzey ara yüz ve güney ara yüzlerinin tanımlanarak standartlaştırılmasıdır. NEM, bir ara katman olarak ONF tarafından kurgulanmıştır. Bu ara katmanın bir diğer önemli görevi ise tüm yazılım ve donanım bileşenlerin alarm ve performans metriklerini toparlayıp, OSS /BSS sistemlerine bu bilgiyi anlamlandırarak paylaşmasıdır. NEM ile birlikte sistemin telekom operatörleri için yönetilebilirliği artırılabilecek ve SEBA’da hata, konfigrasyon, ücretlendirme, performans ve güvenlik özellikleri sağlanmış olacaktır. NEM bileşeni henüz yeterli olgunluğa ulaşmamış ve gerekli görülen tüm metrikler henüz alınamıyor olsa da diğer SEBA yazılım bileşenlerine göre çok daha yeni olan bu bileşende hızla geliştirmeler devam etmektedir. Şebeke ara katman bileşeni kuzey ara yüzü aracılığı ile orkestrasyondan sorumlu olan CAP (Carrier Automation Platform - İletim Otomasyon Platformu) ile haberleşmektedir.

5.3.4. SEBA ile geleneksel erişim sistemlerinin karşılaştırması

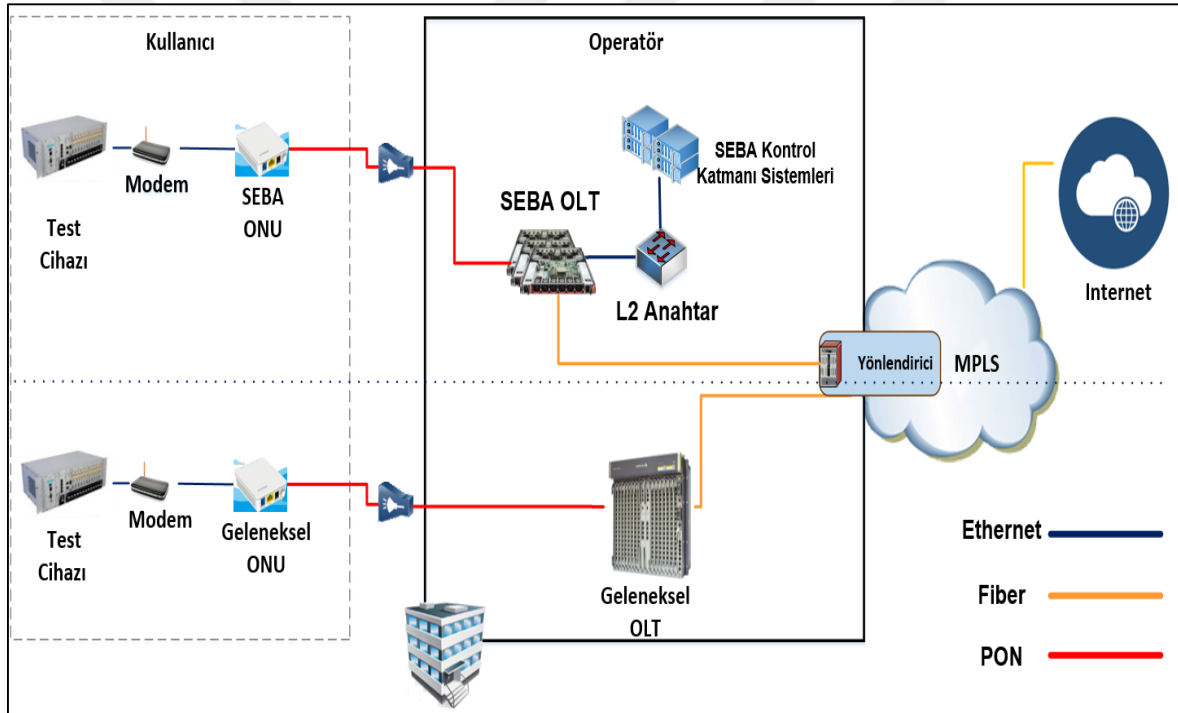
Bu bölümde SEBA ve geleneksel pasif optik ağ erişim sistemlerinin farklı açılardan karşılaştırılması yapılmıştır.

Çizelge 5.11. SEBA ile geleneksel erişim sistemlerinin karşılaştırması

Geleneksel erişim sistemleri	SEBA
Uç cihazlar (ONU) ve merkezi cihazlar (OLT) aynı tedarikçiden alınmak zorundadır.	SEBA destekli herhangi bir uç cihaz herhangi bir merkezi cihaz ile çalışabilmektedir.
Geleneksel OLT ve ONU arası sinyalleşme ilgili donanım üzerinde kodlanmaktadır. Üçüncü şahıslar tarafından değiştirilmesi, güncellenmesi zordur.	SEBA OLT ve ONT arası sinyalleşmesi veri işleme düğümü içerisinde programlar olarak kodlanmaktadır. Üçüncü şahısların kullanımına açık ve güncellemesine uygundur.
Donanım bütün işlemi yapacak özelleştirilmiş parçalara sahip ve şase yapısındadır.	Donanımlar ayrıştırılmış ve özelleştirilmemiştir. x86 mimarisine sahiptir ve açık ara yüzlüdür.
Geleneksel yapıda üretici donanım alanında kendi ekosistemini oluşturmaktadır. Yerlilik imkanı çok kısıtlıdır.	Açık ara yüzler ve açık kaynak kod kullanımından ötürü merkezi veya uç cihazda yerli üretim potansiyeli yüksektir.
Yönetim sistemi genellikle tedarikçiye özeldir. Şebekedeki her tedarikçinin kendi yönetim sistemi bulunmaktadır.	Yönetim sistemi de açık kaynak kod olarak geliştirildiği için tedarikçi bağımlılığı yoktur, tek çatı altında farklı marka model cihazlar yönetilebilecektir.
Yıllardır kullanılmakta olduğu için teknoloji olgundur.	Yeni teknoloji olduğu için geliştirme, olgunlaştırma aşamasındadır.

5.3.5. Deneysel çalışmalar

Deneysel uygulama düzeneği: SEBA ile geleneksel PON sistemlerinin performans açısından kıyaslamasını yapabilmek amacı ile Şekil 5.30 daki deney düzeneği hazırlanmıştır. SEBA sistemlerinde ONU ve OLT olarak SEBA platformunu destekleyen markasız ONU ve OLT'ler yer alırken geleneksel sistemlerde ise geleneksel ONU ve OLT'ler kullanılmıştır. SEBA platformunda kontrol katman sistemleri olarak ONOS ve VOLTHA yazılımı kullanılmıştır. Performans testlerini yapabilmek adına SEBA platformunu ve geleneksel PON şebekeyi kullanan müşterilerin modemlerine test cihazı bağlanmıştır. SEBA OLT ve geleneksel OLT aynı yönlendirici üzerinden internete çıkmaktadır.



Şekil 5.30. SEBA için oluşturulan deney düzeneği

Deney düzeneğinde kullanılan öğeler Çizelge 5.12’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.12. SEBA deney düzeneğinde kullanılan ağ elemanları ve özellikleri

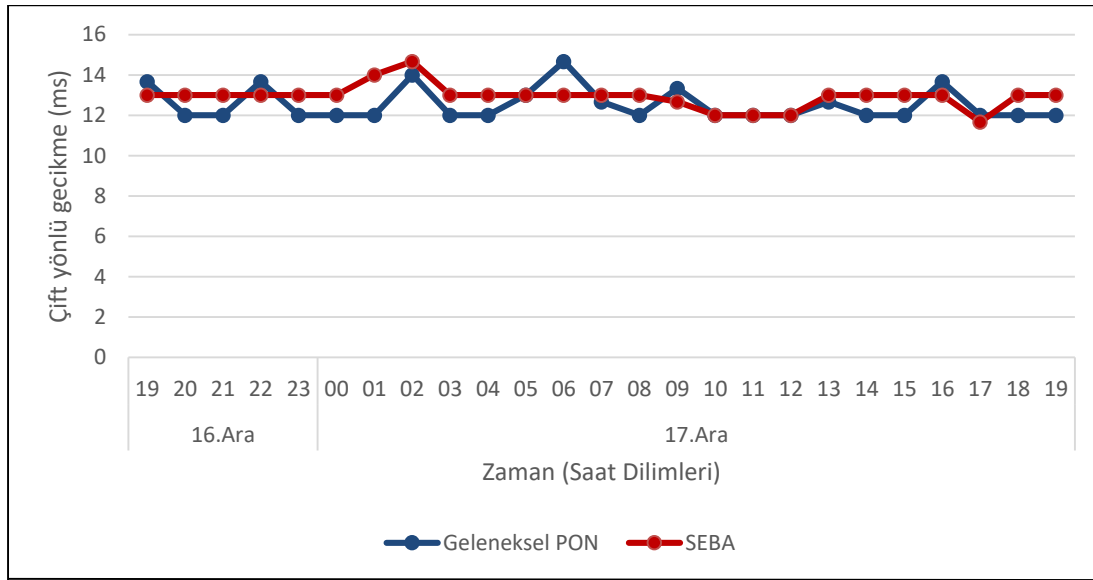
Ağ elemanı	Özellikleri
SEBA Kontrol Sistemleri, ONOS	• Intel Xeon Gold 5118 @2.3Ghz,12 çekirdekli ve 24 iş parçacıklı • 384 Gb RAM • 558 Gb Depolama
Modem	• 1 GE WAN • 1 GE LAN
L2 Anahtar	• 48 x 1GE • 4 x 10 Gigabit SFP+ • 16 Gbps anahtarlama kapasitesi • 64 MB DRAM
Yönlendirici	• 24 x 1GE • 16 x 10 Gigabit SFP+ • 1,8 Gbps anahtarlama kapasitesi • 512 MB DRAM
SEBA ONU	• 1 x 2,5-1,25 GPON Port • 1 x 1 GE Eth Port
Geleneksel ONU	• 1 x 2,5-1,25 GPON Port • 1 x 1 GE Eth Port
SEBA OLT	• 64 x 2,5-1,25 GPON Port • 8 x 1G/10G Uplink
Geleneksel OLT	• 16 Hat Kart • 2x10G Uplink • 16 x 2,5-1,25 GPON Port
Test Cihazı	• Gecikme, seğirme (jitter), paket kaybı gibi performans parametrelerini ölçümlenmektedir.

Ölçümleme yöntemi: SEBA platformu ile geleneksel PON sistemlerinin performans yetkinlikleri, aynı şebeke ve topolojiye sahip olan ve aynı anda yapılan testler ile karşılaştırılmıştır. Performans karşılaştırması için kalite ölçütü olarak veri indirme hızı, veri yükleme hızı, gecikme, seğirme, paket kaybı ölçümleme, video kalitesi ölçümleme ve video başlatma gecikmesi baz alınmıştır.

- Tüm testler trafik üretici kullanılarak yapılmış olup 24 saat boyunca 20 dakika aralıklarla tekrarlanmıştır.
- Gecikme, seğirme ve paket kaybı ölçümleme testleri için her test adımı için 100 adet ICMP paketi iletilmiş ve başarı durumu raporlanmıştır. Her paketin boyutu 64 byte'dır.
- Yapılan çalışmada söz konusu tüm testler ayrı zamanda çalıştırılmıştır. Testler arası geçişler ancak önceki testin bitirilmesi sonrasında başlatılmaktadır. Bu sayede veri indirme ve yükleme kapasitesi tek bir test için paylaşımsız olarak kullanılabilir.
- Veri indirme testleri çoklu oturum yöntemini destekleyen internetteki sunuculardan Nvidia [108] kullanılarak 383 MB'lık dosya indirilmiştir.
- Veri yükleme testleri 20 MB boyutundaki dosyanın [109] linkindeki sunucuya gönderilmesi yolu ile yapılmıştır.
- Video kalite testlerinin ölçülmesi için test cihazında bulunan "video streaming" özelliğinden faydalanılmıştır. Bu özellik sayesinde test cihazı kendindeki özel algoritmayı kullanarak test cihazına gelen videoyu kalite açısından MOS (Mean Opinion Score - Ortalama Görüş Puanı) beş üzerinden değerlendirmektedir. Değerlendirme skoru arttıkça kullanıcının deneyimlediği video kalitesi de artmaktadır. Video kalitesini ölçümleyen şifre çözmeye gerek duymadan şifrelenmiş ortam akışlarını analiz edebilmektedir.
- Video başlatma gecikmesi de kullanıcının deneyiminin ölçülmesi noktasında önemli bir kalite ölçütüdür. Video başlatma gecikmesi; videoyu izlemek için gönderilen ilk HTTP (Hypertext Transfer Protocol – Hiper Aktarım Protokolü) isteği ile video verilerini içeren yanıtın gelmesi arasındaki süre olup test cihazından ölçümlenmektedir.
- Testler 24 saat boyunca yapılmış olup grafiklerdeki yatay eksen ilgili zaman dilimlerini göstermektedir.

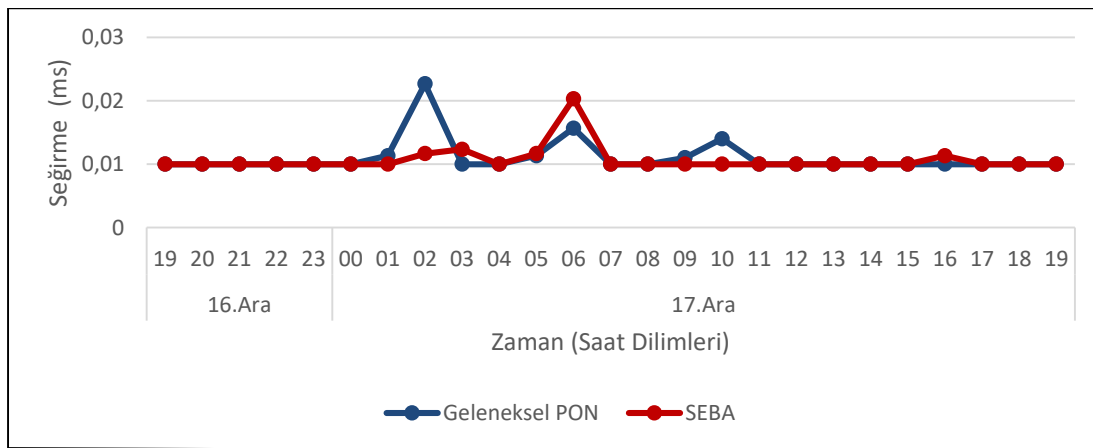
Deneyisel bulgular ve değerlendirme: Geleneksel PON erişim sistemleri ile SEBA platformunun performans karşılaştırması farklı kalite ölçütleri kullanılarak yapılmıştır. Bu

kapsamda veri indirme hızı, veri yükleme hızı, gecikme, seğirme, paket kaybı ölçümleri, video kalitesi ölçümleri ve video başlatma gecikmesi testleri her iki sisteme de uygulanmıştır. Çift yönlü gecikme ölçümlemeye yönelik test sonuçlarına Şekil 5.31’de yer verilmiştir. Gecikme sürelerinin 11 ms ile 15 ms arasında değiştiği, ortalama sürenin SEBA platformu için 12,9 ms geleneksel PON sistemleri için ise 12,5 ms olduğu gözlemlenmiştir.



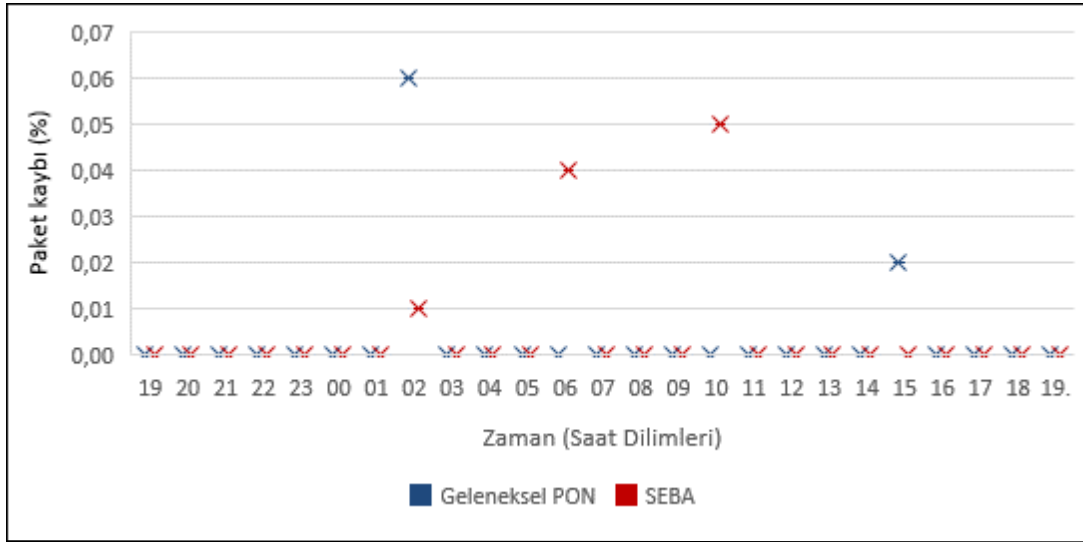
Şekil 5.31. Gecikme sürelerine göre performans karşılaştırması

Seğirme süresi ölçümlemeye yönelik test sonuçları Şekil 5.32’de yer almaktadır. Seğirme sürelerinin 0,01 ms ile 0,02 ms arasında değiştiği, ortalama sürenin her iki sistem için 0,01 ms olduğu gözlemlenmiştir.



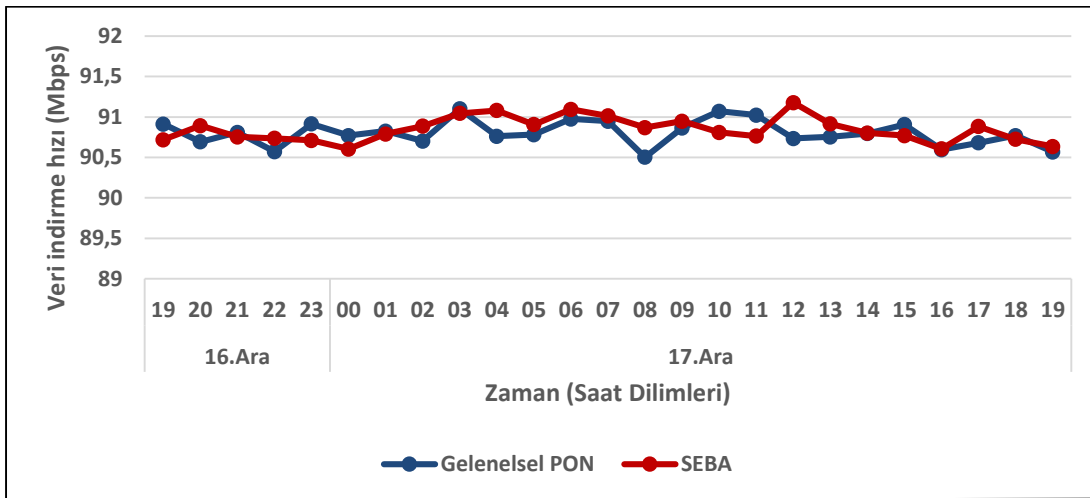
Şekil 5.32. Seğirme sürelerine göre performans karşılaştırması

Paket kayıplarını tespit etmeye yönelik yapılan testlerin neticesinde ise Şekil 5.33’de gösterildiği üzere paket kayıplarının 0 ile %0,06 arasında değiştiği, ortalama paket kayıp oranlarının her iki sistem içinde sıfıra yakın olduğu gözlemlenmiştir.



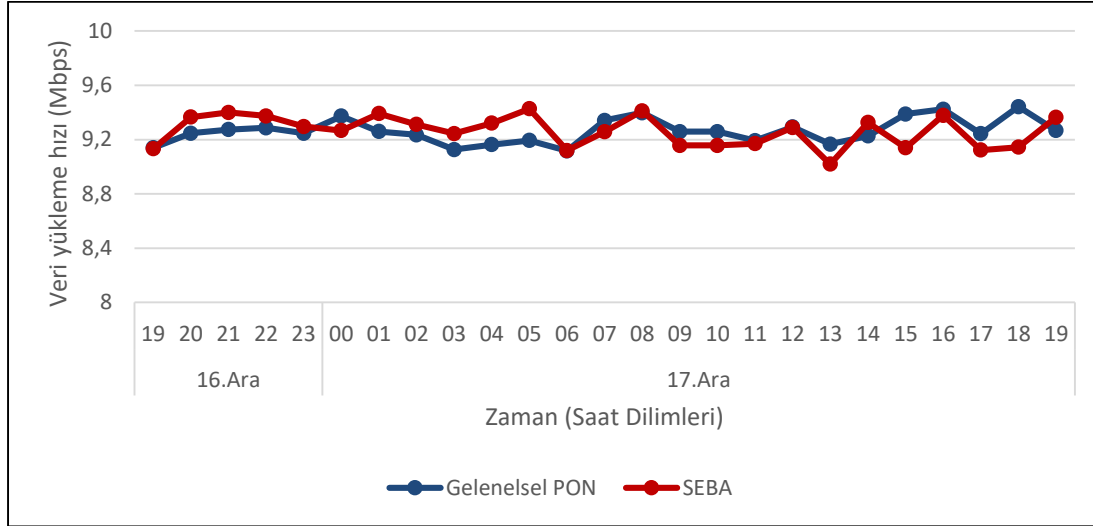
Şekil 5.33. Paket kayıp oranlarına göre performans karşılaştırması

Veri indirme hızlarını ölçümlemeye yönelik test sonuçları Şekil 5.34’de yer almaktadır. Veri indirme hızlarının 90 Mbps ile 92 Mbps arasında değiştiği, ortalama veri indirme süresinin SEBA platformu için 90,8 Mbps, geleneksel PON sistemleri için ise 90,7 Mbps olduğu gözlemlenmiştir.



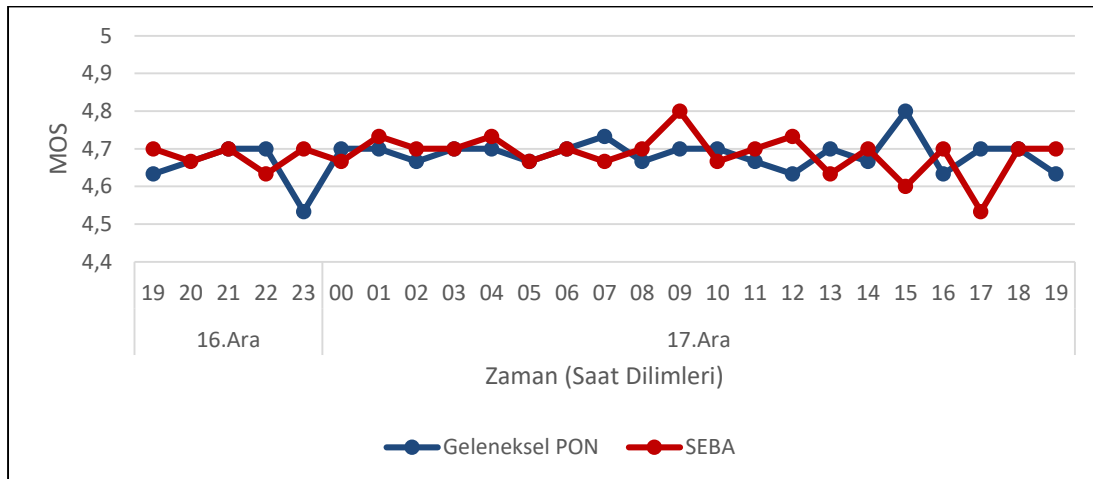
Şekil 5.34. Veri indirme hızına göre performans karşılaştırması

Veri yükleme hızlarını ölçümlemeye yönelik test sonuçları Şekil 5.35’de yer almaktadır. Veri yükleme hızlarının 8,7 Mbps ile 9,6 Mbps arasında değiştiği, ortalama veri yükleme süresinin iki sistem içinde 9,3 Mbps olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 5.35. Veri yükleme hızına göre performans karşılaştırması

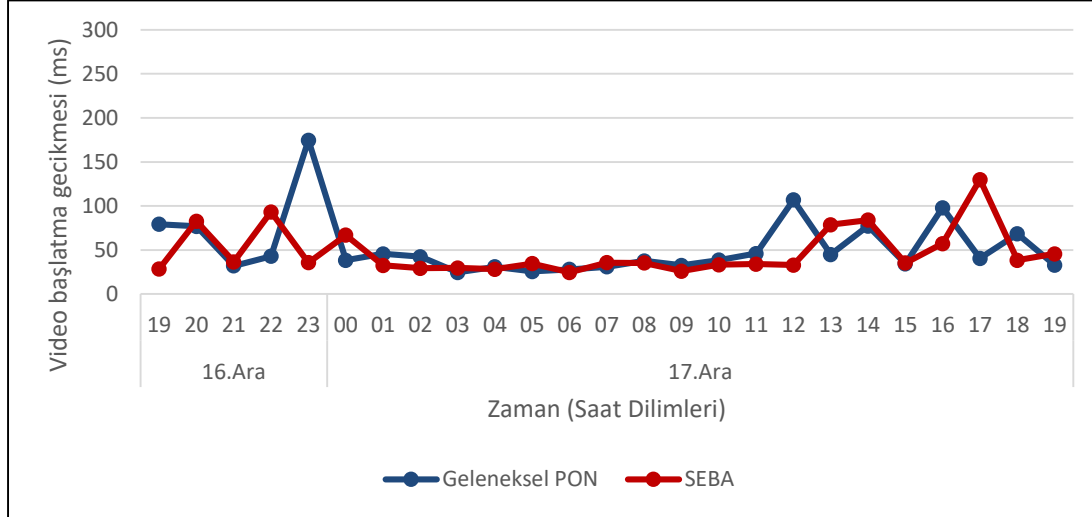
MOS değerlendirmesini baz alarak yapılan video kalite ölçümlemeye yönelik test sonuçları Şekil 5.36’da yer almaktadır. MOS değerlerinin 4,5 ile 4,8 arasında değiştiği, ortalama MOS değerinin her iki sistem içinde 4,6 seviyelerinde olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 5.36. MOS değerine göre performans karşılaştırması

Video başlatma gecikmesi parametresi baz alınarak yapılan video kalite ölçümlemeye yönelik test sonuçları Şekil 5.37’de yer almaktadır. Video başlatma gecikme değerlerinin 21

ms ile 267 ms arasında değiştiği, ortalama video başlatma değerı sũresinin SEBA platformu için 47 ms, geleneksel PON sistemleri için ise 53 ms olduğu gũzlemlenmiřtir.

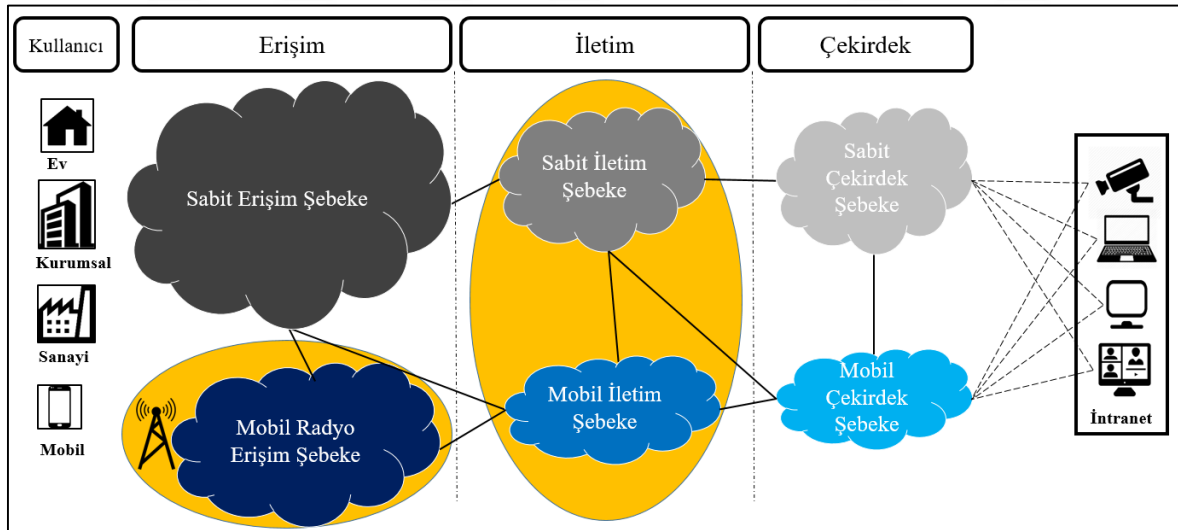


şekil 5.37. Video başlatma gecikmesine gũre performans karşılaştırması

6. GELECEK ÇALIŞMA YAKLAŞIMLARI

İdeal olarak SDN, NFV gibi yeni nesil teknolojilerin tüm şebekede uygulanarak şebekenin uçtan uca yazılım tabanlı yönetiminin sağlanması amaçlanmasına rağmen, pratikte uygulama zorluğu, teknoloji olgunluğu, maliyetlerin beklenen seviyeye gelmemesi gibi nedenlerden ötürü SDN, NFV gibi teknolojiler farklı katmanlarda farklı bileşenler için zamanla uygulanabilir hale gelmektedir.

Bu bölümde yukarıdaki nedenlerden ötürü bu çalışmada uygulama örneğine yer verilmeyen ancak ileride yapılacak olan akademik çalışmalara yardımcı olması nedeniyle diğer SDN/NFV teknolojileri ve Şekil 6.1’de gösterildiği gibi diğer katmanlar (mobil erişim, sabit ve mobil iletim) üzerindeki kullanılma potansiyelleri değerlendirilmiştir. Bu kapsamda mobil erişim şebekede kullanılabilecek olan vRAN (Virtual Radio Access Network – Sanal Radyo Erişim Ağı) ile hem sabit hem de mobil iletim sistemlerinde kullanılabilecek DDC (Distributed Disaggregated Chassis – Dağıtılmış Ayrıştırılmış Kasa) teknolojileri ele alınmıştır.



Şekil 6.1. NFV/SDN teknolojilerinin diğer uygulama alanları (vRAN, DDC)

6.1. vRAN Yaklaşımı

Radyo erişim şebekeler bir mobil operatörünün tedarik ve bakım giderlerinin en büyük kısmını oluşturma olup aynı zamanda müşteri deneyimini etkileyen performans sorunlarının %80’lik kısmı da yine bu kısımdan kaynaklanmaktadır [110]. Yaygın olarak kullanılan

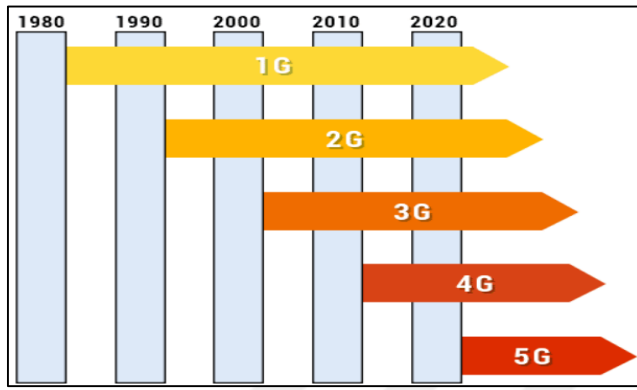
geleneksel dağıtık RAN mimarisi yaklaşık 20 yıl önce akıllı telefondan önce tasarlanmıştır. Bu eski mimari üzerinde bir takım iyileştirme çalışmaları yapılsa da servis sağlayıcıların gelecek ihtiyaçlarını karşılayamayacağı aşıkardır. Antenler, baz istasyonları, kontrolcülerden oluşan radyo erişim şebeke elemanları mobil ağın en pahalı kısmını oluşturmaktadır ve yüksek trafiği taşıyabilmek için özel yazılım ve donanımların kullanılması gerekmektedir. vRAN çözümü donanım temelli radyo erişim şebekeye alternatif bir çözüm getirmektedir. vRAN, söz konusu geleneksel mimarinin problemlerine çözüm bulmakta toplam maliyetlerin azaltılması, artan kapasitenin karşılanabilmesi, yeni servislerin verilebilmesini sağlayabilmektedir.

Günümüzde her ne kadar tam anlamıyla olgunlaşmamış olsa da 5G'nin yaygınlaşmasıyla birlikte gelecekte vRAN mimarisinin uygulama örneklerinin yaygınlaşması ve operatörlerin yatırım stratejisinin çok önemli bir parçası olacağı öngörülmektedir. Bu bölümde mobil radyo erişim şebeke katmanında uygulanabilecek yeni nesil mobil erişim teknolojisi olan vRAN yaklaşımı incelenmiştir.

6.1.1. Mobil teknolojilerin gelişimi

Mobil iletişim teknolojileri pek çok açıdan hayatı kolaylaştırmakta ve istenilen yerden istenilen bilgiye ulaşma imkan tanımaktadır. Şekil 6.2, mobil teknolojilerin gelişimini göstermektedir [111]. 1G (First Generation - Birinci nesil) kablosuz telefon teknolojisi 1980'lerde geliştirilmiş olan analog telefonlar üzerinden seslerin iletimine imkan vermekteydi ve bu teknoloji ile 2,4 Kbps'lere varan hızlarda aktarım yapabilmekteydi [112]. 2G teknolojisi sayısal teknolojiler temeline dayanmaktadır ve 1990'ların başında geliştirilmiştir. 2G teknolojisi sadece ses değil aynı zamanda devre anahtarlama kullanarak 14,4 Kbps'lara varan hızlarda veri iletimi yapmaktaydı. 2G'nin devamı niteliğinde olan ve GPRS (General Packet Radio Service - Genel Paket Radyo Servisi) diye de adlandırılan 2.5G teknolojisi ve EDGE (GSM Enhanced Data rates for GSM Evolution - GSM Evrimi için Geliştirilmiş Veri Hızları) ile birlikte 384 Kbps'lara varan hızlarda veri iletimi yapılabilirdi. Böylelikle internet hizmetleri, MMS (Multimedia Messaging Service - Çoklu Medya Mesaj Servisi) , SMS (Short Message Service - Kısa Mesaj Servisi) gibi hizmetler sunulabilir hale geldi. 2000'li yıllarda 3G teknolojisi artık 2G'nin yerini almaya başladı.3G teknoloji ile birlikte veri aktarım hızları artarak 42 Mbps seviyelerine ulaşmıştır. Video konferans, gerçek zamanlı oyun, IPTv gibi servisler verilmeye başlanmıştır. 4G ve

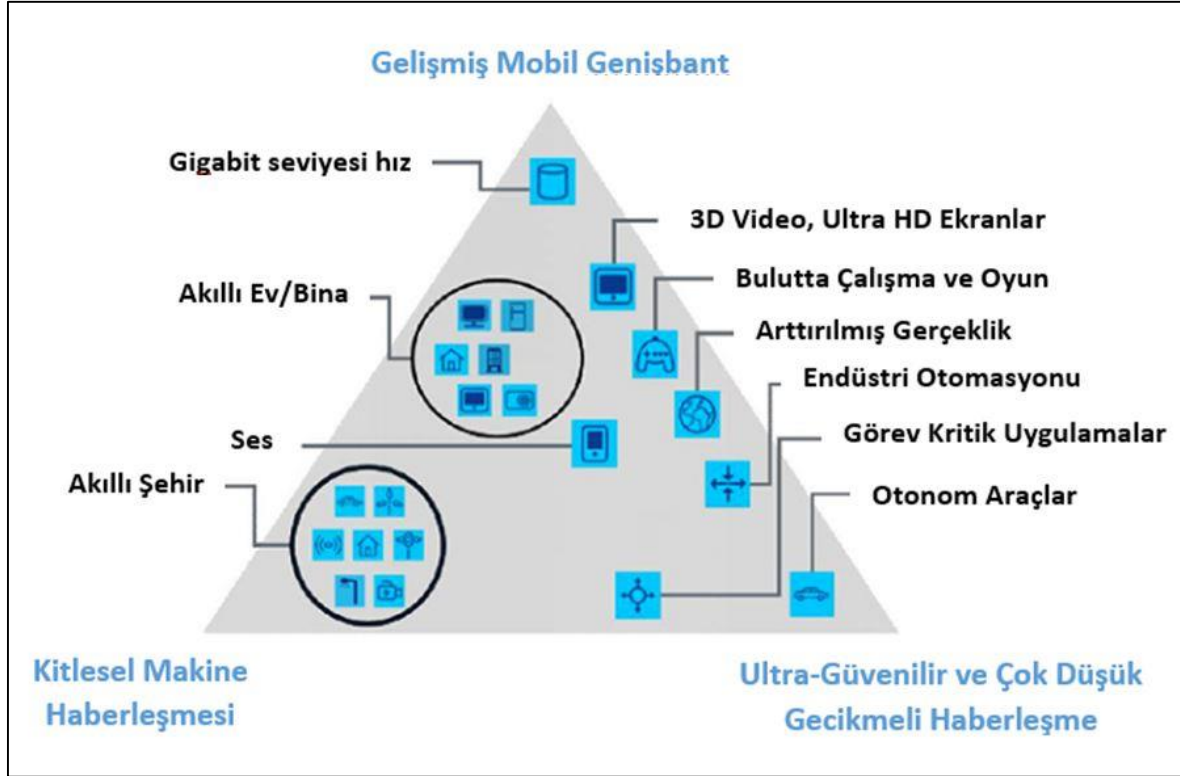
4.5G teknolojileri ile birlikte veri aktarım hızları Gbps seviyelerine ulaşırken, ipv6'in desteklenmesi, hareket halinde iken bile yüksek veri hızına ulaşılma gibi imkanlar sağlamıştır. 5G teknolojisine yönelik standart çalışmaları hala devam etmekle birlikte 5G teknolojisinin çok yüksek hızda (10 Gbps) veri aktarım özelliğinin yanı sıra, sağladığı yeni nesil erişim kabiliyetleri ile her nesneye haberleşme yeteneği kazandırması, çok düşük gecikme sunması (1ms'den daha düşük) ve böylece kablosuz iletişim sistemlerinde karşılaşılan bazı sınırlamaların aşılması mümkün olabilecektir.



Şekil 6.2. Mobil teknolojilerin gelişimi

6.1.2. 5G teknolojisi

5G'nin geliştirilme süreci, önceki mobil nesillere göre farklı bir şekilde ilerlemektedir. 5G sadece akıllı telefonlarda kullanılacak bir şebekeden çok daha fazlasını ifade etmektedir. 5G teknolojisi, diğer mobil teknolojilerden farklı olarak sadece teknoloji bazlı değil endüstrinin ihtiyaçlarını karşılayacak şekilde tasarlanmıştır. 5G ile birlikte bugünkünden çok daha yüksek kapasiteli ve daha düşük gecikmeli hizmetler sunulabilmekte, e-sağlık, endüstri 4.0 uygulamaları, otonom araçlar, artırılmış/ sanal gerçeklik uygulamaları, yapay zekâ uygulamaları, gelişmiş akıllı şehir sistemleri, bulut tabanlı oyunlar gibi yeni nesil teknolojiler günlük hayatın bir parçası haline gelmektedir. ITU'nun IMT 2020 dokümanında tanımlanmış olduğu 5G haberleşme sistemlerindeki kullanım senaryoları Şekil 6.3'de gösterilmektedir [113].



Şekil 6.3. ITU IMT-2020 5G kullanım senaryoları

“Gelişmiş mobil geniş bant” olarak adlandırılan kullanım senaryosunda, çok yüksek kapasiteden (gigabit mertebelerine ulaşan veri aktarım hızından) söz edilmektedir. Böylelikle üç boyutlu videolar, çok yüksek çözünürlüklü ekranların yüksek hızlarda aktarılabilmesi sağlanacaktır. “Kitlesel makine haberleşmesi” olarak belirtilen kullanım senaryosunda kitlelerin erişimini desteklemekte, kilometre kare başına milyonlarca cihazı bağlayabilmekte, akıllı şehirler, akıllı ev gibi uygulamalar yer almaktadır. Son olarak “Ultra-güvenilir ve çok düşük gecikmeli haberleşme” kullanım senaryosunda ise büyük ölçüde dikey endüstrilerde kullanılacak olan uygulamaları çalışma verimliliğini arttırmakta, çok düşük gecikmeye ihtiyaç duyan buluttan çalışan oyun, otonom araçlar, görev kritik uygulamalar gibi senaryolar yer almaktadır. Ericsson mobil raporunda, 2025 yılının sonuna kadar 5G gelişimi ve iletişim teknolojilerinin kullanımına dair aşağıdaki öngörüler de yer almaktadır [114].

- Dünya genelinde 5G abone sayısının önümüzdeki altı yıl içinde hızla gelişen 5G ekosisteminden dolayı 2,6 milyar dolara ulaşması beklenmektedir.

- 2025 yılının sonuna kadar dünya nüfusunun %65'inin 5G kapsamında olması ve dünya genelinde mobil veri trafiğinin %45'inin 5G üzerinden gerçekleşmesi öngörülmektedir.
- Video izleme oranlarının artması ve yeni hizmetlerin sunulmaya başlanmasıyla, akıllı telefon kullanıcılarının aylık veri kullanım miktarının 2025 yılında 24 GB'ye ulaşması beklenmektedir.
- 2019 yılının sonunda 1,3 milyar olan toplam hücresel IoT bağlantı sayısının, 2025 yılının sonunda 5 milyarı bulması tahmin edilmektedir.
- Mevcut artış göz önüne alındığında, 5G'ye geçişlerin 4G'den çok daha hızlı olması beklenmektedir. En hızlı kullanıcı sayısı artışının, 2025 yılında abonelerin %75'inin 5G'ye geçeceği tahmin edilen Kuzey Amerika bölgesinde yaşanması öngörülmektedir. Bunu %56 ile Kuzey Doğu Asya ve %55 ile Avrupa'nın takip edeceği düşünülmektedir.

5G ile beraber mobil çekirdek şebekenin sanallaştırılması çalışmaları yapılmaktadır. İlave olarak dağıtık bir mimari ile internet ağı üzerinde ölçeklenebilir bir kontrol ve veri katmanı yaratılmak istenmektedir. SDN/NFV teknolojilerinin kullanımı sayesinde şebekenin hızla büyütebilmesine imkân sağlanmakta ve ağ dilimi özelliği ile aynı altyapıyı kullanan ve farklı özellikler barındıran ağlar yeni servisler için sağlanabilmektedir.

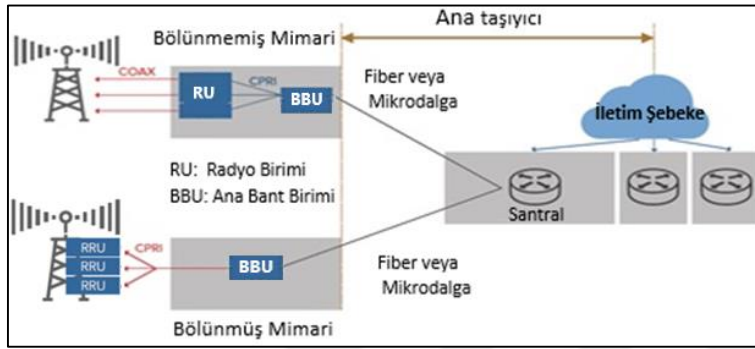
vRAN, SDN/NFV teknolojilerinin çekirdek şebekedeki yararlarını genişleterek radyo erişim şebekeye uygulamaya imkan vermektedir.

6.1.3. vRAN mimarisi

vRAN çözümlerinin düşük gecikme, orkestrasyon, ölçeklenebilirlik, kaynakların etkin kullanımının sağlanması ve ağ dilimleme, servis fonksiyon zinciri gibi yeni servisleri destekler şekilde olgunlaşması önem arz etmektedir [110].

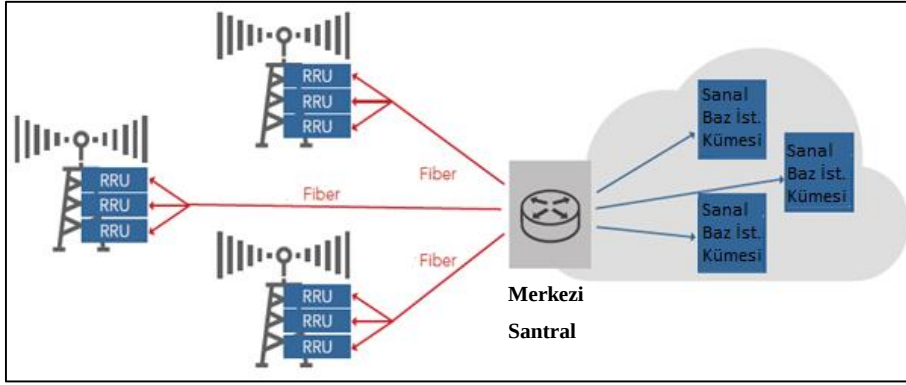
Geleneksel radyo erişim şebekede günümüzde yaygın olarak kullanılan mimari, servis sağlayıcılarının gelecekte duyacağı ek kapasite, maliyet tasarrufu, hizmet çevikliği ve ölçeklenebilirlik gibi ihtiyaçlarını karşılama noktasında zorluk yaşatmaktadır. Radyo erişim şebeke mimarisi geleneksel dağıtılmış modelden merkezi modele doğru gelişimini devam ettirmektedir [110]. Şekil 6.4'de günümüzde pek çok mobil operatör tarafından kullanılan geleneksel dağıtık radyo erişim şebeke gösterilmektedir. 4G baz istasyonu, BBU (Baseband

Unit - Anabant Birimi) ve RRU (Remote Radio Unit - Uzak Radyo Birimi) ekipmanlarından oluşmaktadır [110]. Bölünmemiş mimaride, BBU ve RRU tipik olarak hücre kulesinin tabanında veya yakındaki bir kabinde bulunmakta ve RRU kulenin üstündeki antenlere koaksiyel kablo ile bağlanmaktadır. Bölünmüş bir mimaride, RRU, hücre kulesinin en tepesinde anten ile birlikte yer almaktadır. RRU, sayısallaştırılmış radyo frekanslar verilerini iletmek için BBU'ya CPRI (Common Public Radio Interface - Ortak Radyo Arabirimi) protokolünü kullanarak fiber kullanarak bağlanmaktadır [110].



Şekil 6.4. Geleneksel dağıtılmış radyo erişim şebeke mimarisi

Bir sonraki aşama, C-RAN (Centralized Radio Access Network - Merkezileştirilmiş Radyo Erişim Şebeke) mimarisidir. Özel BBU cihazı, merkez ofiste yer almaktadır ve onlarca hücreyi kontrol edebilmektedir. Birden fazla BBU'nun aynı merkezi santralde bulunması, güç gereksinimlerinin azalacağı ve ödenen kira bedelinin düşeceğinden dolayı operasyon giderlerini azaltmaktadır. C-RAN'da temel mantık ana bant kaynaklarının bir havuz mantığı ile yönetilmesi ve dinamik olarak atamasının yapılmasıdır. Bu sayede servis güvenilirliğinde artış yaşanması sağlanmakta ve mevcut spektrum daha verimli kullanılabilir. C-RAN mimarisi tanımlanan problemlerin çözümüne belli ölçüde çözüm bulabilmektedir. Maliyet tasarrufunu tam olarak gerçekleştirebilmek, dinamik kapasite ölçeklendirmesini yapabilmek, daha iyi kalite güvencesi ve yeni hizmetlerin hızlı bir şekilde başlatılmasını sağlamak için servis sağlayıcıların sanallaştırılmış bir vRAN mimarisini benimsemeleri gerekmektedir [110]. Şekil 6.5'da belirtilen vRAN mimarisinde BBU'lar standart x86 donanım üzerinde NFV platformları kullanarak sanallaştırılmıştır. RRU'lar hala hücre içerisinde yer almaktadır. vRAN çözümü ile radyo erişim şebeke tarafındaki bazı donanım ve yazılım özellikleri sanallaştırılıp, kontrol fonksiyonlarını merkezileştirerek kaynakların daha verimli kullanıldığı yeni bir RAN mimari uygulanması planlanmaktadır.



Şekil 6.5. vRAN mimarisi

Hali hazırda birçok mobil şebeke mimari yapı olarak dağıtılmış radyo erişim şebeke kullanılmaktadır. Merkezileştirmiş radyo erişim şebeke yapısına geçiş için test ve çalışmalar 4G ile yapılmış olsa da Kore gibi yoğun trafik ve yaygın fiber ağı olan birkaç ülke ve özel çözüm şebekeleri dışında kullanımı yaygınlaşmamıştır. 4G' den 5G' ye geçiş sürecinde ise vRAN çalışmaları ön plana çıkmaktadır. vRAN, SDN ve NFV kullanımı sayesinde donanım bağımlı ağ mimarisini yazılım tabanlı mimariye evirmektedir. Dolayısı ile tedarikçi bağımlı baz istasyonlarını esnek ve maliyeti azalmış hale getirmektedir. Mobil servis sağlayıcılar, kendi veri merkezlerinde sanal makineler üzerinde çalışan BBU'larını kullanmaktadır. Böyle bir yazılım tabanlı mimaride geleneksel baz istasyonundaki bazı fonksiyonlar operatörün veri merkezine taşınmaktadır. Bu aslında baz istasyonlarının ayrıştırılması anlamına gelmektedir ve işlevsel bölünme diye adlandırılmaktadır [115].

Sanallaştırmanın en büyük yararı, yazılım güncellemelerine ve yükseltmelerinde ortaya çıkmaktadır. Donanım tabanlı, sanallaştırılmamış bir ortamda, mobil servis sağlayıcılar her bir baz istasyonunu yeni yazılımla donatması gerekirken sanallaştırılmış bir mimaride, kenar veri merkezindeki sunucularda çalışan sanal makineler veya konteynirlarda birçok işlev bulunmaktadır. Merkezi ve tercihen otomatik olarak çalışan yazılım dağıtımı, gereken çabayı büyük ölçüde basitleştirmekte ve ayrıca manuel müdahaleyi ortadan kaldırdığı için hatalara daha az eğilimli hale getirmektedir.

Sanal radyo erişim ağları, ağ sanallaştırmasının bir sonraki aşamasını temsil etmekte ve mobil altyapılardaki uç veri merkezleri için yeni bir kullanım durumu sunmaktadır. Açık kaynak kodlu uygulamalar şu anda, özellikle 4G ağlarında kullanıma başlamış, 5G mobil ağları için ise test ortamlarında kullanılmaktadır. Bir uç veri merkezinin ve işlem havuzunun

merkezi işlem gücü sayesinde, mobil ağ operatörleri tedarik giderleri ve bakım giderlerinden tasarruf sağlayabilecek, operasyonel verimlilik artacak ve gelişmiş performans yönetimi tekniklerinden yararlanabileceklerdir [115].

6.1.4. 5G’de vRAN kullanımı

Mobil operatörlerin en büyük maliyet kalemi radyo erişim şebeke tarafında olmaktadır. Bunun başlıca nedenleri tedarikçi bağımlılığının getirmiş olduğu rekabet eksikliği ve esnek olmayan yekpare sistemlerin kurulmasıdır. Bu büyük pastayı dünya üzerinde sadece üç, dört büyük tedarikçi firma paylaşmaktadır. Buna çözüm olarak ise sanallaşmış ve açık ara yüzler ile çalışabilen vRAN çözümleri öne çıkmaktadır. Böylelikle 5G baz istasyonlarındaki akıllı yazılımların buluta kaydırılarak standart ara yüzler üzerinden yönetilmesi ve sahalar da kalan ekipmanın ayak izinin mümkün olduğunca küçültülerek kolay üretilebilen ve standart donanımlar üzerine kurulabilen bir yapıya dönüştürülmesinin sağlanması hedeflenmektedir [116].

Sanal radyo erişim ağları, telekomünikasyon endüstrisindeki en önemli ayrıştırma projeleri arasında yer almaktadır. 5G’de vRAN teknolojisinin verimli olarak kullanılabilmesi için ağ operatörlerinin farklı bileşenleri seçtikleri tedarikçilerden serbestçe birleştirmelerine olanak tanıyan ara yüzlerin standartlaştırılması ve tanımlanması gerekmektedir. Standardizasyon ve koordinasyon süreçleri kapsamında baz istasyonlarının işlevlerini anten konumu ve kenar veri merkezleri arasında bölmek için çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Bu, hem 4G baz istasyonunun bölünmüş modeli hem de DU’lar (Distributed Unit - Dağıtılmış Birimler) ve CU’lar (Centralized Unit - Merkezi Birimler) arasındaki 5G baz istasyonları için geçerlidir. 5G şebekelerinde 4G LTE şebekelerinde olduğundan önemli ölçüde daha fazla baz istasyonu olması beklenmektedir. CU’lar, az yer ihtiyacı olan dağıtılmış bir bulut çözümü olarak tasarlanmıştır. Buna karşılık, DU’lar gerçek zamanlı işleme gibi görevleri yerine getirmektedir [115].

vRAN ile bazı fonksiyonların merkezileştirmesi sonucu altyapının kısa vadede daha iyi yönetilerek verimlilik sağlanacağı, uzun vadede ise hesaplama ve depolama maliyetleri azalacağı öngörülmektedir. Trafik şebekenin uç tarafından çekirdek şebeke katmanına taşıma maliyetinin de zaman içerisinde azalacağı düşünülmektedir.

6.1.5. vRAN teknolojisinde karşılaşılabilecek zorluklar ve faydaları

Radyo erişim şebekenin sanallaştırılması çekirdek şebekeye göre daha karmaşık ve zor olacaktır. Çekirdek şebeke sanallaştırma, onlarca veri merkezinde veya yüzlerce merkez ofiste bulut teknolojisi uygulamak anlamına gelirken, RAN sanallaştırma, binlerce toplama noktasında ve baz istasyonunda ekipman değişimi ile yeni teknoloji uygulamak anlamına gelmektedir. Hem fiziksel operasyon hem de maliyet olarak zorlayıcı olması beklenmektedir. Dünya çapında milyonlarca baz istasyonu düşünüldüğünde sanallaştırılmış bir radyo erişim şebekenin piyasaya sürülmesinin zaman alması öngörülmektedir [117]. Her sahadaki sanallaştırmanın kullanıma sunulması, 4G/5G gibi yeni bir teknolojinin büyük ölçekli kullanıma sunulmasına benzer ve zorlu bir süreç olması beklenmektedir. Sadece kullanım yoğunluğu veya kullanım senaryosu potansiyeli olan sahalarda kurulumunun yaygınlaşması bile ciddi zaman gerektirecektir. İlave olarak vRAN teknolojisi hala gelişimini devam ettirmektedir ve tedarikçi zincirini de kapsayan ekosisteminin genişleme gereksinimi bulunmaktadır. Tüm bu zorluklara rağmen vRAN teknolojisi ile birlikte sağlanacak olan birçok fayda bulunmaktadır.

- Üretici bağımsız mimari sunmaktadır.
- Şebeke fonksiyonlarının ayrıştırılması, sanallaşma, açık ara yüzlerin kullanılması sayesinde tedarik ve bakım giderlerini önemli bir ölçüde azaltmaktadır.
- Şebeke dilimleme, uçtan uca orkestrasyon, sabit mobil yakınsama uygulamalarını desteklemektedir.
- Ölçeklenebilir ve çevik şebeke yapısı sunmaktadır.
- Entegre edilmiş kendi kendini optimize eden ağ teknolojisini desteklemektedir.
- Gelecek nesil radyo erişim ağları ile uyumlu çalışacak şekilde tasarlanmıştır.
- Şebekeyi daha etkin kontrol etme imkanı sunmaktadır.
- O-RAN uyumlu, açık mimari ile birlikte bulut teknolojilerini destekler, diğer sistemler ile birlikte çalışmaya imkan sağlamaktadır ve tedarikçi çeşitliliğini arttırmaktadır.
- Sanallaştırılmış kontrol düzlem ve veri düzlemi işlevi, ağ dilimleme gibi yeni uygulamaların kullanımını basitleştirerek belirli müşteri grupları için belirli uygulamaları desteklemek üzere şebeke kaynaklarını ayırarak yeni servisler oluşturulmasına imkan tanımaktadır.

6.2. DDC Yaklaşımı

Giderek artan sabit geniş bant ve mobil geniş bant trafiği yönlendirici ve anahtarlardan oluşan hem uç sahalarda hem de çekirdek şebekelerde ciddi seviyede kapasite artışı yapılmasını zaruri hale getirmektedir. Söz konusu kapasite artışı uzun yıllardır geleneksel ağ tedarikçilerinden ürün temin edilerek yapılmaktadır. Bank of America'nın yapmış olduğu araştırmada günümüz ağ ekipman pazarının %96'sı dört büyük üretici tarafında şekillenmektedir [118]. Ancak bu geleneksel yaklaşım beraberinde birçok zorluğu beraberinde getirmektedir. Bu zorlukların başında yazılım ve donanımların aynı yerden alınması nedeniyle tedarikçi bağımlılığı gelmektedir. İlave olarak kapasitenin esnek olarak yönetilememesi, tedarik ve bakım giderlerinin fazlalığı gibi problemler bulunmaktadır. Özellikle Facebook, Google, Microsoft, Amazon ve Apple gibi büyük ölçekli şirketler veri merkezlerinde bu sorunlar ile çok öncesinde karşılaşmaktaydı. Veri merkezlerinde özellikle sanallaştırmanın popüler olmasıyla, donanım ve yazılımın ayrı olarak tedarik edilerek üretici bağımlılığının ortadan kaldırıldığı yaklaşım önemli küresel şirketlerin liderliğinde günümüzde belirli bir olgunluğa erişmiştir. Özellikle Facebook öncülüğünde 2009'da oluşturulan OCP (Open Compute Project – Açık Toplama Projesi) bu alandaki en önemli adım olarak görülmektedir. Bunun yanı sıra veri merkezi içinde oluşturulan bu yaklaşımın, veri merkezleri arasındaki bağlantı için de oluşturulma gereksinimi ortaya çıkmıştır. Bu konudaki en ciddi girişim ise yine Facebook tarafından oluşturulan TIP topluluğudur. Bu yaklaşım, günümüzde telekomünikasyon operatörleri tarafından da benimsenmeye başlanmıştır [119].

Son yıllarda her geçen gün donanım ve yazılımın birbirinden ayrıştırılarak kullanılmasına imkan veren markasız cihazların kullanımı dünya genelinde artmaktadır. Markasız cihazların kullanımına en somut örnek Facebook veri merkezi verilebilir. Facebook hem donanım giderlerini düşürmek hem de veri merkezinde ihtiyaç duyulan özelliklerin kolayca geliştirilmesi için açık kaynak kodlu anahtarlayıcılarını geliştirmiştir. Veri merkezinde yüksek kapasitelere erişilmesine olanak sağlayan Facebook anahtarlayıcılarının yazılımı için ise Cumulus Network ile ortaklık kurmuştur [120]. Markasız donanımların veri merkezlerinde kullanılmasıyla yaşanan dönüşümün şebekelerin diğer katmanlarında da yaşanılması öngörülmektedir. Özellikle donanım ve yazılımın ayrı ayrı tedarik edilmesi telekomünikasyon endüstrisi için yeni bir ekosistem oluşturarak operatörlere çeşitli faydalar sağlayacaktır [121].

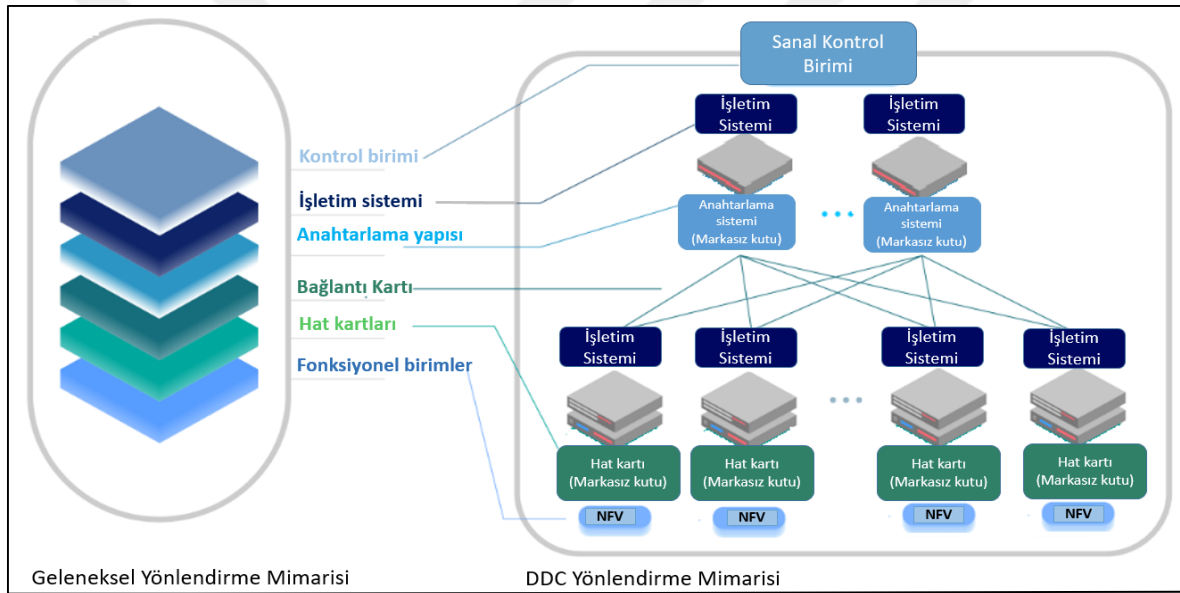
Bununla birlikte özellikle bulut veri merkezlerinde kapasite ihtiyaçlarının karşılanması amacıyla yatayda genişlemeye olanak sağlayan yaprak-omurga mimarisi yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bu gelişmeleri dikkate alan AT&T, uç ve çekirdek sahalarındaki servis kapasitelerini arttırabilmek amacıyla DDC modelini gündeme getirmiştir. AT&T tarafından sunulan DDC modeli aşağıda belirtilen üç temel prensibe dayanmaktadır:

- DDC modelinde kullanılacak olan markasız cihazlarda 3.parti yonga setlerin kullanılması,
- Donanım ve yazılımın tamamen birbirinden ayrıştırılması,
- 2.ve 3.seviye iletim kapasitelerinin ihtiyaç doğrultusunda kolaylıkla arttırılabilmesidir.

Telekom sektöründe markasız cihaz kavramı popüler olmaya başlamıştır. Bu kavram sayesinde donanım ve yazılımın farklı üreticiler tarafından tedarik edilmesine olanak sağlanmakta olup, şebekenin herhangi bir noktasında amaçlanan ayrıştırma gerçekleştirilebilmektedir. Dünya genelinde servis sağlayıcı şebekelerde bu markasız cihaz donanımların kullanılabilmesi için belli standartların oluşturulma gereksinimi ortaya çıkmıştır. Bu amaç doğrultusunda OCP, 2013 yılında yönlendirici ve anahtar özelinde açık donanım üzerine çalışmalarına başlamıştır.

Operatörlerin çekirdek IP şebekelerinde yüksek kapasiteleri trafiklerin taşınması amacıyla ekipman seçimi yapılırken modüler yapıda ekipmanlar tercih edilmektedir. Bu tasarımda operatör, çekirdek IP şebekesinde konumlandıracağı ekipmanın alımını gerçekleştirirken üreticiden boş bir şasi olarak trafik gereksinimini göre yine aynı üreticiden tedarik ettiği veri düzlem trafiğini yüklenecek olan hat kartı diye adlandırılan donanımı temin etmektedir. Yine aynı şekilde fan, güç kaynağı gibi bileşenleri aynı üreticiden tedarik ederek, yönlendirici ekipmanının sorunsuz olarak işlevini yerine getirmesi sağlanmaktadır. Ancak bu yaklaşımdaki en önemli problem trafik kapasitesinin arttırılma ihtiyacı olduğunda operatörlere getirdiği ilave yüksek maliyetlerdir. Geleneksel şasi yapısının problemlerini dikkate alan Amerika'nın en büyük Telekom operatörü olan AT&T 2019 yılında Broadcom Jericho2 yongalarının kullanıldığı, donanım ve yazılımın tamamen ayrıştırıldığı DDC yönlendirici sistemini OCP'ye sunmuştur. Sunulmuş olan sistem 2020 yılında ilk olarak AT&T çekirdek şebekesine entegre edilmiştir [122]. Bu yapının olgunlaşmasıyla ilerleyen zamanlarda operatörler arasında daha yaygın şekilde kullanacağını öngörmektedir.

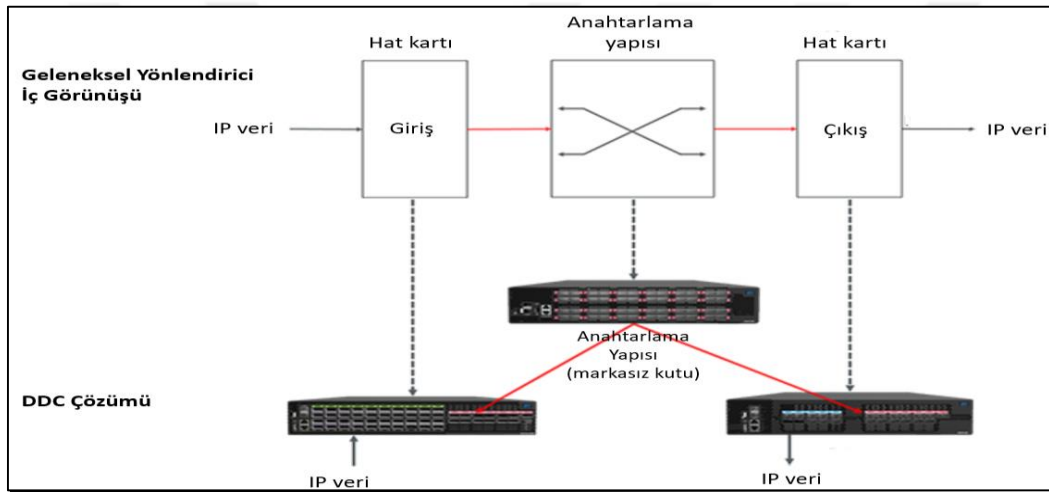
DDC mimarisi: Geleneksel şasilerde yekpare olarak çalışan yönlendirme sisteminin bileşenleri DDC mimarisi ile bağımsız çalışabilen fonksiyonlara ayrıştırılarak, her birinin kendi fan ve güç kaynağının olduğu markasız donanımlara dağıtılmıştır [123]. Şekil 6.6'da gösterildiği üzere DDC, tümleşik yapıdaki geleneksel modüler şasiyi tek bir yönlendirme sistemi olarak görmek yerine hat kartı (line-card), anahtarlama sistemi (switching fabric), zamanlama modülü (timing modül), rota işlemcisi (route processor) gibi bileşenleri tamamen birbirinden ayrıştırmayı hedeflemektedir. Ayrıca standartları belirlenmiş donanımların getireceği yüksek port kapasiteleri ile IP şebekedeki kapasite artırımları konusunda operatörlere esneklik kazandırmayı hedeflemektedir.



Şekil 6.6. DDC yönlendirme sistem mimarisi

Bu yapı günümüz veri merkezi mimarisinde sıklıkla karşılaşılan yaprak-omurga yapısına benzemektedir. Özellikle kapasite ihtiyacının had safhada olduğu veri merkezlerinde kullanılan yaprak-omurga yapısı operatörlere ve bulut servis sağlayıcılara yatayda kapasite genişlemesi konusunda ciddi kolaylık sağlamaktadır. DDC mimarisinde de aynı yaklaşım benimsenmektedir. Benimsenen bu yaklaşım ile birlikte yalnızca hat kartı olarak konumlandırılacak markasız donanımların ilave edilmesi ile 768 Tbps yönlendirme ve anahtarlama kapasitelerine ulaşılabilir [124]. Bu durum operatörlere kapasite genişlemesi açısından büyük esneklik sağlamaktadır. Ayrıca gelecekteki kapasite gereksinimlerine göre boyutlandırma yapmasına olanak sağlayarak, operatörlerin gereksiz yatırım yapmasını önleyebilme potansiyeli bulunmaktadır.

DDC yönlendirme sisteminde, geleneksel şasi mimarisinden gelen tüm fonksiyonlar birbirinden ayırtmıştır. Ayırtılan tüm bu fonksiyonlar ise Şekil 6.7’de gösterildiği üzere farklı donanımlara dağıtılmıştır [125]. Donanım ve yazılımın birbirinden tamamen ayırtılması her bir bileşenin seçimi için operatörlere esneklik kazandırmaktadır. Böylelikle operatörler kendi gereksinimlerini karşılayacak en iyi donanım ve yazılımı seçme şansına sahip olacaklardır. Bununla birlikte yönlendirme/anahtarlama fonksiyonlarının dağıtıldığı donanımların her biri kendi CPU, yonga, güç kaynağı, fan gibi ekipmanlara sahip olduğundan, cihazlarda yapılacak herhangi bir bakım çalışması sırasında meydana gelebilecek olası kesintiler minimum seviyeye indirilecektir.



Şekil 6.7. Ayırtılan fonksiyonların farklı donanımlara dağıtılması

DDC projesi henüz tam anlamıyla olgunlaşmamış bir proje olduğundan dolayı hem donanım açısından hem de yazılım açısından DDC yönlendirme sistemine tam anlamıyla uyum sağlayan çok fazla üretici bulunmamaktadır. AT&T firması çekirdek şebekesinde 400 Gbps port kapasiteli DDC yönlendirme sisteminin kullanılabilmesi amacıyla belirledikleri üreticiler ile demo çalışmalarına devam etmektedirler. DDC sistemine uyum sağlayacak ilk donanım Ufispac firması tarafından üretilmiştir. Yazılım tarafında ise AT&T, DriveNets ile çalışmalarını sürdürmektedir [126].

Sonuç olarak yeni katma değerli servisler, 5G'nin günlük hayatın bir parçasına haline gelmesi, içeriklerin zenginleşmesi ile birlikte hem sabit geniş bant hem de mobil geniş bant trafiğinde önemli artışlar beklenmektedir. Geleneksel yöntemler ile bu önemli trafik artışları ile baş edebilmek pek mümkün görünmemektedir. Bu nedenle şebekelerin diğer

katmanlarında olduğu gibi iletim katmanında da dönüşümün yaşanması öngörülmektedir. Mobil ve sabit şebekelerin iletim katmanındaki öngörülen dönüşümün temelini tedarikçi bağımlılığını ortadan kaldıracak olan, açık kaynak NFV/SDN teknolojilerine dayanan, esnek kapasite yönetimine imkan veren, markasız donanımların kullanıldığı DDC mimarinin oluşturması beklenmektedir. Günümüzde DDC mimarisi henüz olgunlaşma aşamasında olduğundan dolayı DDC mimarisini destekleyen çok fazla markasız donanım ve yazılım üreticisi bulunamamaktadır. Telekom pazarındaki markasız donanım yaklaşımına olan talep düşünüldüğünde ilerleyen dönemlerde buradaki üretici çeşitliliğini artacağı öngörülmektedir.



7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Sonuç olarak, bu çalışmada geleneksel haberleşme ağ altyapılarında karşılaşılan bir takım problemleri ortadan kaldırmaya yönelik, açık kaynak kod kullanarak geliştirilen abone farkındalığına sahip dinamik servis fonksiyon zinciri, intranet servisleri için SDN tabanlı yönetim platformu ve SEBA gibi teknolojiler, haberleşme ağ altyapılarının farklı bölümlerine (mobil, intranet, sabit) uygulanmıştır. Bu uygulamalar canlı bir telekom laboratuvarı kullanılarak test edilmiş, maliyet analizleri yapılmış ve elde edilen bulgular geleneksel şebekelerde kullanılan teknolojiler ile kıyaslanmıştır. Bu çalışma kapsamında önerilen çözümlerin çok yüklü trafik altında bile kararlı olarak çalışabildiği, tedarikçilere olan bağımlılığı önemli ölçüde ortadan kaldırdığı, büyük ölçekli telekom ağlarında kullanılabileceği ve tedarikçi bağımlı geleneksel çözümlere kıyasla bakım ve tedarik giderlerinin daha düşük olduğu değerlendirilmiştir. Aynı zamanda gelecek çalışmalara ışık tutmak adına diğer katmanlarda (mobil erişim, sabit ve mobil iletim) uygulanabilecek yeni nesil teknolojiler de ayrıntılı olarak incelenmiştir.

7.1. Abone Farkındalığına Sahip Dinamik Servis Fonksiyon Zinciri

Literatürde SFC teknolojisi ve şebekelere uygulanması ile ilgili bir çok çalışma mevcuttur. Ancak bu çalışmalar tedarikçi bağımlılığı içermekte, çeşitli SDN kontrolcüler (ONOS, ODL, vb.) ile birlikte çalışma esnekliği bulunmamakta ve son kullanıcının sahip olduğu servis profiline göre sanal veya fiziksel servisler arasında dolaşması noktasında problemler ortaya çıkmaktadır. Bu çalışmada; herhangi bir üreticiden bağımsız, açık kaynaklı bileşenler (ONOS, Openflow destekleyen anahtarlar, Openstack vb.) aracılığıyla uygulanan ve SDN/NFV teknolojilerine dayanan yeni bir abone farkındalığına sahip dinamik bir SFC mimarisi geliştirilmiştir. Önerilen mimarinin performansını ölçümleyebilmek adına çözüm, farklı sayıda kullanıcı, trafik ve işlem ile canlı bir telekom laboratuvarında test edilmiştir.

Yapılan testler, önerilen sistemin her bir aboneyi belirli bir servis fonksiyon zincirine atayabildiğini ve yüklü trafik akışı sırasında SFC atamasını değiştirebilmenin mümkün olduğunu göstermektedir. Performans testleri sistemin aşırı trafik yükü altında bile kararlı olarak davrandığını ve aynı anda 2 milyon abone için ölçeklenebilir olduğunu göstermiştir. Eş zamanlı farklı müşteri sayıları ile yapılan testlerin sonucunda; eş zamanlı 10000 abone

SFC isteği için servis zinciri kurallarının yüklü trafik akışında bile herhangi bir paket kaybı olmadan 2,9 sn gibi çok kısa bir süre içerisinde uygulayabildiği ve CPU tüketiminin en fazla %23,5 ile %28,5 arasında kaldığı gözlemlenmiştir. Eş zamanlı saniyede 10000 akış değişikliği talebi ve aynı anda 2 milyon abonenin tek lokasyondan trafik üretmesi mevcut durum ile kıyaslandığında gerçek kullanım senaryolarında beklenenden çok daha fazla olduğu unutulmamalıdır. Yalnızca önerilen çözümün yoğun trafik altında ölçeklenebilirliğini ve performansını göstermek için bu değerler kullanılmıştır. Uygulanan SFC çözümünün sanal ağ işlevleri yanı sıra fiziksel ağ işlevlerini de başarı ile yönettiği gözlemlenmiştir. Operatörlerin kullandığı alt yapılarda fiziksel ağ işlevlerinin de sıklıkla kullanıldığı düşünüldüğünde bu özellik sayesinde geleneksel şebeke yapısından sanallaştırılmış yapıya geçişin sorunsuz olması beklenmektedir.

Bu çalışmada ilave olarak; uygulanan SFC çözümü ile geleneksel ağ arasında operatörlerin beş yıllık tedarik ve bakım harcamaları karşılaştırılmıştır. Maliyet analizi bölümünde detaylı olarak belirtilen varsayımlar çerçevesinde; servislerin önerilen SFC çözümü üzerinden verilmesi senaryosu ile SFC kullanılmadan geleneksel ağ üzerinden verilmesi senaryoları değerlendirilmiştir. Analiz sonuçlarına göre tedarik giderleri açısından ONOS tabanlı SFC çözümüne beş yılda %48,2 daha az yatırım yapılacağı, bakım giderleri açısından ise beş yılda %35 daha az yatırım yapılacağı öngörüsü ortaya çıkmıştır. Toplam maliyet açısından değerlendirildiğinde ise bu çalışmada önerilen SFC çözümüne beş yılda %42,6 daha az yatırım yapılması sonucu ortaya çıkmaktadır.

Sonuç olarak; gerçekleştirilen fonksiyonel testleri, performans testleri ve maliyet analizleri neticesinde geliştirilen çözüm mimarisi ile çok yüksek maliyetli ve tedarikçi bağımlı geleneksel ağlar yerine çok daha düşük maliyetli ve tedarikçi bağımsız açık kaynak kodlu SFC çözümünün büyük ölçekli telekom ağlarında kullanılabileceği görülmüştür.

7.2. İtranet Servisleri için SDN Tabanlı Yönetim Platformu

Günümüzde operatörler büyük boyutlardaki mevcut ağları ve intranet hizmetlerinin büyük çoğunluğunu yönetmekte çok zorlanmakta, birçok işlemleri manuel olarak yapmakta, tedarikçi bağımlı ve yüksek maliyetli donanımlar kullanmak zorunda kalmaktadırlar. Literatürde açık kaynak kodlu SDN kontrolcülerin mimari yapılarının analiz edilerek performans kıyaslamalarının yapıldığı bir takım çalışmalar bulunmaktadır. Ancak bu

çalışmalar, SDN paradigmasının intranet ağlarına uygulanması, bu ağlardaki tedarikçi bağımlı yapının azaltılması ve ağların yönetiminde yaşanan zorlukların çözümü konularına yoğunlaşmamıştır. Bu çalışmada operatörlerin bu problemlerine çözüm oluşturacak ONOS tabanlı bir SDN platformu geliştirilmiştir. Geliştirilen bu platform bünyesinde yer olan politika tabanlı dinamik VLAN yönetimi, politika tabanlı dinamik bant genişliği yönetimi ve dinamik erişim yönetimi sayesinde uç cihazlardan bağımsız merkezi olarak konfigüre edilen dinamik bir VLAN yönetimi yapılabilmiş, merkezi ve dinamik bir servis kalitesi yönetimi sağlanabilmiş ve ek güvenlik donanımlarına gerek kalmadan güvenlik yeteneklerinin en uç anahtarlar üzerinden verilebilmesi sağlanmıştır. İlave olarak;

- Uç cihazların otomatik tanınması, uygun VLAN'a atılması ve VLAN operasyonunun porttan bağımsız merkezi olarak yönetilebilmesi sayesinde manuel işlemlerden kurtararak operasyonel kolaylık sağlamış,
- Kontrolcü üzerinde ONOS'un kendi arayüzü kullanılarak, ilave bir ürüne gerek kalmadan akış bazlı metrikleri (Cpu, Ram ve Ddisc kullanım verileri, anahtarların port ya da cihaz bazlı tabloları, gelen byte sayısı, vb.) topladığı görülmüş,
- Önerilen SDN platformu ile geleneksel intranet ağının performans değerlerinin kıyaslanması amacı ile canlı ağ senaryoları oluşturularak canlı bir telekom laboratuvarında testler yapılmıştır. Bu sonuçlara göre, SDN tabanlı platformun gecikme, seğirme, paket kaybı ve akış kurulum süreleri açısından oldukça başarılı sonuçlar elde ettiği, sistemin kararlı bir şekilde çalıştığı, iyi bir şekilde ölçeklediği ve mevcut problemlere önemli ölçüde çözüm getirdiği görülmüştür.

Bu çalışmada uygulanan ONOS tabanlı SDN platform ile geleneksel intranet şebekesi için operatörlerin beş yıllık tedarik ve bakım harcamalarında karşılaştırılmıştır. Analiz sonuçlarına göre tedarik giderleri açısından ONOS tabanlı SDN platformu çözümüne beş yılda %18 daha az yatırım yapılacağı öngörülmektedir. Bakım giderleri açısından ise ONOS tabanlı SDN platformu çözümüne beş yılda %24,9 daha az yatırım yapılacağı öngörülmektedir. Toplam maliyet açısından değerlendirdiğimizde bu çalışmada önermiş olduğumuz ONOS tabanlı SDN platform çözümüne geleneksel şebekeye kıyasla beş yılda %20,1 daha az yatırım yapılması ortaya çıkmaktadır.

Sonuç olarak geliştirilen ONOS tabanlı SDN çözümünün operatörler ve hizmet verdikleri kurumsal müşteriler tarafından sarf edilen iş yükünün en aza indirdiği, insan kaynağının

önemli ölçüde azaldığı, zaman ve maliyetlerden büyük oranda kazanım sağladığı, tedarikçi bağımlılığını önemli ölçüde ortadan kaldırılabildiği ve büyük ölçekli intranet ağlarında geleneksel çözümlere iyi bir alternatif sağladığı gözlemlenmiştir.

7.3. SDN Tabanlı Geniş Bant Erişim Platformu

Mevcutta telekom operatörleri tarafından kullanılmakta olan pasif optik ağ teknolojileri belirli bir olgunluğa ve yaygın olarak kullanıma sahip olsalarda, operatörlerin bu teknolojileri kullanırken bir takım zorluklar yaşadığı bilinmektedir. Literatürde bu zorlukların aşılmasına katkı sağlayacak olan SEBA teknolojisi konusunda çok az çalışma mevcuttur. Bu çalışmalar, daha çok SEBA'nın mimari yapısına odaklanmış olup operatör şebekesine uygulanarak mevcutta kullanılan pasif optik sistemler ile performans kıyaslaması ele alınmamıştır. Bu çalışmada, açık kaynak kodlu SDN/NFV teknolojilerini kullanarak sabit erişim sistemlerinin sanallaşmasına imkan tanıyan SEBA teknolojisi başarıyla uygulanmıştır. Tekil ve özelleştirilmiş donanımların yerine standart donanımlar ve bu donanımlardan ayrıştırılmış bir merkezi yönetim yapısı kullanılmış, tedarikçi bağımlılığı önemli ölçüde ortadan kaldırılmıştır. İlave olarak;

- SEBA platformunda ONT'lerin SEBA destekli OLT'ler ile açık ara yüzler üzerinden kararlı bir şekilde çalıştığı, kullanıcılara internet, ses ve video hizmetlerinin başarı ile verilebildiği gözlemlenmiştir.
- SEBA platformu ile geleneksel PON erişim sistemlerinin performans yetkinlikleri karşılaştırılmıştır. Performans karşılaştırması için kalite ölçütü olarak veri indirme hızı, veri yükleme hızı, gecikme, seğirme, paket kaybı ölçümleme, video kalitesi ölçümleme ve video başlatma gecikmesi baz alınmıştır. Canlı ağ senaryosu kullanılarak gerçekleştirilen testlerin sonucuna göre; SEBA platformunun veri indirme, veri yükleme, gecikme, seğirme, paket kaybı, video kalitesi ve video başlatma süreleri açısından oldukça başarılı sonuçlar elde ettiği, sistemin kararlı bir şekilde çalıştığı ve mevcut problemlere önemli ölçüde çözüm getirdiği görülmüştür.

Sonuç olarak; açık kaynak tabanlı erişim teknolojisi SEBA, performans, kalite ve işlevsellik yönleriyle canlı şebekede test edilmiş ve köklü standartlara sahip, dünyada yaygın kullanımı olan geleneksel GPON teknolojisi ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda, SEBA altyapısını kullanan müşteri servislerinin kalite ve performans sonuçlarının, geleneksel

GPON altyapısındaki sonuçlarla benzer olması, bu yeni teknolojinin büyük operatörlerce kullanılabilirliğini kanıtlamaktadır. Operatörler SEBA'yı erişim şebekelerinde kullandıkça ve teknolojinin sahada kullanımı yaygınlaştıkça, sanallaştırmanın faydalarından daha iyi yararlanabileceği öngörülmektedir. Hali hazırda tedarikçi bağımlılığını önemli ölçüde ortadan kaldırarak yatırım ve kurulum maliyetlerini azaltacağı öngörülen SEBA'nın, bakım alanında da maliyetlerin sanallaşma sonucunda kurgulanacak yeni otomasyonlar ve kapalı çevrim ortam kontrolleri sayesinde azaltılacağı düşünülmektedir. Henüz gelişimini tamamlamasa da şimdiden performans ve yenilikçilik konularında en az diğer erişim teknolojileri kadar güçlü olduğunu kanıtlayan SEBA teknolojisinin yakın gelecekte operatörlerin şebekelerine hızla uygulanabilecek bir teknoloji olabileceği bu çalışmada gözlenmiştir.

KAYNAKLAR

1. Verizon Network Infrastructure Planning. (2016). SDN-NFV reference architecture; Verizon Technical Report, 1-220.
2. Naudts, B., Tavernier, W., Verbrugge, S., Colle, D., and Pickavet, M. (2016). Deploying sdn and nfv at the speed of innovation: toward a new bond between standards development organizations, industry fora, and open-source software projects. *IEEE Communications Magazine*, 54(3), 46-53.
3. Nogales, B., Sanchez-Aguero, V., Vidal, I., Valera, F., and Garcia-Reinoso, J. (2018, June). *A NFV system to support configurable and automated multi-UAV service deployments*. 4th ACM Workshop on Micro Aerial Vehicle Networks, Systems, and Applications, Munich, Germany, 39-44.
4. Kreutz, D., Ramos, F. M. V., Esteves Verissimo, P., Esteve Rothenberg, C., Azodolmolky, S., and Uhlig, S. (2015). *Software-Defined Networking: A Comprehensive Survey* (First Edition). Proceedings of the IEEE, 14–76.
5. VMware. (2008, March). Understanding Full Virtualization, Paravirtualization, and Hardware Assist; VMware, White paper, 1-17.
6. Crosby, S., Brown, D. (2007). The virtualization reality. *ACM Queue*, 4(10), 34-41.
7. Young, P. R., Sharma, S. (2011). Virtualization: A review and future directions. *AJIT*, 1(1), 1-37.
8. Oracle. (2005, October). *Slicing and dicing servers a guide to virtualization and containment Technologies*. Technical Paper.
9. İnternet: VMWARE. Virtual desktop infrastructure. URL: <https://www.vmware.com/topics/glossary/content/virtual-desktop-infrastructure-vdi>, Son Erişim Tarihi: 06.04.2020
10. İnternet: Linux. Kernel Virtual Machine. URL: https://www.linux-kvm.org/page/Main_Page, Son Erişim Tarihi: 06.04.2020.
11. İnternet: Linux. Kernel Virtual Machine. URL: https://www.linux-kvm.org/page/Main_Page, Son Erişim Tarihi: 06.04.2020.
12. Matias, J., Garay, J., Toledo, N., Unzilla, J., and Jacob, E. (2015). Toward an SDN-enabled NFV architecture. *IEEE Communications Magazine*, 53(4), 187-193.
13. Yousaf, F. Z., Bredel, M., Schaller, S., and Schneider, F. (2017). NFV and SDN—Key Technology Enablers for 5G Networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 35(11), 2468–2478.
14. Vilalta, R., Mayoral, A., Munoz, R., Casellas, R., and Martínez, R. (2015). Multitenant transport networks with SDN/NFV. *Journal of Lightwave Technology*, 34(6), 1509-1515.

15. Open Network Foundation. (2015). TR-518 Relationship of SDN and NFV; ONF, USA, 1-20.
16. ETSI NFV ISG. (2015). NFV-EVE005: SDN usage in NFV architectural framework; ETSI Report, 1-125.
17. Open Network Foundation. (2016). SDN Architecture; ONF, TR-521, Issue 1.1, USA, 1-59.
18. İnternet: Open Networking Foundation. Software-Defined Networking (SDN) Definition. URL: <https://www.opennetworking.org/sdn-definition/>, Son Erişim Tarihi: 20.12.2020.
19. ETSI GS NFV. (2013). ETSI GS NFV 002: Network Functions Virtualisation (NFV); Architectural Framework; ETSI Report, France, V1.1.1, 1-21.
20. Feamster, N., Rexford, J., and Zegura, E. (2013). The road to SDN. *Queue*, 11(12), 20-40.
21. De Leenheer, M., Higuchi, Y., Furusawa, T., and Parulkar, G. (2017, September). *SDN control of optical networks*. Paper presented at the 2017 European Conference on Optical Communication (ECOC), Gothenburg, Sweden.
22. Braun, W., Menth, M. (2014). Software-defined networking using OpenFlow: Protocols, applications and architectural design choices. *Future Internet*, 6(2), 302-336.
23. McKeown, N., Anderson, T., Balakrishnan, H., Parulkar, G., Peterson, L., Rexford, J., Shenker, S., and Turner, J. (2008). OpenFlow: enabling innovation in campus networks. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 38(2), 69-74.
24. Letteri, I., Del Rosso, M., Caianiello, P., and Cassioli, D. (2018, February). *Performance of Botnet Detection by Neural Networks in Software-Defined Networks*. ITASEC2018, Italy, 11161, 1-10.
25. Open Networking Foundation. (2014). Openflow Switch Specification, Version 1.5.0 (Protocol version 0x06); Open Networking Foundation, 1-227.
26. Kumar, N. (2018). Cross layer design in Software Defined Networking (SDN): challenges and solutions, Technical Report, 1-11.
27. Han, B., Gopalakrishnan, V., Ji, L., and Lee, S. (2015). Network function virtualization: Challenges and opportunities for innovations. *IEEE Communications Magazine*, 53(2), 90-97.
28. Condoluci, M., Mahmoodi, T. (2018). Softwarization and virtualization in 5G mobile networks: Benefits, trends and challenges. *Computer Networks*, 146, 65-84.
29. Herrera, J. G., Botero, J. F. (2016). Resource allocation in NFV: A comprehensive survey. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 13(3), 518-532.
30. İnternet: ETSI. Network Functions Virtualisation (NFV). URL: <https://www.etsi.org/technologies/nfv>, Son Erişim Tarihi: 23.03.2021.

31. ETSI GS NFV. (2014, December). ETSI GS NFV 002: Network Functions Virtualisation (NFV); Architectural Framework; ETSI Report, *France*, 1-21.
32. De Benedictis, M., & Lioy, A. (2017, November). *On the establishment of trust in the cloud-based ETSI NFV framework*. Paper presented at the 2017 IEEE Conference on Network Function Virtualization and Software Defined Networks (NFV-SDN), Berlin, Germany.
33. Duan, Q., Yan, Y., and Vasilakos, A. V. (2012). A survey on service-oriented network virtualization toward convergence. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 9(4), 373-392.
34. Gil Herrera, J. d. J., Vega, J. F. B. (2016). Network Functions Virtualization: A Survey. *IEEE Latin America Transactions*, 14(2), 983-997.
35. Mijumbi, R., Serrat, J., Gorricho, J. L., Bouten, N., Turck, F. D., and Boutaba, R. (2016). Network Function Virtualization: State of-the-art and research challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 18(1), 236-262.
36. Hernandez-Valencia, E., Izzo, S., and Polonsky, B. (2015). How will NFV/SDN transform service provider opex? *IEEE Network*, 29(3), 60-67.
37. AT&T Labs and AT&T Foundry. (2017). AT&T Edge Cloud (AEC); AT&T, White paper, 1-25.
38. Peterson, L., Al-Shabibi, A., Anshutz, T., Baker, S., Bavier, A., Das, S., Hart, J., Palukar, G., and Snow, W. (2016). Central office re-architected as a data center. *IEEE Communications Magazine*, 54(10), 96-101.
39. İnternet: Opensource. What is open source? URL: <https://opensource.com/resources/what-open-source>, Son Erişim Tarihi: 15.04.2020.
40. Evers, S. (2000). *An introduction to open source software development*. Berlin: Technische Universität Berlin, Fachbereich Informatik, Fachgebiet Formale Modelle, Logik und Programmierung (FLP).
41. Red Hat.(2020, February). The State of Enterprise Open Source; Red Hat, 1-12.
42. Bonaccorsi, A., Rossi, C. (2003). Why open source software can succeed. *Research policy*, 32(7), 1243-1258.
43. İnternet: Opensource. Open Source Initiative. URL: <http://www.opensource.org>, Son Erişim Tarihi: 16.01.2021.
44. İnternet: Asay, M. (2013, October). Is Facebook the world's largest open source company? URL: <https://readwrite.com/2013/10/17/is-facebook-the-worlds-largest-open-source-company/>, Son Erişim Tarihi: 16.01.2021.
45. Wahyudin, D., Schatten, A., Winkler, D., and Biffl, S. (2007, August). *Aspects of software quality assurance in open source software projects: two case studies from apache project*. Paper presented at the 33rd EUROMICRO Conference on Software Engineering and Advanced Applications (EUROMICRO 2007), Lubeck, Germany.

46. Nagle, F. (2018). Open source software and firm productivity. *Management Science*, 65(3), 1191-1215.
47. İnternet: Yarow, J. (2013, September). Microsoft's biggest problem in one chart. URL: <https://www.businessinsider.com/microsofts-biggest-problem-in-one-chart-2013-9>, Son Erişim Tarihi: 16.01.2021.
48. İnternet: The Linux Foundation Projects. The OpenDaylight Platform. URL: <https://www.opendaylight.org>, Son Erişim Tarihi: 20.01.2020.
49. İnternet: Open Networking Foundation. Open Networking. URL: <https://www.opennetworking.org/>, Son Erişim Tarihi: 20.01.2020.
50. İnternet: Open Networking Foundation. Open Networking Foundation unveils new open innovation pipeline to transform Open Networking. URL: <https://www.opennetworking.org/news-and-events/press-releases/open-networking-foundation-unveils-new-open-innovation-pipeline-to-transform-open-networking/>, Son Erişim Tarihi: 05.05.2020.
51. Bondkovskii, A., Keeney, J., van der Meer, S., and Weber, S. (2016, April). *Qualitative comparison of open-source sdn controllers*. NOMS 2016-2016 IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium, Istanbul, Turkey, 889-894.
52. De Leenheer, M., Tofigh, T., and Parulkar, G. (2016, March). *Open and programmable metro networks*. Paper presented at the 2016 Optical Fiber Communication Conference, Anaheim, CA, USA.
53. De Leenheer, M., Koshibe, A., Higuchi, Y., Shiota, N., Wu, H., Furusawa, T., Tofigh, T., and Parulkar, G. (2017, March). *Open and disaggregated multi -layer networks*. Paper presented at the Optical Fiber Communication Conference, Los Angeles, CA.
54. İnternet: ONF. Open Network Operating System (ONOS). URL: <https://wiki.onosproject.org/display/ONOS/>, Son Erişim Tarihi: 20.01.2020.
55. İnternet: Wiki. SDN-IP Architecture. URL: <https://wiki.onosproject.org/display/ONOS/SDN-IP+Architecture>, Son Erişim Tarihi: 18.02.2020.
56. İnternet: Openstack. Openstack. URL: <https://www.openstack.org/>, Son Erişim Tarihi: 18.02.2020.
57. İnternet: Cloud Native Computing Foundation(CNCF). Cloud native computing foundation. URL: <https://www.cncf.io/>, Son Erişim Tarihi: 05.05.2020.
58. Niknam, S., Roy, A., Dhillon, H. S., Singh, S., Banerji, R., Reed, J. H., Saxena, N. and Yoon, S. (2020). Intelligent O-RAN for beyond 5G and 6G wireless networks. *arXiv:2005.08374*, 1-7.
59. İnternet: Telecom Infra Project. A new approach to building and deploying telecom network infrastructure. URL: <https://telecominfraproject.com/>, Son Erişim Tarihi: 05.05.2020.

60. Shah, S.A.R., Kim, J., Bae, S., Jaikar, A., and Noh, S.-Y. (2016, June). *Network softwarization: A study of SDN and NFV integration*. Paper presented at the International Conference on Convergence Technology (ICCT), Jeju Island, Korea.
61. Barakabitze, A. A., Ahmad, A., Mijumbi, R., and Hines, A. (2020). 5G network slicing using SDN and NFV: A survey of taxonomy, architectures and future challenges. *Computer Networks*, 167, 106984.
62. Ravindran, R., Chakraborti, A., Amin, S.O., Azgin, A., and Wang, G. (2017). 5G-ICN: Delivering ICN services over 5G using network slicing. *IEEE Communications Magazine*, 55 (5), 101-107.
63. Barakabitze, A.A., Xiaoheng, T. (2014). Caching and data routing in information centric networking (ICN): the future internet perspective. *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*, 4(11), 8-20.
64. Mamushiane, L., Dlamini, S. (2017, October). *Leveraging SDN/NFV as key stepping stones to the 5G era in emerging markets*. Paper presented at the IEEE 2017 Global Wireless Summit (GWS), Cape Town, South Africa.
65. Gartner. (2020). 5G-Edge Computing and Mobile Private Networks for CSP; Gartner Report, 1-10.
66. ETSI. (2020, September). The fifth generation fixed network (F5G): Bringing fibre to everywhere and everything; ETSI, White paper, 1-24.
67. Duan, Q., Ansari, N., and Toy, M. (2016). Software-defined network virtualization: an architectural framework for integrating SDN and NFV for service provisioning in future networks. *IEEE Network*, 30(5), 10–16.
68. Ding, W., Qi, W., Wang, J., and Chen, B. (2015). OpenSCaaS: an open service chain as a service platform toward the integration of SDN and NFV. *IEEE Network*, 29(3), 30-35.
69. Quinn, P., Nadeau, T. (2015, April). Problem Statement for service function chaining; IETF, RFC 7498.
70. Zhang, Y., Beheshti, N., Beliveau, L., Lefebvre, G., Manghirmalani, R., Mishra, R., Patney, R., Shirazipour, M., Subrahmaniam, R., Truchan, C., and Tatipamula, M. (2013). *Steering: A software-defined networking for inline service chaining*. Paper presented at the 2013 21st IEEE International Conference on Network Protocols (ICNP), Goettingen, Germany.
71. Haeffner, W., Napper, J., Lopez, D., and Uttaro, J. (2016). Service function chaining use cases in mobile networks; IETF, draft-ietf-sfc-usecase-mobility-06, 1-25.
72. İnternet: Gini5 in Github. Service function chaining. URL: <https://citelab.github.io/gini5/features/service-function-chaining/>, Son Erişim Tarihi: 26.03.2021.

73. İnternet: IETF. Network based services in mobile networks. URL: <https://datatracker.ietf.org/meeting/87/materials/slides-87-nsc-1>, Son Erişim Tarihi: 23.01.2021.
74. Gronsund, P., Mahmood, K., Millstein, G., Noy, A., Solomon, G., and Sahai, A. (2015). *A solution for SGI-LAN services virtualization using NFV and SDN*. Paper presented at the 2015 European Conference on Networks and Communications (EuCNC), Paris, France.
75. Xu, Y., Kafle, V. P. (2017). *Reliable service function chain provisioning in software-defined networking*. Paper presented at the IEEE 13th International Conference on Network and Service Management (CNSM), Tokyo, Japan.
76. Hsieh, C. H., Chang, J. W., Chen, C., and Lu, S. H. (2016, October). *Network-aware service function chaining placement in a data center*. Paper presented at the 2016 18th Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium (APNOMS), Kanazawa, Japan.
77. Akyıldız, H. A., Saygun, E. (2015). *SDN- NFV-cloud introduction in the context of service chaining*. Paper presented at the IEEE 23rd Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), Malatya, Turkey.
78. Scheid, E. J., Machado, C. C., dos Santos, R. L., Schaeffer-Filho, A. E., and Granville, L. Z. (2016). *Policy-based dynamic service chaining in network functions virtualization*. Paper presented at the IEEE Symposium on Computers and Communication (ISCC), Messina, Italy.
79. John, W., Pentikousis, K., Agapiou, G., Jacob, E., Kind, M., Manzalini, A., and Meirosu, C. (2013). *Research directions in network service chaining*. Paper presented at the 2013 IEEE SDN for Future Networks and Services (SDN4FNS), Trento, Italy.
80. Gau, R.-H., Chiu, H.-T., and Tsai, P.-K. (2016, September). *Optimizing the service capacity of SDN-based cellular networks with service chaining and NFV*. Paper presented at the 2016 IEEE 27th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), Valencia, Spain.
81. Zhang, Y., Anwer, B., Gopalakrishnan, V., Han, B., Reich, J., Shaikh, A., and Zhang, Z.-L. (2017). *ParaBox: Proceedings of the symposium on SDN research*. USA: SOSR '17: Proceedings of the Symposium on SDN Research, 143-149.
82. Gasparakis, J., Smith, K., Zhou, D., Nehama, D., Hyatt, G. F., Oliver, J., Cooper, T., and Browne, R. (2016). Evaluating dynamic service function chaining for the Gi-LAN; Intel, White paper, 1-14.
83. Sakhaf, S., Tavernier, W., Colle, D., and Pickavet, M. (2015). *Network service chaining with efficient network function mapping based on service decompositions*. Paper presented at the 2015 1st IEEE Conference on Network Softwarization (NetSoft), London, UK.
84. Zhang, J., Wang, Z., Ma, N., Huang, T., and Liu, Y. (2018). Enabling efficient service function chaining by integrating NFV and SDN: architecture, challenges and opportunities. *IEEE Network*, 32(6), 152-159.

85. Fayazbakhsh, S. K., Chiang, L., Sekar, V., Yu, M., and Mogul, J. C. (2013, August). *Flowtags: Enforcing network-wide policies in the presence of dynamic middlebox actions*. Paper presented at the Second ACM SIGCOMM Workshop on Hot Topics in Software Defined Networking, Hong Kong, China.
86. Bosshart, P., Daly, D., Gibb, G., Izzard, M., McKeown, N., Rexford, J., Sclesinger, C., Talayco, D., Vahdat, A., Vaghese, G., and Walker, D. (2014). P4: Programming protocol-independent packet processors. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 44 (3), 88-95.
87. Hawilo, H., Shami, A., Mirahmadi, M., and Asal, R. (2014). NFV: state of the art, challenges, and implementation in next generation mobile networks (vEPC). *IEEE Network*, 28(6), 18-26.
88. Sahhaf, S., Tavernier, W., Rost, M., Schmid, S., Colle, D., Pickavet, M., and Demeester, P. (2015). Network service chaining with optimized network function embedding supporting service decompositions. *Computer Networks*, 93, 492-505.
89. Gude, N., Koponen, T., Pettit, J., Pfaff, B., Casado, M., McKeown, N., and Shenker, S. (2008). NOX: Towards an operating system for networks. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 38(3), 105-110.
90. Koponen, T., Casado, M., Gude, N., Stribling, J., Poutievski, L., Zhu, M., Ramanathan, R., Iwata, Y., Inoue, H., Hama, T., and Shenker, S. (2010). *Onix: a distributed control platform for large-scale production networks*. 9th Usenix Symposium on Operating Systems Design and Implementation, Vancouver, BC, Canada, 351-364.
91. Khondoker, R., Zaalouk, A., Marx, R., and Bayarou, K. (2014, January). *Feature-based comparison and selection of Software Defined Networking (SDN) controllers*. Paper presented at the IEEE 2014 World Congress on Computer Applications and Information Systems (WCCAIS), Hammamet, Tunisia.
92. İnternet: SDXCenral. What is a floodlight controller? <https://www.sdxcentral.com/networking/sdn/definitions/what-is-floodlight-controller/>, Son Erişim Tarihi: 20.01.2020.
93. İnternet: Opencontrail. A blueprint for building the opencontrail community. URL: <http://www.opencontrail.org/a-blueprint-for-building-the-opencontrail-community/>, Son Erişim Tarihi: 20.01.2020.
94. Taher, A. (2014). Testing of floodlight controller with mininet in sdn topology. *ScienceRise*, 5(2), 68-73.
95. Yamei, F., Qing, L., and Qi, H. (2016). *Research and comparative analysis of performance test on SDN controller*. 2016 First IEEE International Conference on Computer Communication and the Internet (ICCCI), Wuhan, China 207-210.
96. Suh, D., Jang, S., Han, S., Pack, S., Kim, M. S., Kim, T., and Lim, C. G. (2017). Toward highly available and scalable software defined networks for service providers. *IEEE Communications Magazine*, 55(4), 100-107.

97. Mamushiane, L., Lysko, A., and Dlamini, S. (2018, April). *A comparative evaluation of the performance of popular SDN controllers*. Paper presented at the 2018 Wireless Days (WD), Dubai, UAE, 54-59.
98. Salman, O., Elhajj, I. H., Kayssi, A., and Chehab, A. (2016, April). *SDN controllers: A comparative study*. Paper presented at the 2016 18th Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON), Limassol, Cyprus.
99. Shah, S. A., Faiz J., Farooq M., Shafi A., and Mehdi S. A. (2013, June). *An architectural evaluation of SDN controllers*. IEEE International Conference on Communications (ICC), Budapest, Hungary, 3504-3508.
100. Kumari, A., Chandra, J., and Sairam A. S. (2018, January). *Optimizing flow setup time in software defined network*. 10th International Conference on Communication Systems & Networks (COMSNETS), Bengaluru, 543-545.
101. Timmers, M., Guenach, M., Nuzman, C., and Maes, J. (2013). G. fast: evolving the copper access network. *IEEE Communications Magazine*, 51(8), 74-79.
102. Terada, J., Shimada, T., and Otaka, A. (2017, July). *Optical access network technologies for future radio access networks*. 2017 IEEE Photonics Society Summer Topical Meeting Series (SUM), San Juan, 37-38.
103. Luo, Y., Zhou, X., Effenberger, F., Yan, X., Peng, G., Qian, Y., and Ma, Y. (2012). Time-and wavelength-division multiplexed passive optical network (TWDM-PON) for next-generation PON stage 2 (NG-PON2). *Journal of lightwave technology*, 31(4), 587-593.
104. Carapinha, J., Jiménez, J. (2009, August). *Network virtualization: a view from the bottom*. 1st ACM workshop on Virtualized infrastructure systems and architectures, Barcelona, Spain, 73-80.
105. Internet: Open Networking Foundation. SDN Enabled Broadband Access (SEBA). URL: <https://www.opennetworking.org/reference-designs/seba/>.
106. Open Networking Foundation. (2014, March). Reference Design, SDN Enabled Broadband Access (SEBA); ONF, TS-100, Version 1.0.
107. Internet: Son, H. J., Yoo, C. (2016, August). AT&T's CORD - the ultimate architecture born after decades of innovation in the communications network. URL: <https://www.netmanias.com/en/post/blog/10408/gigabit-internet-sdn-nfv/at-t-s-cord-the-ultimate-architecture-born-after-decades-of-innovation-in-the-communications-network>, Son Erişim Tarihi: 08.03.2021.
108. Internet: File Download Test. URL: http://de.download.nvidia.com/Windows/Quadro_Certified/451.77/451.77-quadro-desktop-notebook-win10-64bit-international-whql.exe, Son Erişim Tarihi: 14.03.2021.
109. Internet: File Upload Test. URL: https://ps.uci.edu/~franklin/doc/file_upload.html, Son Erişim Tarihi: 14.03.2021.

110. Wind. (2017, November). vRAN: The next step in network transformation; White paper, 1-10.
111. İnternet: All Spares. What are 1G, 2G, 3G, etc., mobile networks? URL: <https://all-spares.com/en/articles-and-video/what-are-1g-2g-3g-etc.-mobile-networks.html>, Son Erişim Tarihi: 01.03.2021.
112. Meraj, M., Kumar, S. (2015). Evolution of mobile wireless technology from 0G to 5G. *International Journal of Computer Science and Information Technologies*, 6(3), 2545-2551.
113. Series, M. (2015). *IMT Vision–Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond*. Recommendation ITU, 2083-0.
114. Ericsson. (2019, November). Ericsson Mobility Report; Ericsson, 1-36.
115. İnternet: Datacomony. Virtual Rans Simplify Administration and Increase and Flexibility. URL: <https://datacomony.com/2019/04/virtual-rans-simplify-administration-and-increase-flexibility/>, Son Erişim Tarihi: 20.04.2020.
116. Mavenir. (2019). Evolution to 5G vRAN and 5G Core; Mavenir, 1-18.
117. Zeng, J., Su, X., Gong, J., Rong, L., and Wang, J. (2017, May). *5G virtualized radio access network approach based on no stack framework*. Paper presented at the 2017 IEEE International Conference on Communications (ICC), Paris, France.
118. İnternet: Drivenets. Bank of America (BoFA) Calls White Box routing a transformative disruption. URL: <https://drivenets.com/blog/disaggregation/bank-of-america-bofa-calls-white-box-routing-a-transformative-disruption/>, Son Erişim Tarihi: 23.01.2020.
119. Riccardi, E., Gunning, P., de Dios, O. scar G. lez, Quagliotti, M., Lopez, V., and Lord, A. (2018). An Operator view on the introduction of white boxes into optical networks. *Journal of Lightwave Technology*, 36(15), 3062–3072.
120. Terefenko, D. (2018). *A Comparison of Multiprotocol Label Switching (MPLS) and OpenFlow Communication Protocols*. Master of Science Thesis, Institute of Technology Tallaght, Dublin, Ireland.
121. Barguil, S., Lopez, V., and Fernandez-Palacios Gimenez, J. P. (2020). *Towards an Open Networking Architecture*. Paper presented at the 2020 International Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM), Barcelona, Spain.
122. İnternet: Drivenets. AT&T deploys DriveNets Network Cloud in their next-gen core. URL: <https://drivenets.com/news-and-events/press-release/att-deploys-drivenets-network-cloud-in-their-next-gen-core/>, Son Erişim Tarihi: 23.01.2020.
123. İnternet: Ufispac. Telecom solutions. URL: <https://www.ufispac.com/solutions/telecoms#s02>, Son Erişim Tarihi: 23.01.2020.
124. İnternet: Drivenets. White box architecture. URL: <https://drivenets.com/products/white-box-architecture/>, Son Erişim Tarihi: 23.01.2020.

125. İnternet: Ufispac. What is a Distributed Disaggregated Chassis (DDC)? URL: <https://www.ufispac.com/company/blog/what-is-a-distributed-disaggregated-chassis-ddc>, Son Erişim Tarihi: 23.01.2020.
126. İnternet: Drivenets. DriveNets. URL: <https://drivenets.com>, Son Erişim Tarihi: 23.01.2020.





GAZİ GELECEKTİR..