

Usporedna analiza različitih implementacija 5G mrežne arhitekture

Posavec, Mateo

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Transport and Traffic Sciences / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:119:844837>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-06**



Repository / Repozitorij:

[Faculty of Transport and Traffic Sciences - Institutional Repository](#)



Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti

DIPLOMSKI RAD

**USPOREDNA ANALIZA RAZLIČITIH
IMPLEMENTACIJA 5G MREŽNE ARHITEKTURE**

**COMPARATIVE ANALYSIS OF DIFFERENT
IMPLEMENTATIONS OF 5G NETWORK
ARCHITECTURE**

Mentor: prof. dr. sc. Štefica Mrvelj

Student: Mateo Posavec

JMBAG: 0036470394

Zagreb, kolovoz 2024.

Zagreb, 5. travnja 2024.

Zavod: **Zavod za informacijsko komunikacijski promet**
Predmet: **Tehnologija telekomunikacijskog prometa II**

DIPLOMSKI ZADATAK br. 7597

Pristupnik: **Mateo Posavec (0036470394)**
Studij: **Promet**
Smjer: **Informacijsko-komunikacijski promet**

Zadatak: **Usporedna analiza različitih implementacija 5G mrežne arhitekture**

Opis zadatka:

Prikazati ključne elemente složenog i kompleksnog sustava mobilnih mreža pete generacije te analizirati protokole u upotrebi unutar sustava kao i protokole korištene za komunikaciju sustava s okolinom. Upotrebom odgovarajućih grafičkih prikaza objasniti način komunikacije ključnih elemenata uz analizu korištenih sučelja koja povezuju te iste elemente.

Prikazati i analizirati sve popratne tehnologije koje su postale neizostavan dio mobilnih mreža pete generacije.

Usporediti sustave četvrte i pete generacije uz detaljna objašnjenja sličnosti i razlika u pogledu uloga koje njihovi brojni elementi ispunjavaju. Analizirati funkcionalnosti različitih izvedbi mobilnih mreža pete generacije te prikazati trenutno stanje implementiranih mobilnih mreža pete generacije u Hrvatskoj, Europi i svijetu.

Mentor:



prof. dr. sc. Štefica Mrvelj

Predsjednik povjerenstva za
diplomski ispit:



USPOREDNA ANALIZA RAZLIČITIH IMPLEMENTACIJA 5G MREŽNE ARHITEKTURE

SAŽETAK:

Rad se bavi objašnjenjem ključnih tehnologija koje čine osnovu modernih telekomunikacijskih mreža. Analizira se međuovisnost između 4G i 5G mreža kao i potreba za IMS sustavom koji se proteže kroz više generacija mobilnih tehnologija. U radu su detaljno objašnjeni pojmovi kao što su 4G mreže, IMS, virtualizacija te 5G mreže, a fokus je stavljen na njihov međusobni odnos i funkcionalnosti u kontekstu implementacije 5G tehnologije.

Poseban naglasak stavljen je na interoperabilnost između 4G i 5G mreža, kako bi se omogućila nesmetana tranzicija korisnika i usluga iz starijih u novije mreže, te kako bi se omogućilo istovremeno funkcioniranje obje mreže u prijelaznom razdoblju. Zaključuje se da će 5G mreža, uz podršku IMS-a i virtualizacije, donijeti poboljšanja u brzini, vremenu kašnjenja i kapacitetu mreže, omogućujući tako nove usluge i aplikacije koje su ključne za razvoj industrije i društva.

KLJUČNE RIJEČI: 5G; 4G; IMS; virtualizacija

SUMMARY:

The paper focuses on explaining the key technologies that form the foundation of modern telecommunication networks. It analyzes the interdependence between 4G and 5G networks as well as the need for the IMS system, which spans multiple generations of mobile technologies. The paper provides a detailed explanation of concepts such as 4G networks, IMS, virtualization, and 5G networks, with an emphasis on their interrelation and functionalities in the context of 5G technology implementation.

Special emphasis is placed on the interoperability between 4G and 5G networks to ensure seamless transitions for users and services from older to newer networks, as well as to enable the simultaneous operation of both networks during the transition period. It concludes that the 5G network, supported by IMS and virtualization, will bring improvements in speed, latency, and network capacity, thus enabling new services and applications that are crucial for the development of industry and society.

KEY WORDS: 5G; 4G; IMS; virtualization

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. MOBILNE MREŽE ČETVRTE GENERACIJE	3
2.1. PRISTUPNI DIO MREŽE.....	6
2.2. JEZGRENI DIO MREŽE	7
2.3. SEKVENCIJSKI DIJAGRAM POVEZIVANJA UE-A NA LTE MREŽU	11
3. IMS PODSUSTAV.....	15
3.1. OPIS ARHITEKTURE IMS PODSUSTAVA	15
3.2. SEKVENCIJSKI DIJAGRAM IMS REGISTACIJE I USPOSTAVA POZIVA... ..	19
4. MOBILNE MREŽE PETE GENERACIJE	22
4.1. 5G PRISTUPNA MREŽA.....	22
4.2. 5G JEZGRENA MREŽA	24
4.3. <i>NETWORK SLICING</i>	30
5. PRIMJENA VIRTUALIZACIJE U MOBILNIM MREŽAMA.....	35
5.1. HIPERVIZOR.....	36
5.2. KONTEJNERI	38
5.3. USPOREDBA HIPERVIZORA I KONTEJNERA	40
5.4. PROBLEMI TELEKOM OPERATORA.....	42
5.5. NFV	43
5.6. SDN	46
6. ANALIZA POSTOJEĆIH MREŽA PETE GENERACIJE I POPRATNIH TEHNOLOGIJA.....	49
6.1. OPCIJE IMPLEMENTACIJE.....	49
6.2. GLASOVNE USLUGE U 5G MREŽI.....	57
6.3. EDGE COMPUTING.....	58

7. ZAKLJUČAK	60
LITERATURA.....	61
POPIS KRATICA I AKRONIMA.....	65
POPIS SLIKA	70
POPIS TABLICA	71

1. UVOD

Peta generacija mobilnih mreža (5G, engl. *5th generation mobile network*) predstavlja revolucionarni napredak u svijetu telekomunikacija. Nasljednik je 4G (engl. *4th generation mobile network*) LTE (engl. *long term evolution*) mreže i obećava dramatične promjene u brzini, kapacitetu, pouzdanosti i opsegu bežičnih komunikacija. 5G mreža nije samo evolucija prethodnih generacija mobilnih mreža, već donosi potpuno novu paradigmu koja će omogućiti razvoj inovativnih aplikacija i usluga koje nisu bile moguće prije. 5G mreža predstavlja ključnu infrastrukturu za budućnost, pružajući temelje za inovacije i unapređenja u mnogim aspektima života ljudi. Utjecaj 5G mreže bit će dalekosežan, promičući napredak u tehnologiji i društvu u cjelini.

Ovaj rad je zamišljen tako da kroz više poglavlja objasni ili barem predoči važnije detalje ne samo 5G mreže u svojoj cijelosti, nego i, po autorovom mišljenju, najbitnijih sustava koji ju okružuju i koji u konačnici čine okolinu unutar koje 5G mreža može pokazati sav svoj potencijal. Rad je podijeljen u 7 poglavlja:

1. Uvod
2. Mobilne mreže četvrte generacije
3. IMS podsustav
4. Mobilne mreže pete generacije
5. Primjena virtualizacije u mobilnim mrežama
6. Analiza postojećih mreža pete generacije i popratnih tehnologija
7. Zaključak.

Drugo poglavlje bavi se 4G mrežom, točnije LTE mrežom. Iako se radi o predstavniku prethodne generacije mobilnih mreža, nastojat će se pokazati da 4G mreža i dalje igra ključnu ulogu bez koje 5G mreža (u većini zemalja svijeta, barem za vrijeme pisanja ovog rada) ne bi mogla niti postojati. Predstaviti će se najvažniji elementi samog sustava i pokazati će se postupak spajanja mobilnog terminalnog uređaja na LTE mrežu.

Treće poglavlje posvećeno je IMS (engl. *IP Multimedia Subsystem*) podsustavu. Iako IMS nije najnovija tehnologija i dalje se pokazao kao neizostavan element u pružanju glasovnih usluga u 5G, ali i u 4G mreži. Objasnit će se najvažniji elementi i pokazati osnovna procedura uspostave poziva.

Četvrto poglavlje nastoji čitatelju približiti samu arhitekturu 5G mreže, od njenih osnovnih komponenti, do načina njihovog povezivanja. Predstaviti će se i sve trenutno standardizirane i trenutno dostupne i u svijetu aktivne arhitekture 5G mreže.

Peto poglavlje objašnjava virtualizaciju kao neizostavnu tehnologiju, bez koje jednostavno ne bi bilo moguće pružiti sve funkcionalnosti 5G mreže koje su zamišljene i standardizirane.

Šesto poglavlje nastoji povezati sva prethodna poglavlja kako bi se čitatelju dočarala interoperabilnost različitih sustava, i tehnologija, koji su tijekom ovoga rada predstavljeni i objašnjeni.

2. MOBILNE MREŽE ČETVORTE GENERACIJE

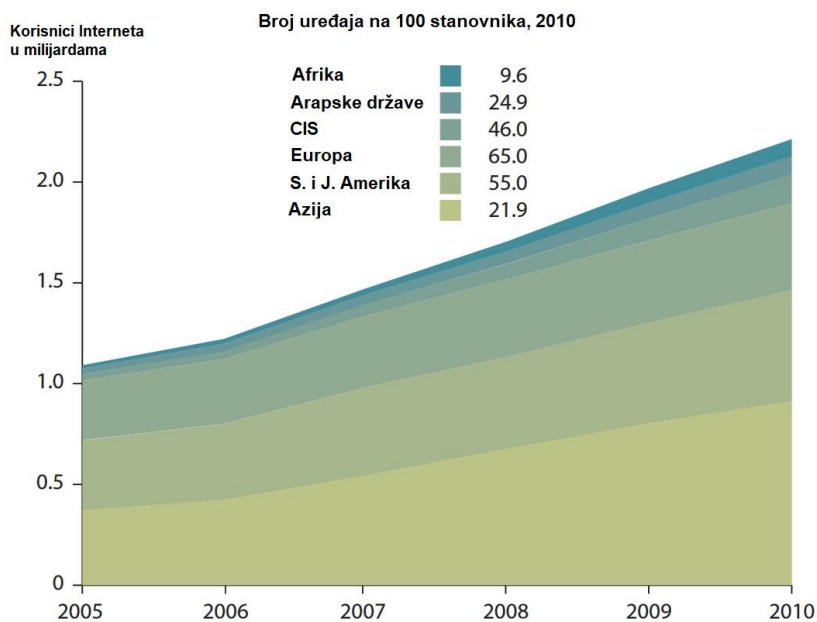
Mobilne mreže i tehnologije koje se u njima primjenjuju, standardno se raspoređuju po generacijama. Prva generacija pojavljuje se ranih 80-ih, bazirala se na analognom prijenosu podataka i budući se radi o samom začetku mobilnih komunikacija nije moguće pričati o objedinjenoj i jedinstvenoj tehnologiji. Razne zemlje ili institucije su razvijale svoje mreže i implementirale tehnologije i protokole koje su smatrali ključnima što je u konačnici rezultiralo mnoštvom tehnoloških rješenja i standarda koji se zajedno mogu smatrati mrežama prve generacije. Najpoznatiji primjeri bili bi NMT (engl. *Nordic Mobile Telephone*) i AMPS (engl. *Advanced Mobile Phone System*).

Nedostatci mreža prve generacije bili su očiti te ih se nastojalo ispraviti u drugoj generaciji. Ključna razlika bila je korištenje digitalnog prijenosa podataka. Taj je pristup omogućio veću sigurnost, bolju pouzdanost, ali i uvođenje novih funkcionalnosti u mrežu poput SMS-a (engl. *Short Message Service*) i MMS-a (engl. *Multimedia Messaging Service*). Jedan veliki dodatak za krajnjeg korisnika bilo je i uvođenje *roaminga*, što je pružilo slobodu korisniku da upotrebljava usluge i u drugim zemljama. I dalje nije moguće govoriti o jedinstvenom standardu i jedinstvenoj tehnologiji, ali se broj različitih mreža smanjio u odnosu na prvu generaciju, te se kao najvažniji primjer, pogotovo u Europi, primjenjivao GSM (engl. *Global System for Mobile Communications*).

Iako je 2G (engl. *2nd generation mobile network*) bio i više nego dostatan za pružanje glasovnih usluga, postepeno se povećavala potražnja za prijenosom sadržaja drugih oblika. Još unutar druge generacije bilo je nekoliko unaprjeđenja koja su nastojala riješiti taj problem kao npr. GRPS (engl. *General Packet Radio Service*) i kasnije EDGE (engl. *Enhanced Data Rates for GSM Evolution*), no uvidjelo se da ipak postoji potreba za razvojem novog sustava kodiranja i znatnim povećanjem brzine prijenosa. Time se dolazi do treće generacije mobilnih mreža. Unatoč želji da se napokon primjeni jedinstvena tehnologija koja bi omogućila bezbrižni *roaming* korisnicima diljem svijeta isto i dalje nije postignuto u trećoj generaciji budući da su se tehnologije uvelike oslanjale na postojeću infrastrukturu druge generacije. Važan standard za područje Europe je UMTS (engl. *Universal Mobile Communications System*).

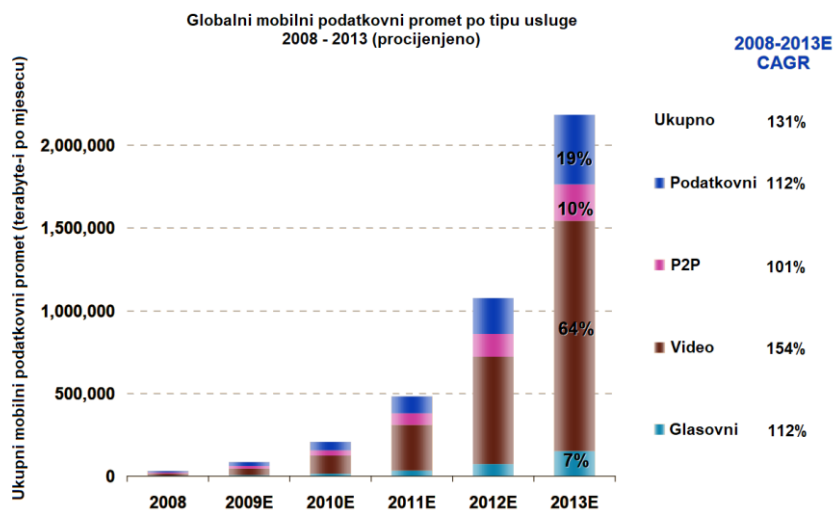
Pokazalo se da količina prometa i broj korisnika nastavlja rasti i da se taj rast ubrzava, te se moralo razmišljati o još većem unaprijeđenu kapaciteta mreže i brzine prijenosa. Slika 2.1 pokazuje kako se samo broj korisnika Interneta udvostručio u razdoblju od 2005. do 2010. godine što je u korelaciji i s povećanjem broja korisnika

MTU-a¹ (mobilni terminalni uređaj), dok slika 2.2. pokazuje pretpostavljene vrijednosti² prijenosa podataka isključivo korištenjem MTU-a.



Slika 2.1: Broj korisnika koji imaju pristup Internetu u svijetu

Izvor: [1]



Slika 2.2: Količina mobilnog prometa u *terabyte*-ima po mjesecu

Izvor: [2]

¹ Korelacija je očita ukoliko se uspoređi sa slikom 2.2.

² Vrijednosti koje su bile pretpostavljene u 2008. godini i koje su u to vrijeme bile pokazatelj potrebe za unaprjeđenjem mobilnog Interneta i infrastrukture na kojoj on počiva.

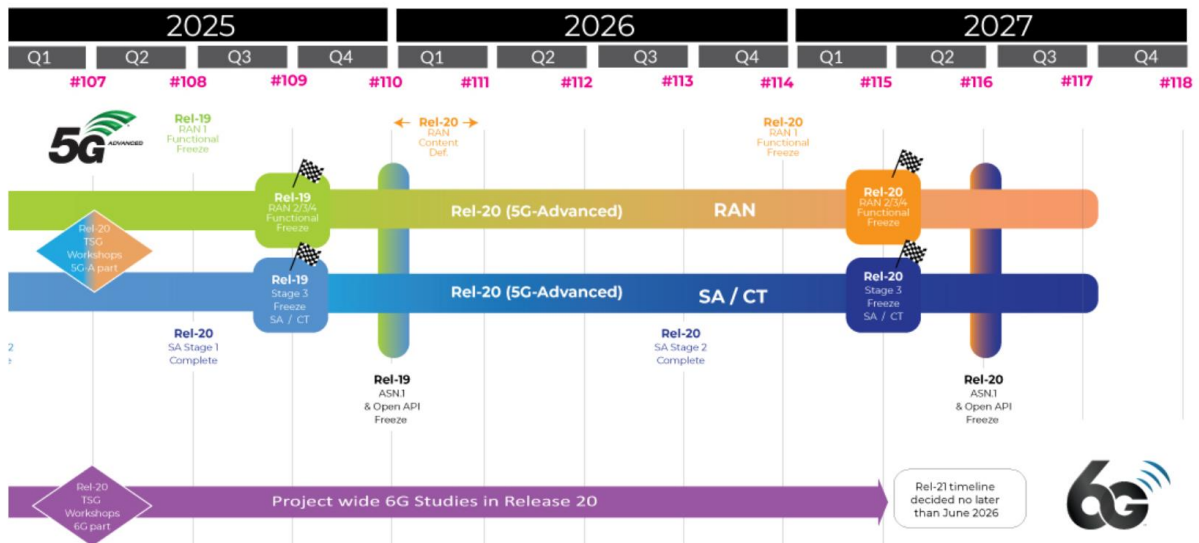
Sve navedeno bio je glavni pokretač razvoja mreža četvrte generacije. Do sada opisano, u ovome poglavlju, ukazuju na važnost standardizacije i usavršavanja. Takav pristup je najlakše ostvariti pomoću dokumenata poput preporuka i standarada, a kako bi takvi dokumenti bili svima dostupni i kako bi se unutar njih obradile teme bitne svim sudionicima na tržištu, postojala je potreba za kreiranjem nekog standardizacijskog tijela. U slučaju mobilnih mreža ne radi se samo o jednom standardizacijskom tijelu nego o više njih. Neka od njih su ETSI (engl. *European Telecommunications Standards Institute*), IETF (engl. *Internet Engineering Task Force*), OMA (engl. *Open Mobile Alliance*) i vjerojatno najvažnije tijelo 3GPP (engl. *Third Generation Partnership Project*). IETF, osnovan 1986, je standardizacijsko tijelo, točnije organizacija za razvoj standarda SDO (engl. *standards development organization*) za sve domene i područja u kojima se primjenjuje Internet [3]. Dokumenti koje IETF objavljuje nisu obvezujući, no to nije spriječilo mnoge industrijske grane da prisvoje te standarde unutar svog poslovanja. Jedna od takvih grana su i pružatelji mobilnih usluga (telekom operatori). Dokumenti koje IETF objavljuje nazivaju se RFC-ovi (engl. *Requests for Comments*³). OMA je standardizacijsko tijelo koje je prepoznalo problematiku kod koje svaki operator posjeduje svoja pravila i načine održavanja sigurnosti, naplate, omogućavanja QoS-a⁴ (engl. *quality of service*), upravljanja sesijama i sl. [4]. Rješenja koja OMA nudi u svim tim područjima je licenciranje svojih rješenja koja su razvijena u suradnji s najvažnijim igračima na području mobilnih mreža.

ETSI je organizacijsko tijelo koje je imalo ključnu ulogu u razvoju GSM mreže početkom 90-ih, te GPRS-a. Do 1998. godine je radilo relativno neovisno, ali je te iste godine došlo do kreiranja, kako je i prethodno rečeno, vjerojatno najvažnijeg standardizacijskog tijela na području mobilnih mreža, a to je 3GPP. Radi se o tijelu koje je skup ostalih standardizacijskih organizacija iz Europe, Japana, Južne Koreje, SAD-a i Kine. Svrha njihovog okupljanja bila je specifikacija mobilnih sustava treće generacije koji bi koristili WCDMA (engl. *Wideband Code Division Multiple Access*) i TD-CDMA (engl. *Time Division/Code Division Multiple Access*) metode u radijskom dijelu mreže i koji bi omogućio evoluciju jezgrenog dijela GSM mreže [4]. Izvorna nakana je bila objavljivanje standardizacijskih dokumenata na godišnjoj razini i tako je započeto s prvim dokumentom *Release 99* koji je objavljen 1999. godine. Svi naredni dokumenti koje 3GPP objavljuje nazivaju se *Release* i zatim neki broj koji već nakon prvog izdanja više nije imao veza sa godinom objavljivanja. Iako su izvorno *Release*-i trebali ići jedan nakon drugoga danas je standard da postoji više aktivnih *Release*-a na kojima se radi istovremeno. U trenutku pisanja ovoga rada najaktualniji je *Release 20* čiji je vremenski plan prikazan na slici 2.3. 3GPP na svojoj Internet stranici objavljuje detalje vezane za početak svakom *Release*-a, sve promjene koje su

³ Iako skraćenica RFC znači *request for comments*, što se prevodi kao zahtjev za komentarima, u pravilu nije nikakav zahtjev, nego samo termin koji se koristi iz povijesnih razloga. RFC je tehnički dokument koji unutar sebe sadrži tehničke specifikacije.

⁴QoS se prevodi kao kvaliteta usluge, odnosno razina kvalitete usluge. Ovisno o tipu usluge koju krajnji korisnik zahtijeva koriste se različiti QoS profili kako bi omogućili adekvatne parametre u pogledu kašnjenja, točnosti isporuke i sl. Cilj je korisniku pružiti uslugu s kojom će biti zadovoljan, dok se istovremeno nastoje sačuvati mrežni resursi za druge korisnike i ne preopteretiti mrežna infrastruktura.

odrađanje tijekom njegovog „životnog vijeka“ kao i datum „zamrzavanja“ (engl. *freeze*), što označava zadnji datum nakon kojega nije moguće više ništa mijenjati na samom dokumentu.



Slika 2.3 Prikaz vremenskih etapa vezanih za *Release 20*, [5]

Dokumenti od interesa za ovaj rad su od *Release 8* nadalje. Sa *Release-om 8* uvodi se pojam LTE i predstavlja se sama arhitektura LTE mreže. Valja napomenuti kako četvrta generacija odnosno 4G, može i ne mora značiti isto što i LTE. U mnogim izvorima moguće je pronaći isključivo naziv LTE, negdje se spominje samo 4G, dok se negdje koristi termin 4G LTE⁵. U pravilu bi se LTE mogao smatrati samo jednom od tehnologija ili korakom unutar četvrte generacije mobilnih mreža gdje bi druga bila npr. LTE Advanced. LTE mreža je podijeljena na dva glavna dijela, a to su radijski, odnosno pristupni dio (engl. *access*) i jezgri (engl. *core*) dio.

2.1. PRISTUPNI DIO MREŽE

Pristupni dio mreže nosi naziv E-UTRAN (engl. *Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network*)⁶. Većinu specifikacije vezano za E-UTRAN moguće je pronaći u 3GPP dokumentu pod referentnim brojem 36.300 [6], dok je za detaljnije specifikacije moguće referencirati dokumente pod brojevima 36.410, 36.101. 36.305 i

⁵ Budući svrha ovog rada nije prezentacija svih detalja pojedinih tehnologija unutar mobilnih mreža četvrte generacije, nego predstaviti postojane elemente i karakteristike koje čine srž same četvrte generacije, oba termina će se koristiti naizmjenice osim ako suprotno ne bude navedeno u nekom od odlomaka.

⁶ Neki izvori daju prijevod *Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network* [6].

dr. E-UTRAN se sastoji od *eNodeB*-a, gdje *e* označava evoluiranu, dok je *NodeB* naziv primopredajnih baznih stanica koji se koristi u mrežama treće generacije. U pravilu osim *eNodeB*-a niti nema drugih elemenata unutar pristupne mreže što je veliko pojednostavljenje u odnosu na prijašnje generacije. Prijašnje generacije su uz bazne stanice imale i upravljačke stanice koje su omogućavale koordinaciju između njih i upravljanje samim baznim stanicama, no u E-UTRAN-u je cijela ta inteligencija preseljena na sam *eNodeB*. Cilj takvog pojednostavljena bila je pokušaj postizanja takozvane ravne arhitekture [6] (engl. *flat architecture*) kako bi se mreža što je više pojednostavila i time postala efikasnija i omogućila brzi prijenos podataka. Za korisnički uređaj se u kontekstu LTE-a koristi kratica UE (engl. *user equipment*). *eNodeB* u pravilu služi za kontrolu zračnog sučelja (engl. *air interface*), dakle brine se za raspoređivanje (engl. *scheduling*), handover (predaja UE-a drugom *eNodeB*-u na posluživanje) i pružanje sigurnosti i zaštite podataka koji se šalju od i prema UE-u.

Neke od specifičnih funkcionalnosti *eNodeB*-a su [6]:

- označavanje paketa transportnog sloja u uzlaznom smjeru (engl. *uplink*)
- usmjeravanje paketa korisničke ravnine prema jezgrenoj mreži
- kompresija IP (engl. *Internet Protocol*) i *Ethernet* zaglavlja, dekompresija podataka u uzlaznom smjeru, kriptiranje podataka namijenjenih korisniku ⁷
- upravljanje radijskim resursima, kontrola radijskog nosioca (engl. *radio bearer*), kontrola mobilnosti konekcije ili sesije, dinamičko pridjeljivanje resursa u ulaznom i silaznom (engl. *downlink*) smjeru
- raspoređivanje i transmisija *paging*⁸ poruka
- raspoređivanje i transmisija *broadcast*⁹ informacija
- prikupljanje i slanje mjerenja radi konfiguracija potrebnih za mobilnost UE-a.

2.2. JEZGRENI DIO MREŽE

Jezgreni dio mreže četvrte generacije se sastoji od samo jedne domene, a to je PS (engl. *packet switched*), dok su prijašnje generacije posjedovale i CS (engl.

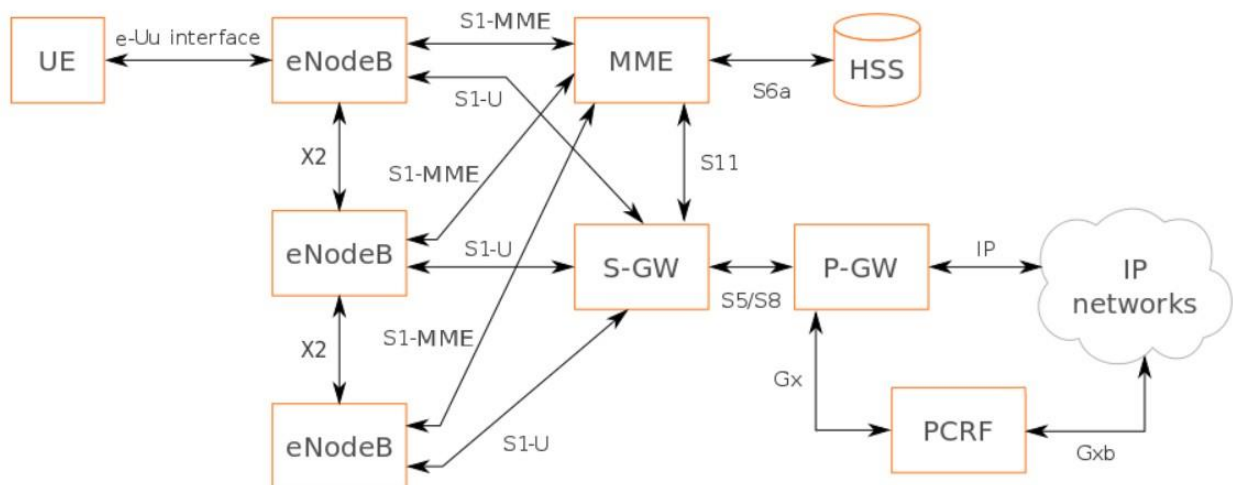
⁷ U literaturi je moguće pronaći termin *user data* koji je moguće drugačije prevesti ovisno o kontekstu. Korisnički podatci je jedan mogući prijevod no on se odnosi na podatke koji na neki način opisuju samog korisnika nekog uređaja ili usluge, dok se prijevod podatci namijenjeni korisniku odnose na podatke koje je korisnik zatražio tako što je koristio nekakvu uslugu, odnosno uspostavio sesiju, npr. gledanje video sadržaja.

⁸ *Paging* poruke su mehanizam uz pomoć kojeg mreža može saznati točnu lokaciju UE-a unutar mreže ukoliko je isti bio neaktivan duže vrijeme, odnosno prešao je iz stanja aktivnosti u stanje pripravnosti.

⁹ *Broadcast* informacije su informacije koje se šalju, odnosno razasilju svim uređajima koji se nalaze unutar dometa pojedinog *eNodeB*-a. Te informacije mogu uključivati identifikacijsku oznaku ćelije, identifikacijsku oznaku skupa ćelija (engl. *cell area*), ali ujedno služi i za mjerenje snage, tako da UE može očitati snagu signala i utvrditi svoju udaljenost od bazne postaje.

circuit switched) i PS domenu. Jezgrena dio mreže nosi ime EPC (engl. *evolved packet core*). On je ustvari glavna okosnica mreža četvrte generacije omogućujući brzi prijenos podataka i neprestanu povezanost. EPC je dizajniran kako bi podržao širok raspon usluga baziranih na IP-u, osiguravajući učinkovit i skalabilan prijenos podataka uz robusnu sigurnost mreže i kvalitetu usluge. Sastoji se od nekoliko ključnih elemenata: entitet za upravljanje mobilnošću MME (engl. *Mobility Management Entity*) koji se bavi signalizacijom i mobilnošću, poslužiteljskog pristupnog čvora SGW (engl. *Serving Gateway*) za usmjeravanje i prosljeđivanje korisničkih podatkovnih paketa, pristupnog čvora prema paketskoj podatkovnoj mreži PDN-GW (engl. *Packet Data Network Gateway*), koji se često dodatno skraćuje kao PGW. PGW omogućava povezivanje s vanjskim mrežama i poslužiteljem vlastitih pretplatnika HSS (engl. *Home Subscriber Server*) čija je uloga pohrana i upravljanje informacijama o pretplatnicima. Po nekim izvorima postoji još jedna komponenta, a to je čvor s funkcijom upravljanja pravilima i naplatom PCRF (engl. *Policy Charging and Rules Function*) koji donosi odluke o kontroli pravila i naplate na temelju podataka o pretplatnicima i uslugama te uvjetima mreže.

Slika 2.4 prikazuje izgled EPC-a sa svim navedenim čvorovima i sučeljima između njih.



Slika 2.4: EPC jezgrena mreža, [7]

Sučelja (engl. *interface*) prikazana na slici 2.4 nisu nužno i postojeće konekcije nego se više radi o logičkim poveznicama između komponenti EPC sustava. S1-MME sučelje još se u široj literaturi naziva i S1-C ili S1-CP gdje CP označava kontrolnu ravninu (engl. *control plane*). Za prijenos informacija se koristi S1AP protokol i spaja eNodeB s MME-om, a zaslužan je za autentifikaciju, *paging* i *handover*. S druge strane

postoji S1-U sučelje koje je drugi dio S1 sučelja i po njemu se prenose podatci korisničke ravnine (engl. *user plane*), odakle i dobiva svoje ime (u literaturi moguće vidjeti i naziv S1-UP). Za prijenos podataka koristi se GTP (engl. *GPRS Tunnelling protocol*), a spaja eNodeB s SGW-om. Omogućava prosljeđivanje podataka namijenjenih korisniku, osiguravajući efikasnu komunikaciju sa što manjim kašnjenjem (engl. *latency*). Sučelje S6a povezuje HSS i MME. Za prijenos se koristi *Diameter* protokol. Uz pomoć njega se odvija autentifikacija korisnika, preuzimanje korisničkog profila i korisničkih podataka koji su MME-u, ali i drugim čvorovima u mreži potrebni. S5/S8 sučelje spaja SGW i PGW i za prijenos se koristi GTP protokol. Ono omogućuje prijenos i tuneliranje podataka namijenjenih korisniku između SGW-a i PGW-a kao i upravljanje tim tunelom (ili tunelima). S5 je dio sučelja koji se koristi dok su i SGW i PGW unutar iste mreže, dok se S8 koristi dok je SGW i PGW u različitim mrežama, što se događa dok je korisnik u *roamingu*. Sučelje Gx povezuje PGW i PCRF, a za prijenos koristi *Diameter* protokol. Svrha mu je da omogući PCRF-u upravljanje kvalitetom usluge kod različitih sesija za pojedinog korisnika, odnosno da odrađuje prioritizaciju prometa koji prolazi preko PGW-a.

Neke od glavnih funkcionalnosti pojedinih čvorova unutar EPC-a dani su u nastavku [8]:

MME (*Mobility Management Entity*):

- upravlja signalizacijom povezanom s mobilnošću i upravljanjem sesijama
- zadužen za autentifikaciju korisnika, aktivaciju i deaktivaciju nosioca i praćenje lokacije UE-a
- upravlja *handover*-ima između eNodeB-ova i između LTE-a i drugih mreža.

SGW (*Serving Gateway*):

- usmjerava i prosljeđuje pakete namijenjene korisniku
- ima ulogu lokalnog sidrišta u pogledu mobilnosti (engl. *local mobility anchor*) kod *handover*-a između eNodeB-ova i između LTE-a i drugih 3GPP tehnologija
- upravlja podacima korisničke ravnine i sučeljima namijenjenih za prijenos podataka u suradnji s PGW-om.

PGW (*Packet Data Network Gateway*):

- povezuje EPC s vanjskim mrežama baziranim na prijenosu paketa, npr. s Internetom
- dodjeljuje IP adrese UE-ima, primjenjuje i provodi politike vezane za QoS
- ima ulogu lokalnog sidrišta u pogledu mobilnosti kod međuoperatorskih i ne 3GPP *handover*-a.

HSS (*Home Subscriber Server*):

- centralna baza podataka koja sadrži informacije vezane za korisnike i pretplate
- podržava upravljanje mobilnošću, uspostavu poziva i sesija, autentifikaciju korisnika i autorizaciju pristupa
- upravlja profilima korisnika i pohranjuje podatke o korisničkoj lokaciji.

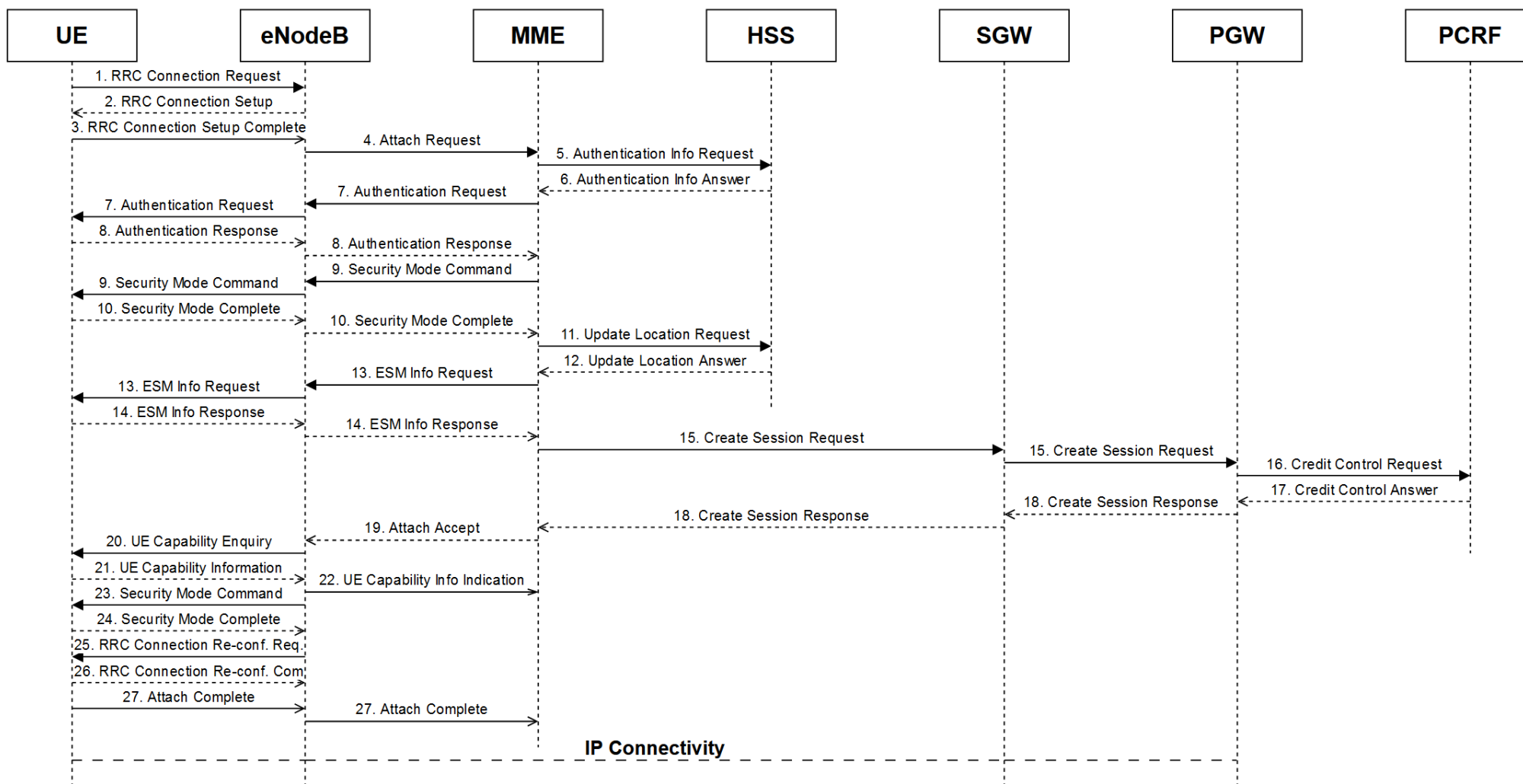
PCRF (*Policy and Charging Rules Function*):

- određuje pravila vezana za politiku (engl. *policy rules*) i upravlja funkcijama kontrole naplate
- osigurava kvalitetu usluge primjenom politika na prijenos podataka i kontrolira resurse dodijeljene pojedinim servisima
- zajedno djeluje s PCEF-om¹⁰ (engl. *Policy and Charging Enforcement Function*) kako bi primijenili politike u stvarnom vremenu.

Kako bi se sve prethodno navedene funkcionalnosti i zadaće bolje predočile i pobliže opisale u narednom potpoglavlju biti će prikazan sekvencijski dijagram povezivanja korisničke opreme na LTE mrežu, te će detaljnije biti opisan svaki pojedini korak, odnosno poruka.

¹⁰ PCEF je funkcionalnost koja se ponekad opisuje kao nezavisna komponenta, ali u većini slučajeva u stvarnosti i po većini izvora literatura radi se o funkcionalnosti koja je sastavni dio PGW-a.

2.3. SEKVENCIJSKI DIJAGRAM POVEZIVANJA UE-A NA LTE MREŽU



Slika 2.5: Sekvencijski dijagram UE povezivanje (engl. *attach*) na LTE mrežu

Na slici 2.5 predočen je detaljan prikaz poruka koje se šalju kroz sustav u trenutku kada korisnik upali svoj MTU i pokuša se spojiti na mobilnu mrežu četvrte generacije. Detalji pojedinih koraka dani su u nastavku:

1. RRC (engl. *Radio Resource Control*) Connection Request je poruka uz pomoć koje UE traži dodjelu resursa i kreiranje RRC konekcije¹¹.
2. RRC *Connection Setup* je poruka koju eNodeB šalje natrag prema UE-u uz parametre koji su potrebni za ispravno postavljanje konekcije, npr. *MAC layer data*.
3. RRC *Connection Setup Complete* je poruka kojom UE potvrđuje eNodeB-u da je signalizacijski radio nosilac uspješno postavljen (engl. *signalling radio bearer*). Dodatno se ovoj poruci dodaje i poruka iz 4. koraka (engl. *piggybacking*).
4. *Attach Request* je poruka koju je UE proslijedio preko RRC *connection setup complete* poruke, a eNodeB tu poruku samo prosljeđuje MME-u. Protokol koji se koristi pri tom prijenosu je S1AP (engl. *S1 Application Protocol*). Svrha ove poruke je prijenos svih relevantnih parametara UE-a prema MME-u kako bi mogao započeti proces registracije. Jedan od njih je *attach type*. Ukoliko je vrijednost tog parametra „EPS/IMSI *attach*“ onda UE želi uspostaviti PS (engl. *packet switched*) i CS (engl. *circuit switched*) vezu. EPS je u ovoj poruci oznaka za PS dok je IMSI oznaka za CS. Važni parametri koji bi MME-u bili važni su GUTI (engl. *Globally Unique Temporary Identifier*) i IMSI (engl. *International Mobile Subscriber Identity*).
5. *Authentication Information Request* je poruka koju MME šalje prema HSS-u kako bi potvrdio da li se radi o ispravnom, postojećem korisniku i ukoliko je tome tako MME dodatno traži i podatke za autentifikaciju.
6. *Authentication Information Answer* je poruka kojom HSS odgovara MME-u i potvrđuje ispravnost (ili neispravnost) korisnika i šalje važne parametre. Za daljnju autentifikaciju UE-a od strane MME-a važni su parametri RAND, XRES, AUTN i KASME (engl. *Key Access Security Management Entries*). U koracima 5. i 6. koristi se *Diameter* protokol.
7. *Authentication Request* je poruka koju MME preko eNodeB-a šalje prema UE. U njoj su sadržani AUTN, RAND i KASME, ali ne i XRES.
8. *Authentication Response* je poruka unutar koje UE šalje RES podatak. UE ima USIM karticu na kojoj se nalaze podatci koje bi samo legitimni operator koji je izdao USIM karticu trebao znati. UE uz pomoć dobivenih parametara i podataka pohranjenih na kartici izračunava RES i AUTN. Ukoliko je AUTN identičan onome kojeg je dobio od strane MME-a to znači da je mreža ispravna i legitiman te ima smisla slati RES podatak prema MME. U protivnome, ukoliko izračunati i poslani AUTN nisu jednaki RES se neće proslijediti prema MME-u. S druge

¹¹ UE je u stanju prepoznati eNodeB-ove zbog *broadcast* informacija koje oni konstantno šalju. UE uz pomoć tih podataka i snage signala koju on mjeri može odabrati optimalnu eNodeB baznu postaju koja mu je najbliža. Dodatno podatci koji se šalju omogućavaju UE-u da razazna bazne postaje koje pripadaju operatoru koji je izdao USIM karticu i zatražiti *attach* na ispravnu mrežu.

strane MME uspoređuje RES podatak kojeg je dobio od UE s XRES kojeg je dobio od HSS-a. Ukoliko su isti, proces se može nastaviti [9].

9. *Security Mode Command* je poruka koju MME preko eNodeB-a šalje prema UE-u s podacima o algoritmu za kriptiranje.
10. *Security Mode Complete* je poruka preko koje UE potvrđuje upotrebu algoritma za kriptiranje.
11. *Update Location Request* je poruka kojom MME potvrđuje da je od sada on zadužen za navedenog korisnika. Prenose se još neki parametri koji su bitni HSS-u.
12. *Update Location Answer* je potvrda HSS-a o unosu podataka koje je proslijedio MME. U koraku 11. i 12. se koristi *Diameter* protokol.
13. *ESM (engl. EPS Session Management) Information Request* je poruka kojom MME zahtijeva od UE-a informacije vezane za sesiju koju se namjerava otvoriti. Podatci poput konfiguracije vezane za sam protokol i najvažnije APN (engl. *access point name*) identifikator.
14. *ESM Information Response* porukom UE preko eNodeB-a vraća tražene informacije MME-u.
15. *Create Session Request* – MME na temelju lokacijskog parametra eNodeB-a odabire SGW i na temelju APN-a kojeg je dobio od UE-a odabire PGW. Ova poruka se zatim šalje prema njima kako bi se mogla započeti nova sesija. SGW poruku obradi i prosljedi prema PGW-u.
16. *Credit Control Request* je poruka uz pomoć koje PGW traži informacije o korisniku od PCRF-a. Informacije poput tarife koju koristi, provjera o kakvoj se vrsti korisnika radi, postoje li posebni uvjeti i slično.
17. *Credit Control Answer* je poruka koja sadrži sve informacije koje je PGW zatražio. U koraku 16. i 17. se koristi *Diameter* protokol. Ova procedura određuje kolika će biti maksimalna brzina prijenosa podataka za traženog korisnika i koji će se QCI (engl. *QoS Class Identifier*) dodijeliti toj sesiji. U pravilu se dodjeljuje QCI između 6 i 9 budući su oni non-GBR (engl. *non guaranteed bit rate*) identifikatori, a osnovni nosilac je baziran na „*best effort*“¹² načinu pružanja usluge.
18. *Create Session Response* – poruka u kojoj PGW dodjeljuje IP adresu, QCI i još nekoliko podataka i vraća ih SGW-u koji ju zatim prosljeđuje prema MME-u.
19. *Attach Accept* – poruka koju MME šalje prema eNodeB-u radi rezervacije resursa. Ova poruka je ujedno namijenjena i UE-u. Zajedno s ovom porukom (*piggybacking*), odnosno unutar nje šalju se još dva zahtjeva: *Initial Context setup Request*, *Activate Default EPS bearer context request*. Ova poruka nije odmah poslana prema UE-u.

¹² *Best effort* je termin koji se koristi u IT industriji i označava način rada u kojem ne postoje garantirani parametri u pogledu brzine prijenosa, vremena dostave, oscilacija u isporučivanju pojedinih paketa i slično. U pravilu, mreža koja primjenjuje *best effort* način rada nastoji u datom trenutku pružiti najbolju moguću uslugu krajnjem korisniku. Ovakav način rada ima smisla jer će većina korisnika radije prihvatiti degradiranu uslugu, nego uopće nemati mogućnost korištenja usluge budući traženi parametri ne mogu biti zadovoljeni.

20. UE *Capability Enquiry* – ovom porukom eNodeB traži sve detalje vezane za sposobnosti UE-a u pogledu protokola i mrežnih tehnologija na koje ima mogućnost spajanja, kako bi se mogao otvoriti osnovni nosilac (engl. *default bearer*) između njih. Neke od tih informacije eNodeB je mogao dobiti od MME-a, no ukoliko nije dobio sve traženo onda eNodeB generira ovu poruku.
21. UE *Capability Information* – UE vraća tražene informacije vezano za sve mrežne tehnologije prema eNodeB-u.
22. UE *Capability Information Indication* – poruka koju eNodeB šalje prema MME-u kako bi ovaj pohranio te podatke. Sljedeći put kada se korisnik želi spojiti, MME može kompletan set podatka poslati eNodeB-u kako ne bi bilo potrebe za novom *UE Capability Enquiry* porukom.
23. *Security Mode Command* – poruka koja je slična onoj u 9. koraku, samo što se ovdje kriptira isključivo radijski dio, a ne cijela komunikacija prema MME-u kako je to bilo u 9. koraku.
24. *Security Mode Complete* – potvrda UE-a prema eNodeB-u o uspješno odrađenoj aktivaciji zaštite.
25. *RRC connection Re-configuration Request* – poruka koju eNodeB šalje prema UE-u kako bi se zauzeli potrebni resursi i otvorio osnovni nosilac. Pridruženo toj poruci su i *Attach Accept* poruka iz 19. koraka zajedno s dvije dodatne poruke: *Initial Context Setup Request* i *Activate Default EPS Bearer Context Request*. To znači da ova poruka u pravilu sadrži i IP adresu UE-a i potvrdu APN-a.
26. *RRC Connection Re-configuration Complete* – poruka kojom UE potvrđuje eNodeB-u da je sva zatražena rekonfiguracija uspješno odrađena.
27. *Attach Complete* – poruka kojom UE potvrđuje da je sve uspješno odrađeno i da je primio sve potrebne podatke. Poruka se šalje MME-u. Unutar poruke je također potvrđen i zahtjev iz 19. koraka i to s potvrdom „*Activate default EPS bearer context accept*“.

Po završetku slanja poruke iz 27. koraka UE ima mogućnost koristiti pristup PDN mreži čiji je APN naveo u poruci iz 14. koraka *ESM Information Request*. U pravilu je to najčešće Internet.

3. IMS PODSUSTAV

3.1. OPIS ARHITEKTURE IMS PODSUSTAVA

Po završetku i objavljivanju *Release*-a 1999 3GPP je počeo raditi na *Release*-u 2000 u kojem je trebala biti specificirana tzv. *All IP* mreža koja je kasnije dobila naziv IMS [4]. No, termin *Release* 2000 se nije dugo zadržao u upotrebi budući se već rano u projektu shvatilo da je vremensko ograničenje od samo jedne godine prekratko za tako zahtjevan pothvat. Većina stvari koju je 3GPP namjeravao izdati u *Release*-u 2000 prebačena je u *Release* 4, dok je specifikacija vezana za IMS prebačena u *Release* 5 [10]. To znači da su prvi dokumenti koji opisuju IMS počeli izlaziti još 2001. godine. Dokument koji je od posebne važnosti je *Stage 2*¹³ dokument unutar kojeg se opisuje arhitektura sustava s apstraktnog gledišta, referentne točke, elementi sustava i njihove glavne funkcionalnosti [10]. To je dokument pod referentnim brojem 23.228. Samo kao pokazatelj koliko je promjena odrađeno od početne zamisli o *All IP* mreži, u *Release*-u 5 iz 2002. godine i zadnje objavljenoj inačici istog dokumenta unutar *Release*-a 18 2024. godine, valja usporediti broj stranica „istog dokumenta“, gdje ETSI TS 123 228 V5.4.1¹⁴ ima 150 stranica, dok ETSI TS 123 228 V18.5.0 ima 392 stranice [11].

IMS predstavlja ključnu arhitekturu unutar modernih telekomunikacijskih mreža, omogućujući integraciju različitih multimedijских usluga putem IP mreže. Kao dio 3GPP standarda, IMS je dizajniran kako bi osigurao interoperabilnost i efikasnost u pružanju glasovnih, video i podatkovnih usluga preko LTE, 3G, DSL-a i ostalih fiksnih širokopoljasnih pristupnih tehnologija, zbog čega se pokazao kao svestrano rješenje za suvremene komunikacijske potrebe. Valja napomenuti da iako će glavni fokus u ovom radu biti vezan za glasovnu funkcionalnost IMS-a, sama mreža nije zamišljena isključivo za to, ali isto tako se kod većine telekomunikacijskih operatora koristi isključivo za pružanje glasovnih usluga putem IP protokola, odnosno za prijenos glasa putem mreže s komutacijom paketa. Ovo pogotovo vrijedi kod operatora koji posluju na području Republike Hrvatske.

¹³ Podjela projekta u razine, pogotovo vezano za dokumentaciju koja se izdaje je nešto što je 3GPP odlučio koristiti od samog početka svoga rada. 3GPP ima podjelu na tri razine, tj. na tri *stage*-a. Stage 1 su dokumenti veoma visoke razine u pogledu specifikacija i funkcionalnosti sustava. U njemu se definiraju osnovni zahtjevi i ciljevi, kao i općeniti koncept kojeg treba implementirati. Više su orijentirani na korisničke potrebe i poslovne ciljeve. Stage 2 je faza gdje se izdaju dokumenti s jačim fokusom na detaljniju specifikaciju i arhitekturu sustava. Definira se kako se funkcionalnosti iz Stagea 1 implementiraju, što uključuje sučelja, protokole i sl. Ovo su više tehnički orijentirani dokumenti i pružaju dublji uvid kako će sustav raditi. Stage 3 dokumenti sadrže konačne tehničke specifikacije i detalje implementacije, odnosno bave se direktnim aspektima razvoja i implementacije sustava, uključujući standarde, protokole i procedure na sučeljima i sl. Oni su ključni za razvoj softvera koji će se koristiti.

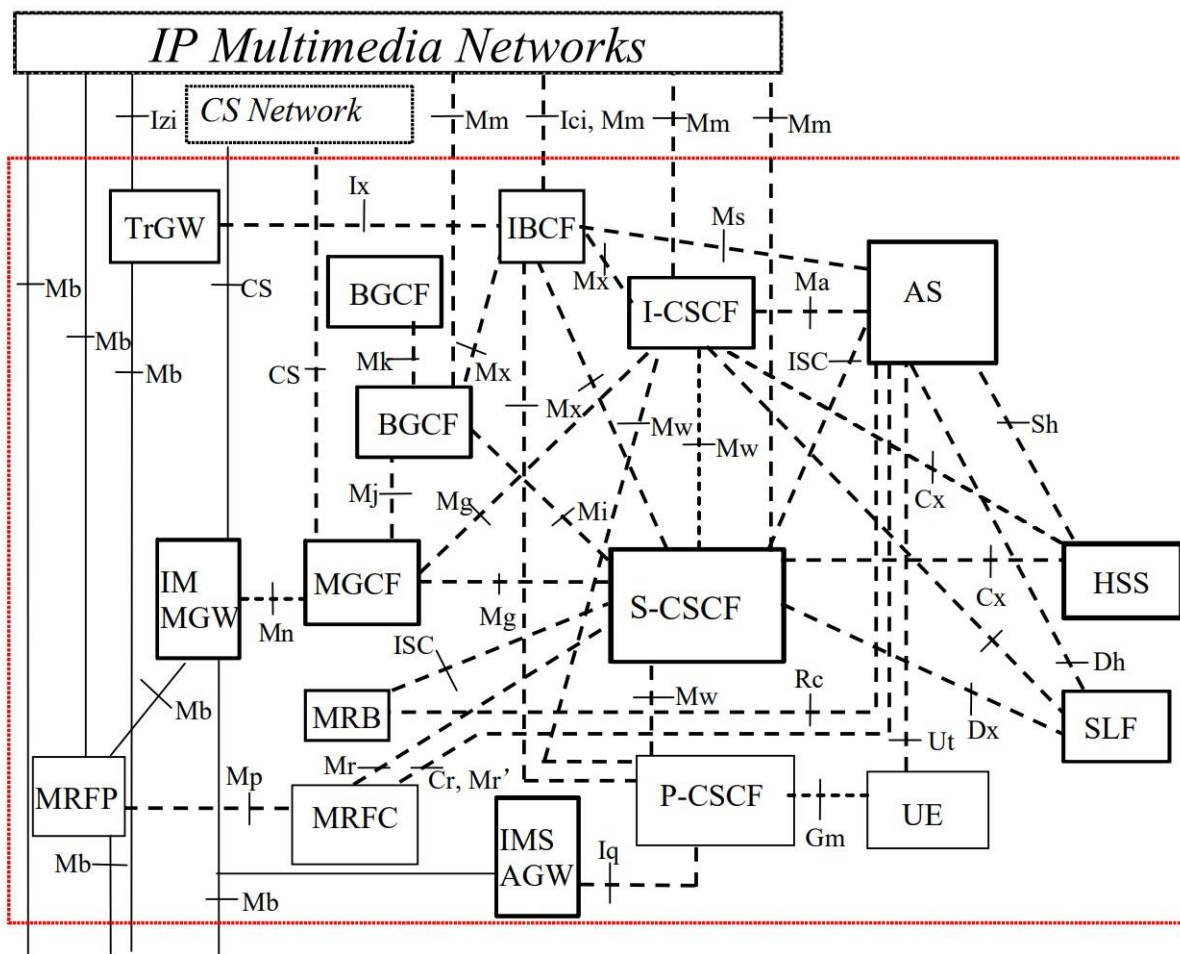
¹⁴ V5.4.1 je najstarija verzija dokumenta koja je dostupna na 3GPP mrežnim stranicama i izdana je u travnju 2002. godine.

IMS u svojim začetcima nije doživio naklonost telekom operatora budući su smatrali da se radi o veoma složenom i skupom sustavu koji u pravilu nastoji riješiti problem koji ne postoji. Mobilni Internet je bio u svojim začetcima, a glasovni promet se uspješno i pouzdano prosljeđivao putem mreža s komutacijom kanala. No eksponencijalni rast podatkovnog prometa i odluka o uvođenju LTE tehnologije koja je trebala biti *All IP* mreža koja u svojoj jezgri nije imala CS domenu doveo je do problema. LTE se morao oslanjati na mreže starijih generacija kako bi uspješno omogućio glasovne usluge. Rješenje je bilo uvođenje IMS-a koji je također *All IP* mreža. Neki su operatori već imali postojeći IMS sustav kada su odlučili „paketizirati“ glas u fiksnoj telefoniji, tako da je u tom slučaju adaptacija i povezivanje IMS-a s LTE-om bio očiti korak.

Slika 3.1 pokazuje cjelokupnu arhitekturu IMS sustava prema 3GPP standardu unutar *Release-a* 18. Vidljivo je da se radi o podosta složenom konceptu s mnoštvom međusobno povezanih elemenata i još više sučelja i referentnih točaka koje ih povezuju. Detaljan opis istih, njihovo međudjelovanje i navođenje svih protokola koji se koriste pri njihovoj interakciji prelazi okvire ovog rada. Stoga će se u nastavku dati samo općeniti opis najvažnijih elemenata, s naglaskom na elementima koji se koriste pri uspostavi sesije za prijenos glasovnog prometa.

Elementi IMS-a su segmentirani u 5 različitih kategorija [12]:

- elementi zaduženi za usmjeravanje i upravljanje sesijama
- elementi zaduženi za usluge (engl. *services*)
- elementi zaduženi za međusobno povezivanje (engl. *interworking*)
- elementi zaduženi za pomoćne funkcionalnosti (engl. *support functions*)
- elementi zaduženi za naplatu.



Slika 3.1: Izgled IMS jezgrene strukture unutar *Release-a 18*, [11]

Prvu skupinu čine 4 elementa, koji nose zajednički naziv Call Session Control Function (CSCF), odnosno 4 elementa za kontrolu poziva. Proxy CSCF (P-CSCF), Serving CSCF (S-CSCF), Interrogating CSCF (I-CSCF) i Emergency CSCF (E-CSCF). P-CSCF je prva kontaktna točka za korisnike, točnije za UE, odnosno za SIP (engl. *Session Initiation Protocol*) signalizaciju koje je od UE-a došla preko druge mreže u IMS. Slično tome, sav dolazni SIP signalizacijski promet bit će poslan od P-CSCFa prema UE. Ima pet glavnih zadataka: kompresija SIP, IPsec sigurnosna asocijacija, interakcija s PCRF-om, kontrola NAT-a (engl. *Network address translation*) i detekcija hitnih sesija. S-CSCF je središnja točka IMS-a budući je odgovoran za rukovanje procesima registracije, donošenje odluke o usmjeravanju, održavanje stanja sesije i preuzimanje i pohranjivanje korisničkih profila (u interakciji s HSS-om). I-CSCF je kontaktna točka unutar mreže davatelja usluge za sve veze namijenjene pretplatnicima te mreže. Njegovi zadatci su: dobivanje imena sljedećeg elementa prema kome se mora proslijediti poruka (podatke dobiva iz HSS-a), dodjela S-CSCF-a na temelju primljenih informacija iz HSS-a, te usmjeravanje dolaznih zahtjeva prema sljedećem elementu. Uloga E-CSCF-a je rukovanje hitnim zahtjevima prema IMS-u

poput poziva prema policiji, vatrogascima i hitnoj pomoći. Glavni zadatak E-CSCF-a je odabir centra (centrale) za hitne službe. Odabir se obično temelji na lokaciji pozivatelja i vrsti hitnog slučaja.

Drugu skupinu čine 4 elementa, to su: MRFC (engl. *Multimedia Resource Function Controller*), MRFP (engl. *Multimedia Resource Function Processor*), MRB (engl. *Multimedia Resource Broker*), AS (engl. *Application Server*). U pravilu AS nije dio jezgre mreže IMS-a, nego element na njegovom rubu (engl. *edge element*), no većina autora, što uključuje i 3GPP dokumente, AS predstavlja kao dio IMS-a. AS omogućava fleksibilnost i inovacije u pružanju usluga unutar IMS-a, te omogućava operaterima da nude raznovrsne i prilagodljive usluge. U pravilu se u jednoj mreži može nalaziti više različitih AS-ova koji će svaki pružati neku drugu multimedijску uslugu. Najpoznatiji i najčešće korišten AS je TAS (engl. *Telephony Application Server*) koji omogućava dodatne usluge (engl. *Supplementary Services*) i usluge dodane vrijednosti (engl. *value added services*, VAS). MRFC i MRFP zajedno pružaju mehanizme za usluge vezane s nosiocem (engl. *bearer-related services*) kao što su konferencijski razgovori i obavijesti korisniku. MRB dodjeljuje i kasnije oslobađa specifične odgovarajuće MRF resurse za pozive kada ih adresira S-CSCF ili AS.

Bitni elementi u ostale 3 skupine su: BGCF (engl. *Breakout Gateway Control Function*), MGCF (engl. *Media Gateway Control Function*), IMS-MGW (engl. *IMS Media Gateway*). BGCF je odgovoran za usmjeravanje poziva koji izlaze iz IMS mreže i idu prema PSTN (engl. *Public Switched Telephone Network*) mreži ili prema drugim mrežama. Njegova je uloga odabir optimalnog puta kao i upravljanje signalizacijom i kontrolom takvog poziva. MGCF služi kao poveznica između IMS-a i PSTN-a. On upravlja medijskim tokovima i signalizacijom između različitih mreža, te omogućava konverziju između različitih formata i protokola. IMS-MGW se bavi obradom medijskih tokova i prijenosom medijskih podataka (audio, video itd.).

Pojedini koraci prezentirani na slici 3.2 opisani su u nastavku ovog potpoglavlja. Valja napomenuti kako prikaz na dijagramu opisuje jednostavan poziv, odnosno poziv postpaid korisnika, gdje nije potrebno brinuti o naplati i provjeri stanja računa prije uspostave samog poziva. Dodatno zbog jednostavnosti prikaza izostavljeni su elementi poput eNodeB-a i SGW-a iako sudjeluju u mnogo koraka unutar prikaza. Dodatno, pretpostavljeno je da je UE već odradio povezivanje na LTE mrežu kako je opisano u potpoglavlju 2.3:

1. *SIP Register* – UE daje do znanja mreži da želi odraditi IMS registraciju. Koraci poput slanja od UE prema eNodeB, zatim od eNodeB prema SGW i od SGW prema PGW nisu prikazani radi jednostavnosti dijagrama. P-CSCF prima poruku, radi promjene na IP adresi i prosljeđuje poruku prema I-CSCF-u.
2. *User Authorization Request* – I-CSCF šalje ovaj upit prema HSS-u kako bi mu proslijedio adrese S-CSCF-a.
3. *User Authorization Answer* – HSS odgovora na I-CSCF-ov upit s adresama S-CSCF-ova. UAR/UAA služi za autorizaciju korisnika i potvrdu ima li pravo pristupa.
4. *SIP Register* – I-CSCF odabire S-CSCF iz popisa koji je HSS poslao i prosljeđuje registracijski upit.
5. *Multimedia Authentication Request* – S-CSCF šalje podatke o korisniku prema HSS-u.
6. *Multimedia Authentication Request* – HSS uzvraća odgovor s podacima: *random number* (RAND), *Authentication Token* (AUT), izračunati rezultat (XRES), ključ za kriptiranje (CK) i ključ za potvrdu integriteta (IK). MAR/MAA služi za autentifikaciju korisnika, budući će samo legitimni korisnik znati podatke koje je HSS proslijedio S-CSCF-u.
7. 401: *Unauthorized* – S-CSCF korisniku vraća potrebne podatke s kojima će uspješno riješiti autentifikacijski „zadatak“, RAND, AUTN, CK i IK. CK i IK se spremaju u P-CSCF-u te on uz pomoć njih otvara IPsec tunel kako bi se komunikacija kriptirala.
8. *SIP Register* – korisnik generira odgovor za „zadatak“ uz pomoć RAND i AUTN podataka, te rješenje upisuje u RES zaglavlje. Sada je poruka zaštićena u IPsec tunelu dok putuje prema P-CSCF-u. Na kraju P-CSCF prosljeđuje poruku prema S-CSCF-u.
9. *Server Assignment Request* – S-CSCF od HSS-a traži dodatne informacije o korisniku, npr. provjera postoje li već aktivne sesije i ako da, prema kojem SIP serveru i sl.
10. *Server Assignment Answer* – HSS odgovara s traženim podacima. S-CSCF provjerava podatke od HSS-a, te odrađuje usporedbu XRES rješenja s RES rješenjem koje je dobio od korisnika.
11. 200: OK – ukoliko su RES i XRES jednaki S-CSCF potvrđuje da se radi o legitimnom korisniku. Time se korisnik uspješno registrira na IMS.
12. *SIP Register* – S-CSCF prosljeđuje SIP Register poruku kako bi obavijestio TAS da se korisnik registrirao.

13. 200: OK – TAS potvrđuje da je primio poruku i ažurirao stanje korisnika.
14. SIP *Invite* – poruka kojom A strana traži kreiranje glasovne sesije i početak poziva. Radi jednostavnosti prikaza su sva prosljeđivanja između raznih elemenata označena istim brojem. Razlika je promjena nekih zaglavlja u svakom koraku. Jedno zaglavlje koje se uvijek mijenja je *Via*¹⁵ zaglavlje, koje opisuje preko kojeg je čvora poruka prešla. Ova poruka ima i SDP (engl. *Session Description Protocol*) dio u kojem su dane sve potrebne informacije vezano za kodeke koje A strana podržava.
15. 100: *Trying* – poruka kojom sljedeći čvor u nizu javlja prethodnom da je primio poruku.
16. 183: *Session In Progress* – poruka koju B strana šalje A strani, s kojom potvrđuje da postoje preduvjeti za primanje poziva, no da još nisu rezervirani svi resursi. Ova poruka također ima SDP dio u kojem su navedeni svi parametri potrebni za sesiju uključujući podržane kodeke. Poruka ide od S-CSCF-a prema P-CSCF-u gdje se zaustavlja.
17. *Authentication and Authorization Request* – poruka kojom P-CSCF započinje proces rezerviranja resursa i podizanja dedicanog nosioca za glasovni poziv s QCI vrijednosti 1 koja što znači da je najvišeg prioriteta.
18. *Re-Authorization Request* – PCRF prosljeđuje zahtjev prema PGW-u s detaljima potrebnim za kreiranje sesije.
19. *Re-Authorization Answer* – PGW kreira dedicerani nosilac između sebe, SGW-a, eNodeB-a i UE-a, te kao potvrdu o uspješno kreiranom nosiocu vraća ovu poruku.
20. *Authentication and Authorization Answer* – PCRF potvrđuje P-CSCF-u da je dedicerani nosilac kreiran.
21. 183: *Session In Progress* – P-CSCF prosljeđuje poruku do kraja mreže
22. PRACK, UPDATE, 200:OK – radi jednostavnijeg prikaza nekoliko je poruka prikazano jednom, PRACK (engl. *Provisional Response Acknowledgment*), je potvrda primitka 183: *Session In Progress* poruke, na koju B strana odgovara s 200:OK, dok je UPDATE poruka s kojom se može konačno potvrditi kodek koji će se koristiti, kao i poslati potvrda da je rezervacija resursa uspješno odrađena. Također se na tu poruku odgovara s 200: OK.
23. 180: *Ringling* – B strana šalje ovu poruku prema A strani koja se propagira kroz sve elemente. Poruka potvrđuje da je UE na B strani počeo zvoniti.
24. 200: OK (INVITE) – poruka koju šalje B strana kada se prihvati poziv, kada se korisnik javi.
25. *Acknowledgment* – po primitku 200: OK (INVITE), A strana generira ACK poruku i šalje je prema B strani. Time je glasovna sesija uspješno ostvarena i A i B strana mogu komunicirati.

¹⁵ *Via* zaglavlje je zaglavlje koje se dodaje nakon svakog skoka (engl. *hop*). Skup *Via* zaglavlja definira putanju koju povratna poruka, odnosno potvrda treba proći.

4. MOBILNE MREŽE PETE GENERACIJE

Mobilne mreže pete generacije, odnosno 5G, predstavljaju značajan iskorak u evoluciji mobilnih komunikacija, obećavajući revoluciju u načinima povezivanja i komunikacije s okolinom. 5G nudi, do sada, neviđene brzine, smanjenje kašnjenja (engl. *latency*) i povećanje kapaciteta, omogućava novu eru inovacija u raznim granama industrije. Od autonomnih vozila i pametnih gradova, do poboljšanja u doživljaju i prikazu virtualne stvarnosti i Interneta stvari (IoT, engl. *Internet of Things*), 5G je spreman transformirati svakodnevni život i potaknuti gospodarski rast. Nova generacija mobilnih mreža ne samo da poboljšava ograničenja svojih prethodnika, već također postavlja temelje za buduće napretke, otvarajući put za povezanije, učinkovitije i tehnološki naprednije društvo.

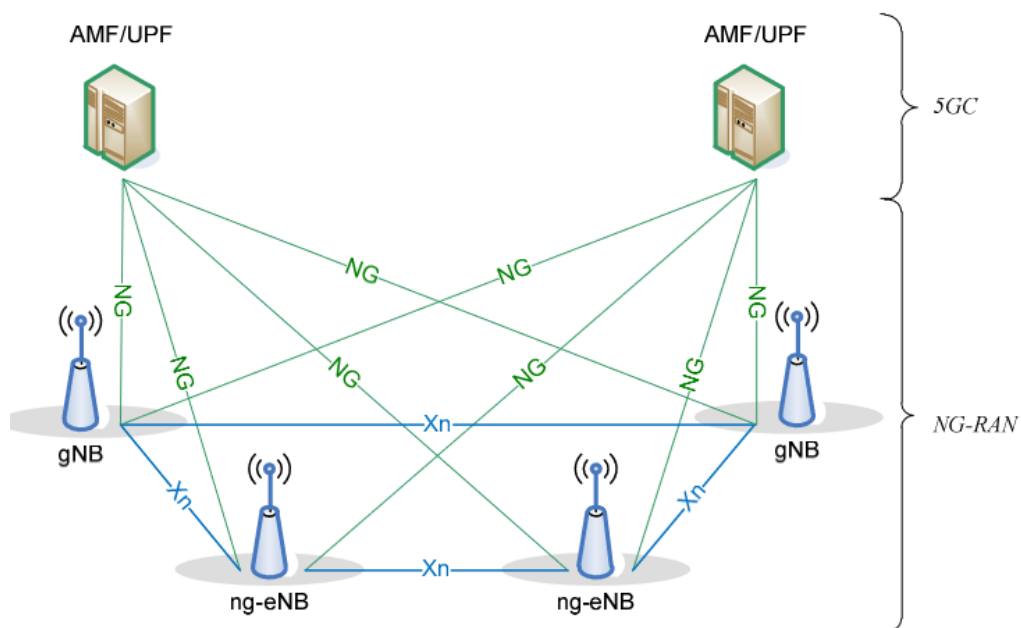
Kao i kod prethodnih generacija glavnu zadaću u pogledu standardizacije preuzeo je 3GPP. Prvi dokumenti koji spominju 5G pojavili su se unutar *Release-a* 15, dok su najnoviji dokumenti dio *Release-a* 19. Jedan od najvažnijih dokumenata je *stage 2* dokument pod referentnim brojem 23.501 [13]. Dokument se pretežito bavi općenitom arhitekturom 5G sustava, odnosno 5GS-om (engl. *5G system*). Koliko je pažnje pridijeljeno usavršavanju 5GS-a, te koliko je promjena doneseno tijekom vremena razvoja, vidljivo je usporedbom istog dokumenta koji je izdan unutar *Release-a* 15 u 6. mjesecu 2018. god. koji broji 219 stranica i dokumenta izdanog unutar *Release-a* 19 u 7. mjesecu 2024. godine koji ima čak 718 stranica [13].

5GS je naziv za cjelokupnu mrežu, koja se dalje može raščlaniti na dva dijela, a to su jezgrena mreža 5GC (engl. *5G Core*) i pristupna mreža 5G-AN (engl. *5G Access Network*).

4.1. 5G PRISTUPNA MREŽA

Tematikom vezanom za pristupnu mrežu pete generacije bavi se 3GPP dokument pod referentnim brojem 38.300 [14]. Specifičnost u odnosu na starije generacije je mogućnost pristupa mreži uz pomoć 3GPP i *non-3GPP* tehnologija, tako da se cjelokupni termin 5G-AN odnosi na oba pristupa.

Važniji pristup je onaj koji je specificiran od strane 3GPP-a, a to je upotrebom NG-RAN (engl. *Next generation Radio Access Network*) radijske pristupne mreže i upotrebom NR (engl. *New Radio*) radio pristupne tehnologije. NG-RAN se sastoji od nekoliko važnih elemenata (slika 4.1) i funkcija koje zajedno omogućuju brzu, pouzdanu i efikasnu bežičnu komunikaciju.



Slika 4.1: NG-RAN arhitektura, [14]

Najvažniji element je gNB (engl. *next generation NodeB*), koji je u stvari nova bazna postaja osmišljena za 5G mrežu. Na slici 4.1 prikazan je i ng-eNB (engl. *next generation eNodeB*). Postoji i treći element NG-RAN-a, a to je UE, odnosno terminalni uređaj koji omogućava korisniku ili računalu povezivanje na 5G mrežu. gNB omogućava povezivanje UE-a na 5G mrežu putem NR-a, dok ng-eNB omogućava isto, ali putem E-UTRA¹⁶ (engl. *Evolved Universal Terrestrial Radio Access*).

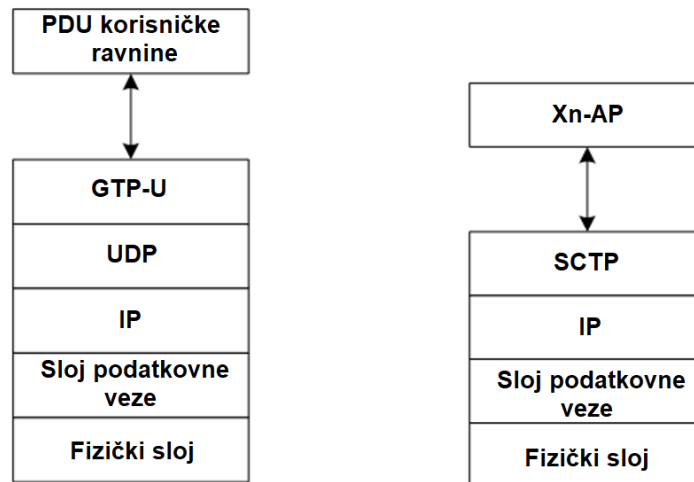
Neke od njihovih glavnih zadataka su [14]:

- upravljanje sesijom
- uspostava i oslobađanje konekcije
- usmjeravanje informacija korisničke i kontrolne ravnine
- raspoređivanje i prijenos *paging* poruka
- raspoređivanje i prijenos *broadcast* informacija
- omogućavanje uske suradnje između NR i E-UTRA
- podjela i dijeljenje radijskog pristupa
- upravljanje QoS tokom i mapiranje podatkovnih radio nosioca (engl. *data radio bearer*)
- označavanje paketa transportnog sloja u uzlaznom smjeru (engl. *uplink*).

gNB i ng-eNB su međusobno povezane uz pomoć Xn sučelja, te su oboje povezani i prema 5GC-u uz pomoć NG sučelja. Obje bazne postaje pružaju povezivost i na

¹⁶ E-UTRA je zračno sučelje upotrebljavano u LTE mreži.

korisničkoj i na kontrolnoj ravnini. Protokolni složaj Xn sučelja prikazan je na slici 4.2, te je razdijeljen po ravninama.



Slika 4.2: Xn protokolni složaj po korisničkoj (lijevo) i kontrolnoj (desno) ravnini

Izvor: [15]

Generalni principi u pogledu specifikacije Xn sučelja su [15]:

- Xn sučelje je otvorenog tipa.
- Sučelje podržava razmjenu signalizacijskih informacija između dva NG-RAN čvora i omogućava prosljeđivanje PDU-ova (engl. *packet data unit*) do završnih točaka tunela¹⁷.
- S logičkog gledišta Xn je point-to-point sučelje između dva NG-RAN čvora, koje bi trebalo biti ostvarivo čak i u slučaju kada direktna fizička konekcija između ta dva čvora ne postoji.

4.2. 5G JEZGRENA MREŽA

Izrada standarda za jezgrenu mrežu pete generacije bazirala se na četiri koncepta koji su postali sastavni dio 5G mreže. Prvi od njih je razdvajanje kontrolne i korisničke ravnine, CUPS (engl. *Control and User Plane Separation*). Razvoj je počeo unutar Release-a 14 [16], budući je 3GPP nastojao implementirati koncept CUPS-a i unutar 4G mreže, no tek u 5G mreži dolazi do njegove potpune implementacije. Bilo

¹⁷ Tunel je pojam koji se koristi za putanju koja je definirana i rezervirana od strane nadzornih i upravljačkih čvorova u mreži, te služi za komunikaciju isključivo između čvorova koji se nalaze na krajevima (engl. *endpoint*) tog tunela.

koji mrežni element koji izvršava neku funkciju na kontrolnoj ravnini ne bi smjeo izvršavati neku funkciju na korisničkoj ravnini. Dakle kod primjene CUPS koncepta određeni mrežni element može raditi ili kao element kontrolne ravnine ili kao element korisničke ravnine. U LTE mreži to nije bio slučaj, npr. iz opisa PGW elementa iz 2. poglavlja jasno je vidljivo kako je on obnašao funkcionalnosti vezano i za korisničku i za kontrolnu ravninu. Na kontrolnoj ravnini imao je zadatak dodjeljivati IP adrese UE-u, dok je recimo na korisničkoj ravnini imao zadatak prosljeđivati podatkovne pakete prema nekoj drugoj podatkovnoj mreži. Osim PGW-a u LTE mreži je postojalo više elemenata koji su imali dvojak u ulogu, izvršavajući funkcije na obje ravnine, te se može reći kako LTE mreža ne zadovoljava uvjete CUPS koncepta. Isto tako može se promatrati i IMS sustav opisan u 3. poglavlju, pri čemu se dolazi do istog zaključka, IMS ne radi u skladu s CUPS konceptom. No buduća 5G mreža implementira CUPS koncept što znači da su ove dvije ravnine u potpunosti razdvojene. Ideja je možda jasna, no kakvi su pravi benefiti ovakvog načina segregacije elemenata. Glavni benefit se očituje u smanjenju kašnjenja (engl. *latency*). Ukoliko su korisnička i kontrolna ravnina odvojene, onda ujedno mogu biti i locirane na različitim mjestima. Tako je npr. moguće kontrolnu ravninu smjestiti na neko centralno mjesto (gledano geografski na području države, grada, pokrajine...), dok se korisnička ravnina može pozicionirati mnogo bliže aplikaciji ili funkcionalnosti koju podržava. Ovakvom raspodjelom omogućava se prijenos sadržaja namijenjenog korisniku s puno manjim kašnjenjem jer se elementi koji sudjeluju u njegovom prijenosu nalaze bliže krajnjem korisniku, te nema potrebe prenositi sadržaj do centralnog čvorišta.

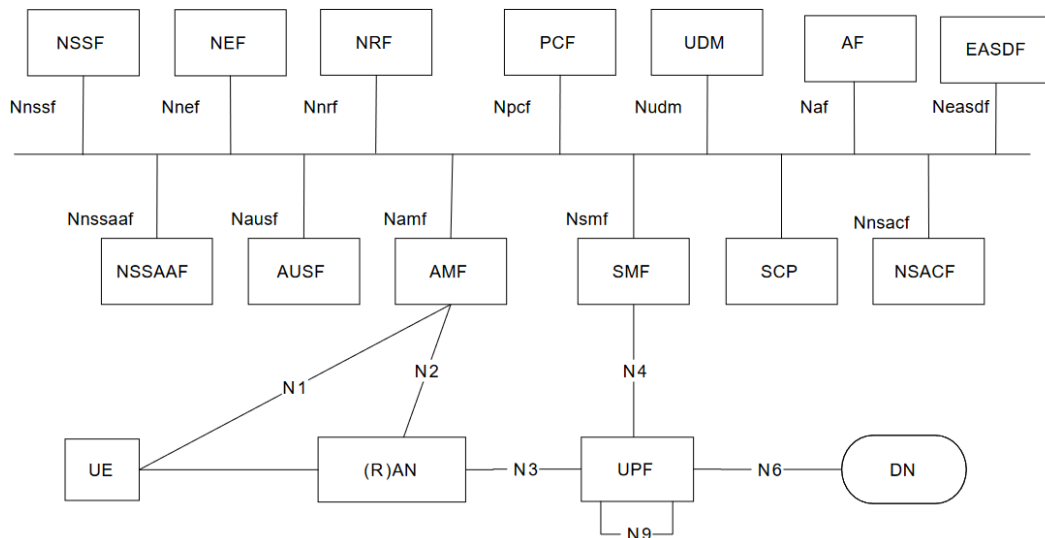
Drugi koncept na kojem je bazirana 5G mreža je podrška za *stateless* mrežne funkcije, odnosno *stateless* NF (engl. *network function*). *Stateless* mrežne funkcije ne pohranjuju informacije o stanju sesije ili konekcije između različitih zahtjeva ili transakcija. Svaki zahtjev se tretira kao neovisan i nepovezan s prethodnim zahtjevima. Suprotan pojam od *stateless* je *stateful*. *Stateful* mrežne funkcije pohranjuju informacije o stanju sesije ili konekcije. Prednost *stateless* NF-a je njihova otpornost u slučaju prekida usluge ili rada samog NF-a, usluga se može nastaviti na drugom NF-u koji obavlja istu funkciju ili pruža istu uslugu kao da se ništa nije dogodilo. Na primjer, ako postoji čvor X koji upravlja sesijama i njihovim stanjem i postoji čvor Y koji procesira podatke. Pretpostavi li se da čvor X ima podatke o 2 UE-a. Svaki od ta dva UE-a ima aktivne sesije što je zabilježeno na istom čvoru X, ali podatci pojedinog UE-a se procesiraju na različitim čvorovima Y. Ukoliko čvor Y koji procesira podatke UE-a 2 prestane raditi, to neće biti problem i kontekst (engl. *context*) o do tada obrađenim podacima se neće izgubiti budući čvor X ima te podatke. U ovom slučaju se zadatak procesiranja podataka UE-a 2 jednostavno prebaci na prvi (trenutno aktivni) čvor Y i procesiranje se nastavlja kao da do prekida nije ni došlo. U pravilu oba čvora Y imaju mogućnost pristupiti kontekstu za oba UE-a, iako im za procesiranje trebaju podatci samo jednog UE-a, onoga čije podatke trenutno procesiraju. Glavne prednosti *stateless* NF-a su skalabilnost, lako se skaliraju jer ne moraju pratiti stanje sesija ili korisnika, niti ima potrebe za sinkronizacijom stanja između različitih instanci, te jednostavnost upotrebe jer nema potrebe za upravljanjem stanjem. Nova NF instanca

se može, po stvaranju, odmah i upogoniti, te se promet može odmah usmjeriti prema njoj, što znatno pomaže kod balansiranja opterećenja (engl. *load balancing*).

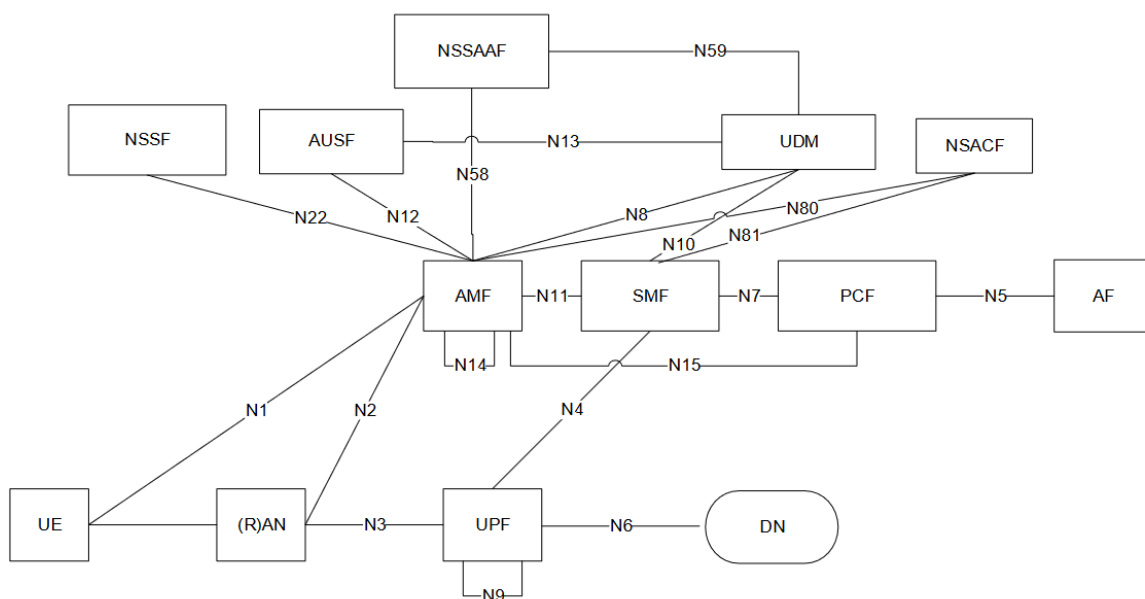
Treći koncept je prethodno već spomenut, u potpoglavlju 4.1, a to je mogućnost korištenja 3GPP i non-3GPP pristupnih mreža za pristupanje jezgrenoj mreži pete generacije. 3GPP pristupne mreže su GSM, GPRS, WCDMA, HSPA, LTE i NR. Non-3GPP pristupne mreže su npr. WiFi, WiMAX, fiksne širokopojasne pristupne mreže poput xDSL (engl. *Digital Subscriber Line*) ili GPON (engl. *Gigabit Passive Optical Network*). Non-3GPP pristupne mreže je moguće dalje raščlaniti na mreže s „povjerenjem“, odnosno *trusted* i mreže „bez povjerenja“, odnosno *untrusted*. *Trusted* pristupne mreže su najčešće WiFi *hotspot*-ovi¹⁸ koje telekom operator sam postavlja i njima upravlja, a često su dostupni na veoma prometnim lokacijama poput trgovačkih centara, zračnih luka, autobusnih kolodvora i sl.

Četvrti koncept implementiran u 5G mreži je mogućnost direktne komunikacije između svih NF-ova. U prethodnim generacijama morao je postojati posrednik za mnoge komunikacijske puteve između elemenata, što nije slučaj kod 5G-a. Način na koji se ovo ostvaruje je dizajniranje arhitekture bazirane na uslugama (engl. *service based architecture*). Iako se navodi da je 5G mreža, točnije njezin jezgreni dio dizajniran kao *service based* arhitektura, postoji i drugi način promatranja i prezentacije arhitekture, a to je arhitektura s referentnim točkama (engl. *reference point architecture*). Najbolje objašnjenje 5G mreže bi bilo da se radi o sustavu koji je konstruiran i kao *service based* arhitektura i kao *reference point* arhitektura. *Reference point* arhitektura se bazira na skupu elemenata koji imaju direktno povezana (engl. *point-to-point*) sučelja. Signalizacija, procedure i protokoli su specificirani za svaki pojedini par direktno povezanih sučelja. Loša strana ovakvog pristupa je što uvođenje novog elementa zahtijeva definiranje mnoštva novih sučelja. S druge strane, *service based* arhitektura zamjenjuje skup mrežnih elemenata sa skupom mrežnih funkcija (NF), te svaki NF postaje pružatelj usluge (engl. *service provider*) i svaki NF može istodobno biti i konzument usluge (engl. *service consumer*). Direktno povezana sučelja zamijenjena su sa zajedničkom sabirnicom (engl. *common bus*) koja povezuje sve NF-ove. Pretpostavi li se da NF 1 pruža uslugu A, dok NF 2 pruža uslugu B. Usluga A NF-a 1 je dostupna ne samo NF-u 1, nego i NF-u 2, što nije bilo ostvarivo u *reference based* arhitekturi. Dakle *service based* arhitektura omogućava, odnosno olakšava NF-ovima da pristupe i koriste usluge drugih NF-ova, kao i da ponude i pruže svoje usluge. Obje arhitekture su predstavljene slikama 4.3. i 4.4.

¹⁸ Hotspot je područje ili lokacija gdje je dostupna bežična Internetska veza, Obično se postavlja na javnim mjestima i omogućava korisnicima povezivanje svojih uređaja na Internet putem WiFi mreže.



Slika 4.3: *Service based arhitektura*, [13]



Slika 4.4: *Reference point arhitektura*, [13]

Kratak opis funkcionalnosti mrežnih elemenata, odnosno mrežnih funkcija dan je u nastavku [13]:

- *Access and Mobility Management Function (AMF)* se brine za registraciju, povezivanje, upravljanje mobilnošću i autentifikacijom i autorizacijom pristupa UE-a.

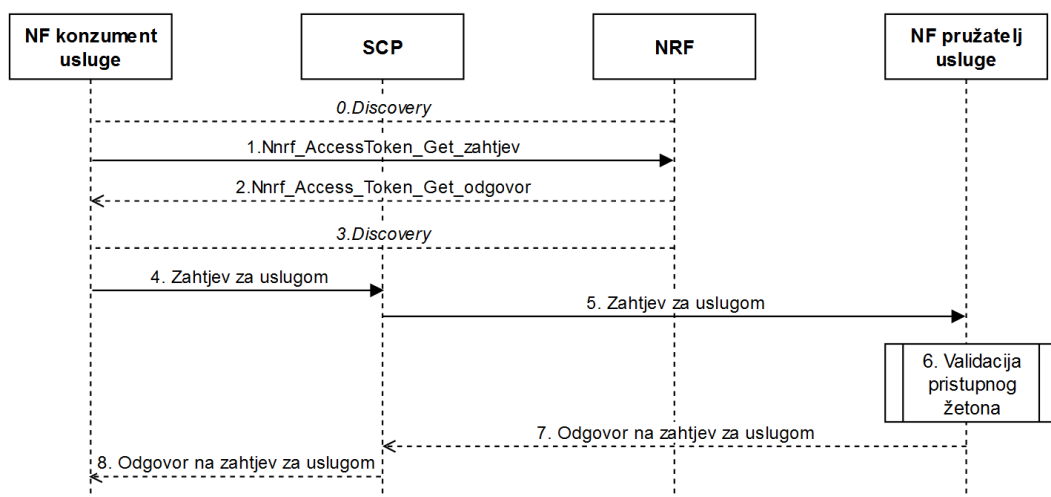
- *Session Management Function* (SMF) – upravlja uspostavljanjem sesija, njihovom modifikacijom i otpuštanjem. Dodatno se brine i za dodjelu IP adresa i za promjenu politika (engl. *policy enforcement*). Manje bitne funkcionalnosti su kompresija zaglavlja i *lawful interception* (LI)¹⁹.
- *User Plane Function* (UPF) – služi kao sidrišna točka na podatkovnoj ravnini, upravlja usmjeravanjem i prosljeđivanjem paketa, te provodi upotrebu kvalitete usluge (QoS), točka pristupa za vanjske podatkovne mreže, te se koristi kod *lawful interception*-a, ali na korisničkoj ravnini.
- *Policy Control Function* (PCF) – provodi politike mrežne sigurnosti, upravlja kvalitetom usluge, donosi odluke o usmjeravanju prometa na osnovu korisničkih podataka i uvjeta u mreži.
- *Network Exposure Function* (NEF) – otkriva i prikazuje mrežne mogućnosti aplikacijama treće strane (engl. *third party*), odnosno vanjskim aplikacijama, time omogućava interakciju vanjskih aplikacija s 5G mrežom. Provodi prijevod, translaciju podataka između vanjskih i unutarnjih informacija.
- *Network Repository Function* (NRF) – održava repozitorij dostupnih NF-ova i njihovih funkcionalnosti i mogućnosti, pomaže drugim NG-ovima kod otkrivanja i odabira mrežnih usluga.
- *Unified Data Management* (UDM) – upravlja pretplatničkim profilima i vjerodajnicama za provjeru autentičnosti, služi kao podrška kontinuitetu usluga i sesija, igra ključnu ulogu kod *lawful interception*-a ukoliko je korisnik u *roamingu*.
- *Authentication Server Function* (AUSF) – pruža autentifikacijske usluge AMF-u, osigurava siguran pristup mreži krajnjim korisnicima, koristi se i kod 3GPP i kod non-3GPP pristupa.
- *Application Function* (AF) – pruža aplikacijske usluge i komunicira s PCF-om radi kontrole politika vezanih za te usluge, omogućava pristup NEF-u, omogućava interakciju između IMS-a i 5GC-a.
- *Network Slice Selection Function* (NSSF) – pomaže u odabiru primjerenog mrežnog *slice*-a obzirom na korisničke podatke i mrežne uvjete.
- *Network Data Analytics Function* (NWDAF) – pruža analitičke podatke vezane za mrežu NF-ovima, poboljšava mrežne performanse i korisničko iskustvo putem uvida (engl. *insight*) osnovanih na analitici podataka.

Prethodno navedeno su samo najvažnije funkcije unutar 5G mreže. 3GPP definira još desetak funkcija koje su specificirane u odvojenim dokumentima i nisu prikazane niti na slici 4.3, niti 4.4.

Komunikacija između NF-ova unutar *service based* arhitekture je komunikacija između konzumenta usluge i pružatelja usluge. Konzument usluge može zahtijevati

¹⁹ *Lawful interception* je proces u kojem telekom operator, po sudskom nalogu, prikuplja i prosljeđuje podatke privatnog korisnika ili poslovnog subjekta, odnosno njihovu kompletnu komunikaciju. Podatci se prosljeđuju agencijama za provođenje zakona.

čitanje nekih podataka ili upisivanje nekih podataka od pružatelja usluge. Sva komunikacija ovog oblika, između dva NF-a unutar jezgrene mreže odvija se putem HTTP/2 protokola. Ovo je još jedna velika razlika između 5G-a i prijašnjih generacija. Prijašnje generacije su koristile više različitih protokola kako bi omogućili komuniciranje raznih elemenata unutar svojih jezgrenih mreža, Diameter, MAP, TCAP, GTP-C i druge. No pri dizajniranju 5GC mreže odlučeno je da će se koristiti samo jedan protokol za sve vrste komunikacije i odabran je upravo HTTP/2. No, da bi se komunikacija između dva NF-a ostvarila, potrebno je prvo odraditi registraciju NF-a. Registracija NF odrađuje s NRF-om, tako što mu prosljeđuje svoje podatke, funkcije koje može odraditi, područje kojem pripada, IP adresu i slično. Zbog toga NRF i služi kao repozitorij svih trenutno aktivnih NF-ova unutar jezgrene mreže. Osim registracije potrebno je i otkriti gdje se nalazi NF B čiju uslugu NF 1 želi koristiti. Taj se proces naziva *NF discovery* i detaljno je opisan u dokumentu pod referentnim brojem 33.501 [17]. Slika 4.5. prikazuje cijeli postupak.



Slika 4.5: *NF discovery* procedura

Izvor: [17]

Cijela procedura je podijeljena na nekoliko koraka. Prvi, odnosno, nulti korak nije uvijek potreban, a to je pokušaj pronalaska NRF-a unutar jezgrene mreže. Koraci jedan i dva se odnose na obostranu autentifikaciju između NF A (konzumenta usluge) i NRF-a. Osim toga ovdje se šalje zahtjev za pristupnim žetonom (engl. *access token*), koji će omogućiti NF-u A da potvrdi da je dobio dopuštenje od NRF-a da zatraži uslugu od NF B-a (pružatelj usluge). Taj žeton ima vrijeme trajanja, dakle ne može se koristiti dovijeka i jasno definira tko je A, a tko je B strana. Treći korak omogućuje otkrivanje tko je i gdje se nalazi NF B. U koracima četiri i pet se zahtjev za uslugom zajedno s

pristupnim žetonom šalje prema NF B-u. Nakon verifikacije žetona u koraku šest NF B odgovara na zahtjev NF A u koracima sedam i osam. I time je transakcija završena.

Još jedan važan element, odnosno mrežna funkcija, koji nije prikazan niti na slici 4.2.1, niti 4.2.2. je UDR (engl. *Unified Data Repository*). UDR služi za pohranu podataka od UDM-a, PCF-a i NEF-a. Radi se o zajedničkom repozitoriju kojega koriste ova tri NF-a. U pravilu korištenjem UDR-a ova tri NF-a postaju *stateless* elementi. Naravno, računarski dio i dalje obavljaju pojedini NF-ovi UDM, PCF i NEF, dok se UDR brine isključivo za pohranu podataka.

4.3. NETWORK SLICING

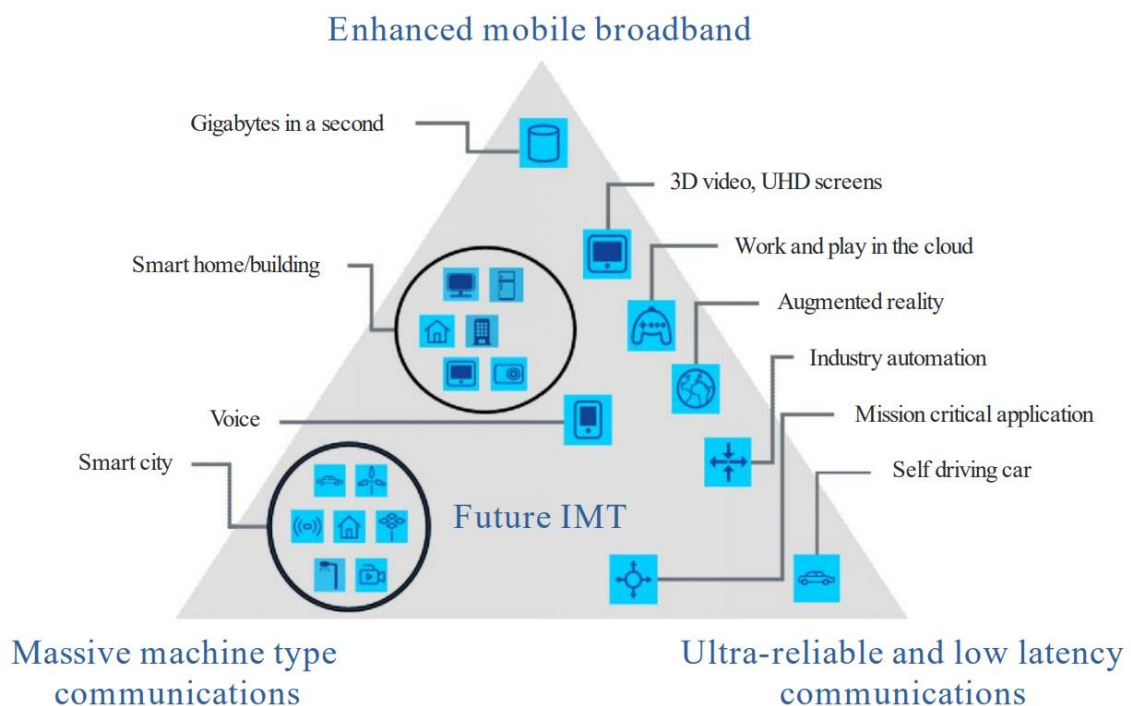
Definicija *network slice*-a, odnosno odsječka mreže je: *Network slice* je logička mreža koja pruža specifične mrežne mogućnosti i mrežne karakteristike, podržava razne postavke usluga za korisnike *network slice*-ova. Upravljanje i orkestracija, MNO (engl. *Management and Orchestration*) je ključan čimbenik koji operatorima daje podršku u pružanju komunikacijskih usluga [18].

Logičko odvajanje mreže nije nužno koncept razvijen za 5G, i prije je bilo nastojanja da se takav mehanizam implementira u drugim mrežama, gdje je možda najbolji primjer upotreba DCN-a (engl. *Dedicated Core Network*) kod LTE-a. No usporedba DCN-a i *network slicing*-a nije nužno ispravna, budući DCN kako i samo ime govori logički razdvaja isključivo jezgenu mrežu. Pravi *network slicing* mora se odvijati s kraja na kraj mreže (engl. *end-to-end*). Važnost ovakvog pristupa leži u činjenici da 5G nije zamišljen isključivo kao mreža za krajnje korisnike, nego i kao mreža koja omogućava razvoj i integraciju mnoštva tržišnih grana. Komunikacija i pristup Internetu krajnjeg korisnika je jednako važna kao i komunikacija uređaja u teškoj industriji, agrokulturi, zdravstvu ili prometu. Separacija mreže po pojedinim granama omogućena je upravo korištenjem *network slicing* pristupa.

5G infrastruktura telekom operatora sastoji se od tri glavna dijela, to su pristupna mreža NG-RAN, jezgrena mreža 5GC, ali i transportna infrastruktura koja se nalazi ispod njih i omogućava stvarni prijenos informacija. *Network slice* mora biti postavljen na sva tri dijela kako bi uistinu radio kao nezavisna logička mreža. U pravilu moguće je ostvariti *network slice* i kod upotrebe *non-3GPP* pristupne mreže poput WiFi-a ili ostalih kako je objašnjeno u potpoglavlju 4.1. Dakle, duž cijele infrastrukture telekom operatora potrebno je stvoriti *network slice*. Taj *network slice* će biti logički odijeljen od svih ostalih *network slice*-ova, te će taj *network slice* podržavati specifičan skup atributa, kvaliteta i karakteristika. Duž cijele fizičke arhitekture moguće je definirati mnogo *network slice*-ova. Jedan može služiti za pristup Internetu, drugi za prometne potrebe, jedan za komunikaciju medicinskih pomagala i sl. Može se naslutiti

kako je ovdje potrebno imati jasno definiran način upravljanja i orkestracije *network slice*-ova, upravljanje životnim ciklusom *network slice*-a, održavanjem i njihovim uklanjanjem kada više ne budu potrebni. No, potrebno je omogućiti i nezavisan nadzor nad svakim pojedinim *network slice*-om.

Kroz mnoštvo literature koja se bavi područjem 5G mreža moguće je naći razne primjere kako će *network slicing* poboljšati način života prosječnog korisnika i kako će revitalizirati razne industrijske grane, no najčešći prikaz ističe tri ključna slučaja upotrebe (engl. *use case*) koji su prikazani na slici 4.6.



Slika 4.6: Slučajevi upotrebe *network slicing*-a u 5G mreži, [19]

Gornji kut trokuta na slici 4.6. ukazuje na potrebe uređaja za što većom brzinom pristupa Internetu, omogućavanje preuzimanja sadržaja u gigabitnom opsegu. Lijevi kut trokuta označava potrebu za mnoštvom međusobno povezanih uređaja. U nekim slučajevima može se govoriti čak i o milijardama uređaja istovremeno povezanih na istu mrežu. Desni kut trokuta označava uređaje koji zahtijevaju veoma kratko vrijeme kašnjenja i odziva kao i veoma visoku pouzdanost. Sve tri strane predstavljaju krajnje slučajeve, dok se stvarni uređaji nalaze negdje između tih traženih vrijednosti.

Network slice, kako je prethodno objašnjeno, se prostire duž cijele fizičke mreže što znači da se unutar njega nalaze elementi, odnosno funkcije, i korisničke i kontrolne ravnine. Jedan UE može koristiti samo jedan *network slice* ili može biti spojen na više njih istovremeno. Ukoliko je spojen na više *slice*-ova koji koriste iste fizičke resurse, mora se garantirati potpuna nezavisnost, odnosno potpuna izolacija. Pod pojmom

izolacija ne misli se isključivo na izolaciju resursa potrebnih za prijenos informacija, nego i na izolaciju funkcija, izolaciju konfiguracija, izolaciju politika temeljenih na korištenju (engl. *usage based policies*), izolaciju životnog vijeka samog *slice*-a, izolaciju sigurnosnih domena i slično. Resursi se dodjeljuju vezano za potrebe koje *slice* definira. 3GPP je prvotno prepoznao tri načina upotrebe i klasificirao je tri tipa usluge, koji su ujedno prikazani i na slici 4.6. Prvi je eMBB (engl. *enhanced mobile broadband*) dakle *slice* koji će se koristiti kada je potrebno omogućiti velike brzine prijenosa podataka (u gigabitnom opsegu), gdje zahtjevi za kašnjenjem i samim brojem uređaja nisu previše bitni. Drugi je URLLC (engl. *ultra-reliable low latency communication*), odnosno *slice* koji će omogućiti uređajima spajanje na mrežu i prijenos informacija s neusporedivo kratkim vremenom kašnjenja i s mehanizmima koji će omogućiti neusporedivu pouzdanost i garanciju isporuke. Treći je MIoT (engl. *massive IoT*), odnosno *slice* koji će omogućiti spajanje do sada nezamislivog broja uređaja koji će pretežito biti upotrebljavani u IoT scenarijima, gdje brzina prijenosa i kašnjenje nisu od velike važnosti, ali mreža mora podržavati enormnu količinu uređaja.

Prethodno je spomenuto da se najčešće koristi prikaz trokutom kada se objašnjava pojam *network slicing* i da je 3GPP upravo definirao tri prethodno navedena slučaja upotrebe, no tijekom razvoja samog standarda došlo je do dodavanja novih, dedikirani slučajeva upotrebe. Unutar *Release*-a 16 dodan je V2X (engl. *vehicle to everything*) *slice* koji je definiran isključivo za komunikaciju vozila sa svojim okruženjem. *Release* 17 donio je novi dodatak, a to je HMTC (engl. *High Performance Machine type Communication*) *slice* koji je dodan kako bi povezo uređaje koji zahtjevaju visoku brzinu prijenosa podataka, ali ujedno i veoma malo kašnjenje, npr. upravljanje na daljinu, automatizacija u industriji i haptičke tehnologije²⁰. Najnoviji dodatak dodan je u *Release*-u 18, a to je HDLLC (engl. *high data rate and low latency communication*). Radi se o *slice*-u koji je dosta sličan prethodnom, iako je ovdje glavni fokus stavljena na korisnika i na virtualiziranu stvarnost. Iako su brzina i malo kašnjenje bitni, u odnosu na HMTC brzina ipak igra važniju ulogu kod HDLLC *slice*-a.

Tablica 4.1 prikazuje trenutne preporuke 3GPP-a u pogledu slučajeva upotrebe i primjene *network slicing*-a.

Ono što je u tablici 4.1. moguće vidjeti je kratica SST (engl. *slice service type*). Vrijednosti SST-a ukazuju na grupiranje aplikacija i funkcija koje se koriste u tom *slice*-u. Osim navedenih *slice*-ova operator ima mogućnost definirati bilo koji *slice* koji želi. Uz dodavanje novih *slice*-ova operator ima mogućnosti i kreiranja *slice*-ova s istom vrijednosti SST-a, npr. moguće je imati dva ili više eMMB *slice*-a, jedan može biti recimo za privatne korisnike, dok drugi može biti za poslovne korisnike.

²⁰ Haptička tehnologija (engl. *Haptics*) odnosi se na bilo koju tehnologiju koja ima mogućnost stvaranja iskustva dodira primjenom sila, vibracija i pokreta. Odnosno, tehnologija koja omogućava virtualizaciju osjeta dodira.

Tablica 4.1: Standardizirani tipovi *slice*-a

Tip usluge / Slice	SST vrijednost	Obilježja
eMBB	1	Slice prikladan za upravljanje poboljšanim mobilnim pristupom
URLLC	2	Slice prikladan za upravljanje komunikacijama s visokom razinom pouzdanosti i niskim kašnjenjem
MIoT	3	Slice prikladan za upravljanje masivnim mrežama unutar paradigme Interneta stvari
V2X	4	Slice prikladan za upravljanje komunikacijama vozila prema „svemu ostalome“
HMTc	5	Slice prikladan za ostvarivanje M2M komunikacije s visokim performansama
HDLLC	6	Slice prikladan za upravljanje komunikacijama s niskim kašnjenjem i visokom propusnošću

Izvor: [13]

Kako bi se moglo razaznati o kojem se točno *slice*-u radi uvedena je još jedna oznaka, a to je SD (engl. *service differentiator*). Iako dva *slice*-a mogu imati istu SST vrijednost tada moraju imati različitu SD vrijednost. Spoj ove dvije oznake je u konačnici vrijednost kojom mreža i UE potvrđuju jedan drugome koji *network slice* će koristiti. Ta udružena vrijednost se zove S-NNSAI (engl. *single-network slice selection assistance information*). S-NNSAI oznaka služi kao indikacija kakav tip *slice*-a UE želi koristiti, no operator ima pravo postaviti svoj osobni identifikator i pridružiti ga S-NNSAI vrijednosti. Taj identifikator se zove NSI ID (engl. *network slice instance identity*) i služi kao ključni identifikator stvarnog skupa funkcija i mogućnosti koje su alocirane za korištenje tom *slice*-u.

Proces „ugovaranja“ *slice*-a koji će se koristiti također je detaljno opisan i standardiziran od strane 3GPP-a. UE ima mogućnost indicirati kakav *slice* želi koristiti. UDR je funkcija koja sadrži sve podatke o korisniku, a među njima se nalaze i S-NNSAI podatci unutar kojih je navedeno koje *slice*-ove UE može koristiti. Još jedan važan element cijelog procesa „ugovaranja“ je i NRF koji sadrži mapu svih aktivnih elemenata i njihovih funkcija u mreži. Dakle u procesu „ugovaranja“ bit će potrebna pomoć NRF-a, koji će moći potvrditi, da li svi NF-ovi, koji poslužuju taj specifični UE, pripadaju *slice*-u kojeg je UE zatražio i da li je taj *slice* zapisan u UDR-u za tog korisnika. Za vrijeme registracije UE zahtjev je prosljeđen do AMF-a, zajedno sa zatraženim *slice*-om (ili više njih). AMF je samosvjestan (engl. *self aware*) i zna da li je prikladan za posluživanje tog UE-a (vezano za *slice* kojeg je UE zatražio). Ukoliko nije AMF traži pomoć od NSSF-a. NSSF određuje koji je AMF prikladan za posluživanje UE-a (ponovno vezano za zatraženi *slice*). Ukoliko to nije AMF koji je prvotno prosljedio poruku prema NSSF-u tada će NSSF prosljediti podatke o

ispravnom AMF-u koji uistinu i može podržati taj UE i zatraženi *slice*. Dodatna zadaća NSSF-a je stvaranje liste pod nazivom NSSAI (engl. *network slice selection assistance information*), koja se putem AMF-a prosljeđuje prema UE-u. Ta lista sadrži informacije operatora o tome koje *slice*-ove mreža podržava (bitno za *roaming* korisnike) i sadrži informacije o dopuštenim *slice*-ovima za taj UE kako bi ovaj mogao kasnije zatražiti ispravni *slice*.

5. PRIMJENA VIRTUALIZACIJE U MOBILNIM MREŽAMA

Kada se govori o virtualizaciji u računalstvu misli se na simulaciju, odnosno emulaciju sklopovlja (engl. *hardware*) i programske podrške (engl. *software*), kao što su cijela računala, operativni sustavi (u nastavku rada koristit će se kratica OS), pohrane podataka i mrežnih funkcija (umrežavanja) (engl. *networking*). Tako kreirani entiteti nalaze se u virtualnom okruženju. Pomoću virtualizacije moguće je povećati agilnost (engl. *agility*), fleksibilnost i skalabilnost sustava, uz znatne uštede kako energetske tako i financijske. Povećana mobilnost, učinak, upravljivost, dostupnost resursa, automatizacija ključnih operacija samo su neki od benefita koje virtualizacija donosi u IKT (informacijsko komunikacijske tehnologije) svijetu [20]. Tradicionalni način koji se do sada primjenjivao bila je implementacija jedne aplikacije ili programske funkcije na jednom uređaju. Na primjer, poslovni subjekt može imati 3 poslužitelja (engl. *servers*), od kojih je na svakom pokrenuta jedna aplikacija tipa DNS (engl. *domain name system*), e-pošta ili NAS (engl. *network attached storage*) i gdje sva tri poslužitelja imaju drugačiji OS (Windows, Linux, Unix). Ono što virtualizacija omogućava je da umjesto tri različita uređaja poslovni subjekt može koristiti samo jedan uređaj koji će zamijeniti ulogu tri prethodno navedena uređaja i to može činiti mnogo efikasnije. Taj poslužitelj na sebi ne samo da može imati pokrenute 3 programske funkcije, nego može imati pokrenuta i tri različita OS-a.

Drugim riječima ono što virtualizacija omogućava je konsolidacija više fizičkih poslužitelja s drugačijim OS-ovima i programskim funkcijama i pokretanje svega na jednom fizičkom poslužitelju u virtualnom okruženju. Termin koji se koristi za spoj virtualiziranog OS-a i njemu pripadajuće programske funkcije je virtualni stroj (engl. *virtual machine*), odnosno VM. Pokretanje VM-ova na fizičkom poslužitelju odvija se isključivo pomoću programske podrške, a za krajnjeg korisnika je to doslovno neprimjetno, odnosno korisnik nije u mogućnosti raspoznati radi li se o fizičkom uređaju ili o VM-u. Upotrebom virtualizacije procesor (CPU) postaje mnoštvo virtualnih procesora (vCPU), radna memorija (RAM) postaje mnoštvo virtualnih radnim memorija (vRAM), dok pohrana podataka (engl. *storage*) postaje mnoštvo virtualnih pohrana podataka (engl. *vstorage*)

Moguće se zapitati nije li jednostavnije pokrenuti više aplikacija unutar jednoga OS-a umjesto dodatnog kompliciranja s upotrebom dodatne programske podrške. Odgovor na ovo pitanje ujedno je i jedna od najvažnijih karakteristika virtualizacije, a to je da su VM-ovim, iako se nalaze na istom sklopovlju, zapravo logički odvojeni i ne znaju jedan za drugoga. Ne samo da ne znaju jedan za drugoga nego i nemaju mogućnost pristupati resursima dodijeljenim drugom VM-u.

Standardni OS nema mogućnost potpunog sigurnosnog odvajanja aplikacija na jednom poslužitelju, te je stoga poslovni subjekt bio primoran investirati u novi poslužitelj svaki put kada se pojavila potreba za novom aplikacijom, ali često je bio slučaj da aplikacija nije u mogućnosti iskoristiti sve resurse poslužitelja koji joj stoji na

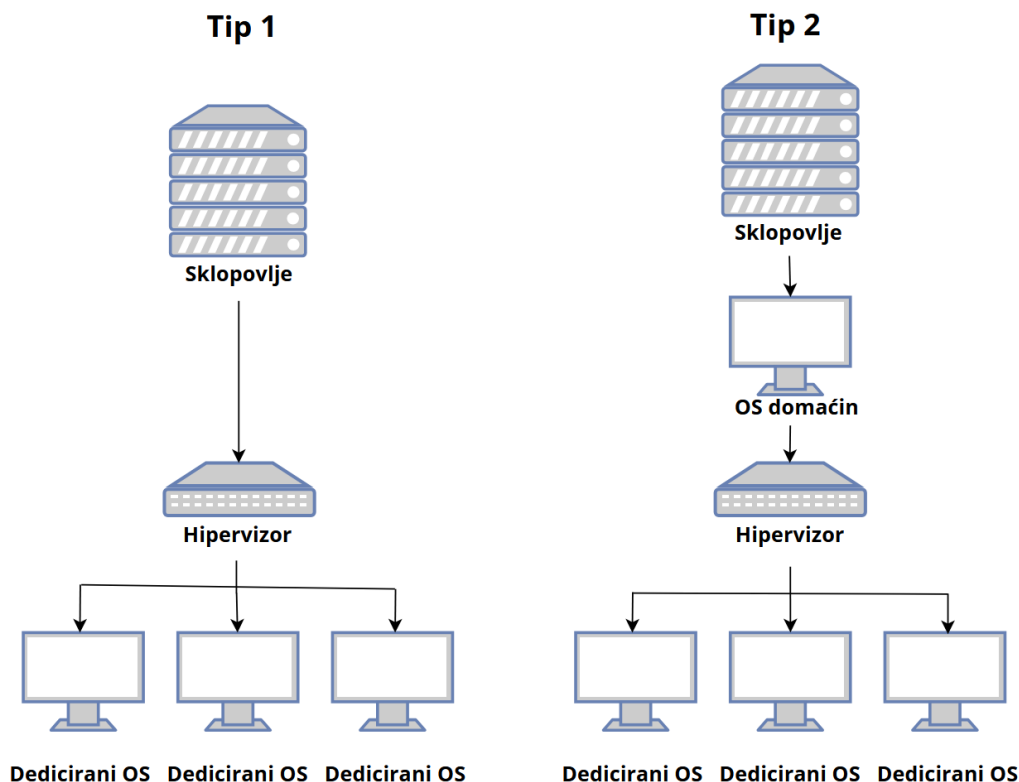
raspolaganju. U nekim slučajevima to je moglo rezultirati mizernoj iskorištenosti od svega 10%, dakle nepotreban gubitak resursa i novca. Svaka nova implementacija zahtijeva nabavku novih komponenti, što iziskuje dodatan vremenski angažman i može trajati danima, tjednima ili mjesecima, a potreba može biti stvarnovremena, te time dovesti do gubitka reputacije ili kreiranja oportunitetnog troška.

Iako je virtualizaciju moguće ostvariti na više načina, jedan od najčešće korištenih i ujedno onaj koji će biti opisan u nastavku rada je upotreba hipervizora (engl. *hypervisor*).

5.1. HIPERVIZOR

Hipervizor je naziv za program koji pokreće virtualizaciju, koji kreira i pokreće VM-ove. Hipervizor omogućava računalu domaćinu (engl. *host PC*) da pruži potporu VM-ovima tako da dijelu svoje resurse u obliku računalne moći (engl. *compute*), pohrane podataka (engl. *storage*) i pružanja mrežnih usluga (engl. *networking*) [21]. Hipervizor provodi apstrakciju fizičkih sklopovskih resursa i time ih emulira i kreira virtualne resurse koji se onda daju gostujućim OS-ovima (engl. *guest OS*) na raspolaganje. OS-ovi i aplikacije koje su na njima pokrenute imaju mogućnost isključivo komunicirati s virtualnim resursima koji su dodijeljeni specifičnom VM-u na kojemu se oni nalaze. VM-ovi nemaju mogućnost koristiti resurse drugih VM-ova. [21] Hipervizor izolira i štiti VM-ove jedne od drugih.

Postoje dvije vrste hipervizora, tip 1 i tip 2. Hipervizor tipa 1 je instaliran direktno na sklopovlje poslužitelja (engl. *bare-metal*), odnosno između njega i sklopovlja ne postoji neki drugi OS, nego se može reći da je on neka vrsta OS-a. Hipervizor tipa 2 je instaliran kao program povrh postojećeg OS-a (engl. *hosted*) kao npr. povrh Windowsa, Linuxa ili MacOS-a [21]. Drugim riječima OS domaćin "sjedi" između sklopovlja i hipervizora. Veoma čest hipervizor tipa 1 je VMware ESXi, dok su primjeri tipa 2 Oracle VM Virtualbox, VMware workstation. Na slici 5.1. dan je prikaz i usporedba hipervizora tipa 1 i tipa 2.



Slika 5.1: Hipervizor tipa 1 (lijevo) i hipervizor tipa 2 (desno)

Izvor: [22]

Valja napomenuti kako hipervizori tipa 1 predstavljaju većinu hipervizora implementiranih u poslovnom okruženju, dok je tip 2 češće korišten u privatne svrhe.

Prednosti korištenja hipervizora su brojne. Vjerojatno glavna od njih je ušteda novca na sklopovlju i na struji. Ušteda je vidljiva i na zauzimanju površine (engl. *floor space*) bilo u prostorijama poslovnog subjekta ili u podatkovnom centru, što ponovno povlači za sobom i novčanu uštedu. Dodatna prednost je i na održavanju i upravljanju, administrator ne mora brinuti o zalisi rezervnih dijelova ukoliko se radi o poslužitelju specifičnog isporučitelja (engl. *vendor*) koji kod zamjene ili unaprjeđenja zahtijeva isključivo instalaciju vlasničke dijelove (engl. *proprietary*). Važna prednost je i prenosivost, VM se s jednog uređaja lako može prebaciti na drugi. Na primjer ukoliko postoji poslužitelj sa starim ili dotrajalom sklopovljem ili na postojećem poslužitelju nedostaje fizičkih resursa, s lakoćom se VM prebaci na novi poslužitelj. Prethodno je već spomenuta prednost korištenja punog kapaciteta resursa koji su dostupni. Današnja računala, odnosno poslužitelji su toliko moćni da većina aplikacija nije u mogućnost potpuno iskoristiti njihove resurse, ali ukoliko se na takvom poslužitelju pokrene više VM-ova tada iskoristivost raste i moguće ju je približiti gornjoj granici. Možda i jedna od najvažnijih prednosti je obnova u slučaju neočekivanog negativnog događaja ili katastrofe. Budući su VM-ovi ništa drugo nego programske funkcije koje se mogu prebaciti na sigurnu pohranu (engl. *backup*) te ih se u slučaju potrebe može

ponovno postaviti (engl. *upload*) na neki drugi uređaj. Dakle ukoliko jedan poslužitelj prestane raditi drugi može gotovo istovremeno preuzeti njegovu ulogu.

Koliko god je primjena hipervizora i VM-ova korisna postoje i neke mane kao npr. velika upotreba prostora za pohranu budući svaki VM ima svoj dedikirani OS, a budući ima svoj dedikirani OS tada nepotrebno zauzima i radnju memoriju i računalnu moć poslužitelja koja bi se mogla iskoristiti za pokretanje aplikacija. Iz tog razloga VM-ovi su ponekad spori pri početnom pokretanju, odnosno paljenju, budući trebaju pokrenuti čitavi OS, a ovisno o OS-u koji se upotrebljava postoji mogućnost i dodatnog plaćanja licenci za svaki pojedini VM.

Kako bi se uklonili neki od navedenih nedostataka koji se pojavljuju kod upotrebe hipervizora i kreiranja VM-ova sve češće se u praksi koristi novija tehnologija koja će biti objašnjena u sljedećem potpoglavlju.

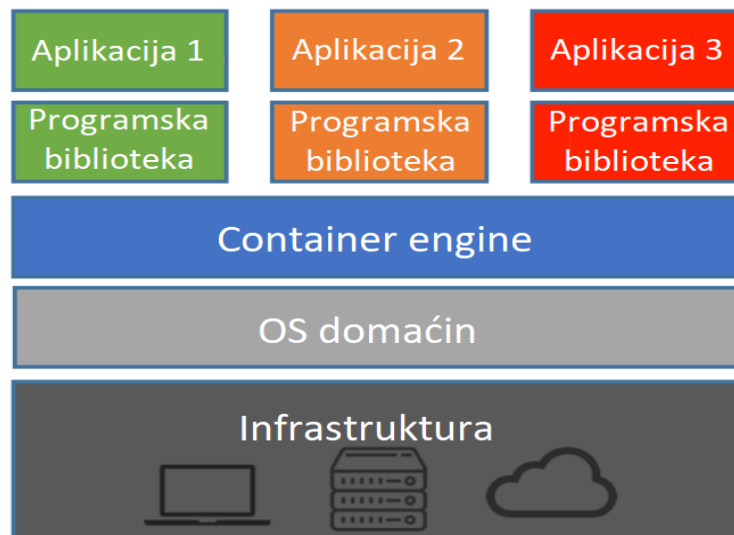
5.2 KONTEJNERI

Kontejneri (engl. *containers*) su novija tehnologija, odnosno aplikacija koja za cilj ima riješiti sve probleme koje se tradicionalno rješavalo primjenom hipervizora i koji su objašnjeni u prethodnom potpoglavlju, ali uz uklanjanje negativnih strana koje primjena hipervizora i VM-ova donosi sa sobom. Također se radi o jednom od načina virtualizacije (iako ne po svim autorima iz ovog područja). Kontejner je aplikacija koja unutar sebe ima zapakirane sve datoteke, knjižnice (engl. *library*), konfiguracije i neophodne programe koji su potrebni za njeno ispravno izvršavanje, u bilo kojem okruženju bez potrebe za dodavanjem ičega što se nalazi izvan kontejnera.

Za pokretanje kontejnera naravno potrebno je sklopovlje, odnosno poslužitelj, a povrh njega potreban je OS, što čini veliku razliku između hipervizora tipa 1 i kontejnera. Taj OS mora imati podršku za neku vrstu kontejnerskog sustava (engl. *container engine*) kako bi se kontejneri mogli „raspakirati“ i proslijediti jezgri (engl. *kernel*) OS-a. Kontejneri, dakle trebaju OS domaćin, ali ne trebaju svoj dedikirani OS, što ih čini neusporedivo manjima od VM-ova. Budući pri njihovom pokretanju nije potrebno pokrenuti cijeli OS sama operacija pokretanja se izvršava za nekoliko milisekundi i njihova upotreba računalnih resursa i radne memorije je također drastično smanjena. Naravno sama prenosivost i sigurnosna pohrana je također ili jednaka ili bolja kod kontejnera.

No kao i svaka tehnologija ni kontejneri nisu savršeni i imaju svoje nedostatke, od kojih je najveći taj da se kontejnerska datoteka (engl. *image*) pakira na način da radi s isključivo jednim OS-om, a to je onaj na kojemu je i kreirana. Dakle ukoliko je kontejner kreiran za Windows tada taj kontejner može raditi samo na Windows poslužiteljima. Dodatni problem je taj da kontejneri zahtijevaju ispravan rad OS-a

domaćina, a ukoliko on prestane raditi tada svi kontejneri na tom poslužitelju također prestaju raditi, odnosno ukoliko postoji problem na OS-u domaćinu, tada taj problem može i vjerojatno hoće utjecati na ispravan rad kontejnera. Slika 5.2. prikazuje slojevitú konstrukciju kontejnera.



Slika 5.2: Konstrukcija kontejnera

Izvor: [23]

U praksi je prisutno nekoliko kontejnerskih sustava i drugih programskih podrški koje gotovo drže monopol na tržištu. Glavni od njih je Docker. Docker je platforma, odnosno skup alata osmišljenih kako bi se pojednostavilo kreiranje, upravljanje, razvijanje aplikacije upotrebom kontejnerizacije (engl. *containerization*). Neki od pruženih alata su Docker Engine za stvaranje i upravljanje kontejnerima, Docker Compose za aplikacije koje zahtijevaju više kontejnera, Docker Hub za dijeljenje (engl. *sharing*) i distribuciju kontejnerskih datoteka [24]. Docker omogućava automatsko generiranje kontejnera na osnovu izvornog kôda (engl. *source code*), omogućava numeriranje, odnosno praćenje verzija kontejnerskih datoteka i time omogućava vraćanje na prijašnju verziju (engl. *roll back*) ili kreiranje samo datoteka koje imaju samo pohranjenu razliku između više verzija. Omogućava i ponovnu upotrebu postojećih kontejnera kao nacrt za neki novi kontejner i pruža mogućnost pristupa knjižnici, odnosno registru kontejnera koje su kreirali drugi korisnici.

Kod projekata unutar kojih je kreiran velik broj kontejnera javlja se potreba za nadzorom i upravljanjem na njima na neki centralizirani način, a ne pojedinačno. Na tržištu je najviše zastupljen specifičan proizvod namijenjen baš za to, Kubernetes. Kubernetes je platforma otvorenog koda (engl. *open-source*) koja se koristi za održavanje i puštanje u rad grupe kontejnera. Iako je često moguće vidjeti članke i

raspravnu je li bolje upotrebljavati Docker ili Kubernetes, odnosno koji je proizvod bolji, u pravilu radi se o pogrešnoj usporedbi. Iako obje platforme imaju neke sličnosti u pravilu se radi o suplementarnim proizvodima i najbolje ih je upotrebljavati zajedno, Docker za kreiranje, a Kubernetes za upravljanje.

Neke od glavnih značajki Kubernetes-a su automatizirano uravnotežavanje opterećenja (engl. *load balancing*), neosjetna (engl. *seamless*) ažuriranja aplikacija, sposobnost samopopravka (engl. *self-repair*) i upravljanje zahtijevanim konfiguracijama (engl. *declarative configuration management*), odnosno mogućnost zahtijevanja željenog stanja koje se zatim određenim procesima nastoji ostvariti [25].

Kontejneri su svoj „zanimljiv“ naziv dobili zbog svoje sličnosti s pravim fizičkim kontejnerima za prijenos robe, te je stoga korisno iznijeti par sličnosti među njima. Fizički kontejneri su standardizirani, u pogledu dimenzija, konstrukcije i fizičkog zglada. Kontejner koji se upotrebljava u Kini se upotrebljava i u Hrvatskoj. Isto vrijedi i za virtualne kontejnere, njihov dizajn je standardiziran i time se omogućava izvršavanje na svim računalima i poslužiteljima. Druga sličnost je prenosivost, fizički kontejneri su veoma prenosivi, moguće ih je prenijeti iz jedne zemlje u drugu. Prijenos je moguć putem broda, vlaka ili kamiona. Isto vrijedi i za virtualne kontejnere, budući sami unutar sebe sadrže sve potrebno za vlastito izvršavanje mogu se pokrenuti na bilo kojem računalu ili poslužitelju. Treća sličnost je sigurnost i zaštita, fizički kontejneri štite robu koju imaju pohranjenu unutar sebe, svojom konstrukcijom i raznim uređajima za nadzor i onemogućavanje neovlaštenog pristupa. Isto se može primijetiti i kod virtualnih kontejnera, platforme poput Dockera pružaju veoma visok stupanj izoliranost među kontejnerima, a i sami kontejneri, kako je već napomenuto, su samodostatni tako da nemaju potrebu za interakcijom s drugim komponentama računala ili poslužitelja.

5.3. USPOREDBA HIPERVIZORA I KONTEJNERA

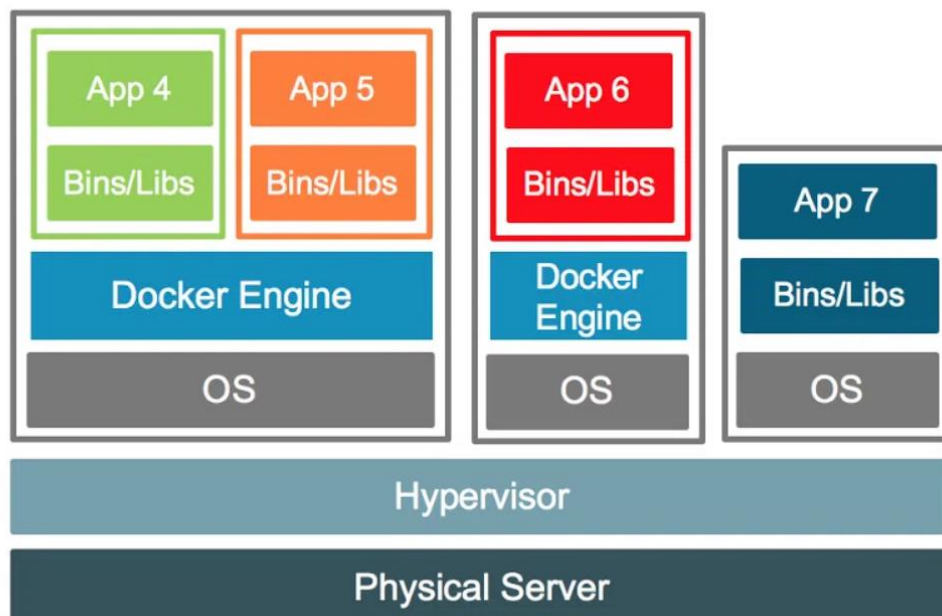
Hipervizori i kontejneri se često koriste u iste svrhe, a to je virtualizacija koja omogućava fleksibilnost, skalabilnost, optimalno iskorištavanje resursa, logičko odvajanje i izolacija aplikacija na poslužitelju. Primjena oba pristupa omogućava upotrebu standardiziranog sklopovlja za obavljanje programskih funkcija i aplikacija za koje je prethodno bilo potrebno vlasničko sklopovlje (engl. *proprietary hardware*). No način na koji to odrađuju je u potpunosti različit. Hipervizor virtualizira sklopovlje dok kontejneri virtualiziraju programsku podršku, točnije oni virtualiziraju OS. Upravo to čini kontejnere mnogo efikasnijima i prenosivijima. Kontejneri su apstrakcija aplikacijske razine, dok je hipervizor apstrakcija fizičke razine.

Također postoji i razlika u brzini. Budući kontejneri nemaju svoj dedicerani OS, nemaju potrebu podići OS pri svakom pokretanju i time omogućuju zaista nevjerovatno brzu paljenje, ali i gašenje, uništavanje, brisanje. Ove akcije traju svega nekoliko sekundi. Ovo naizgled ne izgleda kao veliki benefit, ali postoje scenariji gdje je upravo ta brzina ključna, pogotovo kod vremenski veoma osjetljivih (engl. *time-sensitive*) situacija.

Naravno razlika koja je također uočljiva je i razlika u korištenim resursima. Manjak OS-a kod kontejnera omogućava mnogo manju potrošnju resursa u vidu pohrane podataka, kao manju potrošnju računalnih i memorijskih resursa koje obično zahtijeva OS za svoje izvršavanje. Resursi uštedeni ovim putem mogu se koristiti za izvršavanje dodatnih aplikacija.

Prednost hipervizora je mogućnost pokretanja više OS-ova na istom poslužitelju, što itekako dobro dođe kod kompleksnih sustava koji imaju široku i raznoliku primjenu poput sustava mrežnih operatora, gdje je zbog količine različitih aplikacija i funkcija nemoguće očekivati da će za sve njih biti potreban isti OS.

Neke organizacije su odlučile istovremeno koristiti obje tehnologije na istim uređajima tako da se na jednom poslužitelju uz pomoć hipervizora pokreće nekoliko VM-ova svaki sa svojim OS-om, a unutar tih VM-ova bi se koristili kontejneri i time bi se optimizirala upotreba resursa i povećala produktivnost. Upravo ovakav način rada prikazan je na slici 5.3.



Slika 5.3: Suradnja hipervizora i kontejnera, [26]

5.4. PROBLEMI TELEKOM OPERATORA

Računalstvo u oblaku (engl. *cloud computing*) je termin koji se veoma često susreće u literaturi iz IKT područja. Toliko često da ponekad ostavlja utisak kako se apsolutno sve rješava isključivo pomoću oblaka. Terminologija je izrazito promjenjiva i podosta složena za prijevod. Kao najbolji primjer je termin *cloud-native* kojeg je zaista teško prevesti te će se stoga u nastavku ovog rada primjenjivati u svom izvornom obliku. Značenje termina je način izrade programa ili aplikacija sa punom primjenom svih karakteristika računalstva u oblaku i njemu srodnih servisa i procedura, poput virtualizacije, kontejnerizacije, dinamične skalabilnosti, otpornosti na pogreške i neispravnosti, konstantno nadziranje i poboljšanje i sl.

Mreža u oblaku (engl. *cloud network*) odnosi se na poslužitelje, mrežne komponente poput usmjernika (engl. *router*) ili preklopnika (engl. *switch*), podatkovnih centara koji su pokrenuti i izvršavaju se na dijeljenim virtualiziranim resursima umjesto kao do sada na fizičkom, dedicanom sklopovlju. Dodatna prednost takvih mreža je i dostupnost s bilo koje lokacije. Mogu biti implementirane u privatnom, javnom ili hibridnom oblaku. Dakle, mogu biti dostupne svima na korištenje, s ili bez naknade za upotrebu ili biti dostupne isključivo unutar jedne organizacije. Druge važne karakteristike takvih mreža su mogućnost brzih reakcija na promjenu bilo u pogledu smanjenja (engl. *scale-out*) ili povećanja (engl. *scale-in*), velika elastičnost i omogućen pristup na zahtjev (engl. *on-demand access*). Te i još mnoge druge prednosti uvjetovale su, odnosno može se reći i primorale, telekom operatore da implementiraju mreže u oblaku u svom svakodnevnom radu, kako na strani orijentiranoj isporuci usluga korisniku, tako i na strani vezanoj za interne procese unutar organizacije.

Ključni problemi s kojima se telekom operatori susreću su nemogućnost dinamične alokacije kapaciteta, manjak adaptabilnosti, manjak fleksibilnosti, manjak brzine pri unapređivanju (engl. *upgrade*) ili promjeni. Dinamična alokacija kapaciteta je potrebna ukoliko se dogodi nepredvidiva i nekontrolirana „eksplozija“ prometa jedne od usluga operatora, npr. kod izvanrednih vijesti, važnih događanja ili kao što je u Hrvatskoj prije par godina bio slučaj, potresa, gdje kapacitet određene usluge jednostavno nije dostatan da zadovolji iznenadnu potražnju te dolazi do drastične degradacije usluge ili do potpune nemogućnosti korištenja iste. Adaptabilnost je važna pri uvođenju novih usluga ili funkcionalnosti u sustav, pri dostizanju nekog novog propisanog standarda. Uz tradicionalno sklopovlje nova implementacija je uvijek odgođena ili isporučena sa zakašnjenjem. Fleksibilnost, u pogledu prenamjene resursa između dvije usluge, također je nedostatak tradicionalnih mreža. Poznato je da određene usluge imaju svoj vrhunac, odnosno vršni prometni sat u različitim dijelovima dana te bi postojale znatne uštede ukoliko bi se resursi s jedne od usluga (npr. govorna usluga) mogli prebaciti na drugu uslugu (npr. IPTV) u vremenu kada za njih nema velike potražnje. Brzina unapređenja i nadogradnje je usporena zbog vlasničkog sklopovlja i nemogućnosti implementacija specifičnih usluga kod pojedinih isporučitelja, što rezultira tzv. zaključavanjem na specifičnog isporučitelja (engl. *lock-in*).

5.5. NFV

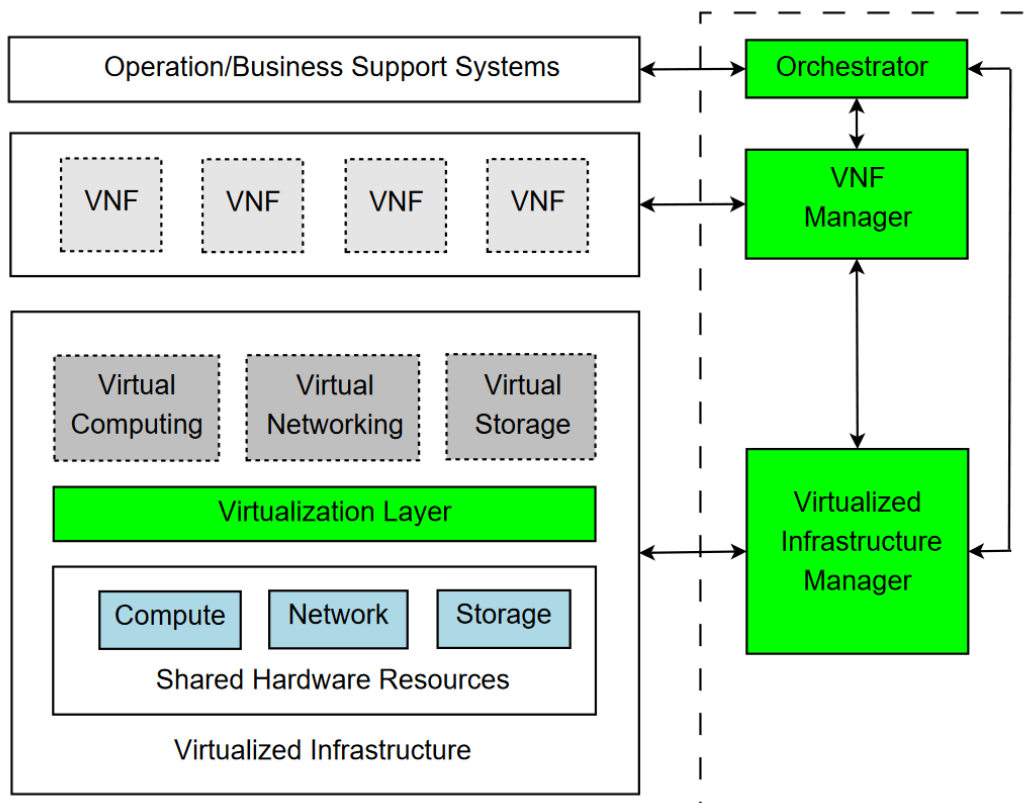
Kao odgovor na sve u prethodnom poglavlju navedene probleme kao i mnoge druge pojavila se potreba za kreiranjem radnog okvira (engl. *framework*) koji se može opetovano primjenjivati i standardizirati kroz cijelu telekom industriju. Upravo je to učinjeno objavom preglednog dokumenta (engl. *white paper*) 2012. godine u Darmstadtu u Njemačkoj pod nazivom „Network Functions Virtualisation“ [27]. Radi se o preglednom dokumentu pri čijem su sastavljanju i objavi sudjelovali predstavnici najvećih telekom operatora u svijetu poput Deutsche Telekom, China Mobile, AT&T-a, Orange-a, Telefonica-e i drugih, ukupno 12 telekom operatora. Po riječima autora radi se o dokumentu koji za cilj ima: pronaći rješenja za tehničke izazove, koji su već dostupni ili mogu postati dostupni i preporuka da IT i mrežna industrija ujedine svoja komplementarna iskustva i resurse u zajedničkoj suradnji kako bi ostvarili široko razumijevanje pri standardiziranom pristupu i zajedničkoj arhitekturi koji pružaju rješenja iznesenim tehničkim problemima i izazovima i koji omogućavaju interoperabilnost [27].

Virtualizacija mrežnih funkcija odnosno NFV je radni okvir koji se i danas primjenjuje, naravno uz poneka unapređenja i inovativnije tehnologije nego što je na početku predloženo. NFV za cilj ima transformirati način na koji telekom operatori grade svoje mreže primjenom i evolucijom standardnih tehnologija poput virtualizacije kako bi udružili mrežne elemente i čvorove i pokretali ih na standardnim poslužiteljima, preklopniciima, uređajima za pohranu podataka, koji se mogu nalaziti unutar podatkovnih centara, unutar prostora operatora ili ponekad i prostorija u vlasništvu korisnika. NFV radni okvir zahtijeva implementaciju mrežnih funkcija i aplikacija u obliku programske podrške koja se može pokretati na širokom spektru standardiziranog industrijskog sklopovlja, te ima mogućnost premještanja ili kreiranja instanci (engl. *instantiation*) na različitim lokacijama po potrebi, bez instalacije nove sklopovske opreme i uređaja.

Prema autorima NFV se može primijeniti na bilo koju mrežnu funkciju ili aplikaciju unutar podatkovnog (engl. *data plane*) ili upravljačkog sloja (engl. *control plane*) u mobilnim i fiksnim mrežama. Neki od primjera koje navode su: HLR (engl. *home location register*), HSS, MME, SGSN (engl. *serving GPRS support node*), GGSN (engl. *gateway GPRS support node*), PDN-GW, SBC (engl. *session border controller*), cijeli IMS sa svim komponentama tipa TAS, CSCF, MGW (engl. *media gateway*) i mnogi drugi. U pravilu svi elementi trenutno aktivni kroz više generacija mobilnih i fiksnih mreža, bilo da se radi o sustavima s komutacijom paketa ili s komutacijom kanala i svi budući elementi koji su dio 5G mreže mogu se kreirati uz pomoć NFV-a.

NFV kao radni okvir podrazumijeva tri procesa. Prvi je pretvaranje mrežnih funkcija u programe (engl. *softwareisation*), drugi je virtualizacija, a treći je orkestracija (engl. *orchestration*) i automatizacija. Postoje tri glavna elementa NFV arhitekture, a

to su NFVI (engl. *network function virtualization infrastructure*), VNF (engl. *virtual network functions*) i MANO (engl. *management, automation and network orchestration*). Slika 5.4. prikazuje NFV arhitekturu.



Slika 5.4: NFV radni okvir, [28]

NFVI je sloj koji je odgovoran za upravljanje sklopovskom opremom. Ovdje se nalazi svo sklopovlje zaduženo za računalnu obradu, pohranu podataka i umrežavanje. NFVI od fizičkih resursa nastoji stvoriti virtualne resurse koji će se zatim dodijeliti VM-ovima na korištenje. Fizičko sklopovlje koje se ovdje upotrebljava su najčešće standardni industrijski poslužitelji koji se često nazivaju *blade*-ovi. Svi resursi kojima NFVI raspolaže mogu se nalaziti na jednom mjestu ili mogu biti geografski rasprostranjeni i raspodijeljeni na više lokacija. Unutar ovog sloja će se ukoliko se govori o VM-ovima nalaziti hipervizor. Važna komponenta NFVI sloja je i VIM (engl. *virtualized infrastructure manager*) koji je vidljiv na desnoj strani slike 5.4. Njegova uloga je upravljanje i kontrola nad cijelim NFVI slojem, briga za životni ciklus (engl. *lifecycle*) VM-ova i izvještavanje o trenutnom stanju sustava [29].

Na VNF sloju se pokreću i izvršavaju VNF-ovi, odnosno virtualizirane mrežne usluge koje zamjenjuju tradicionalne mrežne uređaje ili vlasničko sklopovlje. Pokrenute su unutar VM-ova, no nije nužno da se jedan VNF izvršava isključivo na

jednom VM-u, nego se može izvršavati i na više njih. Ovisno o potrebi pojedinog VNF-a moguće je povećati ili smanjiti broj VM-ova na kojima se isti izvršava, ali i dodijeliti više virtualnih resursa. Za upravljanje i nadzor nad VNF-ovima odgovoran je VNF upravitelj (engl. *manager*) koji je vidljiv s desne strane slike 5.4. Dakle sve radnje poput kreiranja, modificiranja, brisanja, bilježenja podataka (engl. *logging*), alarmiranje u slučaju nepravilnosti ili kvara, kao i upravljanje životnim ciklusom idu preko VNF upravitelja.

Osim VNF-a moguće je u literaturi iz ovog područja pronaći i termin CNF. Prema nekima CNF znači *cloud-native network function* dok ga neki prevode kao *container network function* [30]. Primjenom CNF-a nadilazi se standardna virtualizacija i prelazi se na potpuno *cloud-native* dizajn čine se dostižu nove razine efikasnosti i agilnosti, koje su ključne za implementaciju i puštanje u pogon inovativnih i diferencijabilnih usluga koje tržište i krajnji korisnici žele. Pri tome se kod CNF-a koriste kontejneri čije su prednosti detaljnije objašnjene u prethodnim poglavljima. Radi jednostavnosti u nastavku rada će se nastaviti koristiti isključivo naziv VNF, no gotovo sve objašnjeno će vrijediti i za CNF-ove.

VNF-ovi omogućavaju povećanje skalabilnosti sustava, učinkovitiju upotrebu mrežnih resursa i uštedu u pogledu novca i energije i zauzeća prostora. Može se reći da služe kao domaćini za standardne aplikacije telekom operatora poput HLR-a, MME-a ili GGSN-a. Zato se u praksi veoma često kod telekom aplikacije koje su pokrenute unutar VNF-a dodaje malo v slovo ispred imena kako bi se obznanilo da se radi o virtualnoj aplikaciji, npr. HLR postaje vHLR, MME postaje vMME, a GGSN postaje vGGSN. Ovisno o aplikaciji svakom VNF-u će biti dodijeljeni drugačiji resursi, na primjer vHLR će zahtijevati znatno više resursa u vidu pohrane podataka dok će vGGSN zahtijevati mnogo više resursa za računanje. Također svakome od njih mogu biti dodijeljeni rezervni resursi koji se aktiviraju po potrebi, ali ono što nije moguće jest da u isto vrijeme dva VNF-a pokušaju pristupiti istim resursima, budući su svi logički razdvojeni. Raspodjelu resursa odrađuje NFVI sloj dok predaju zahtjeva i konačnu dodjelu odrađuje VNF upravitelj.

Postoje dva alata, točnije dvije tehnologije koja omogućavaju još efikasnije i brže izvršavanje aplikacija unutar VNF-ova. Prva od njih je SR-IOV (engl. *single root input output virtualization*)

SR-IOV je arhitektura koja omogućava PCIe (engl. *peripheral component interconnect express*) adapterima da postaju samovirtualizirajući. Adapter koji podržava SR-IOV ima mogućnost dijeljenja samog sebe na više dijelova, na više virtualnih šnita (engl. *slice*) uz pomoć logičkih portova [31]. To je moguće bez primjene nekog drugog emulacijskog ili virtualizacijskog alata. Svaka je virtualna šnita direktno dodijeljena nekom VM-u odnosno VNF-u. Dakle VNF ima mogućnost direktnog pristupa NIC-u (engl. *network interface card*) i zaobilazi hipervizora i time se postižu performanse istovjetne onima kao da je aplikacija koju VNF pokreće direktno instalirana i pokrenuta na poslužitelju, a ujedno omogućava dodatnu razinu izolacije i povećanja sigurnosti. Ukoliko bi mrežni promet prolazio kroz hipervizor tada bi za svaki

prijenos od ili prema VM-u došlo do jezgrenog prekida (engl. *system interrupts*), kako bi se zahtjev obradio, a uzme li se u obzir učestalost mrežnih transakcija unutar aplikacija telekom operatora vidljivo je zašto je ovo važna tehnologija. Naravno SR-IOV funkcionalnost moraju podržavati i sklopovlje i OS, dakle mora biti aktivna i u BIOS-u (engl. *basic input output system*) i u OS-u.

Drugi alat je DPDK (engl. *data plane development kit*), a to je skup knjižnica i *driver*-a čija je svrha ubrzavanje obrade paketa kod aplikacija visoke propusnosti (engl. *high throughput*) tako da sam zadatak obrade umjesto tradicionalnog izvršavanja unutar jezgre OS-a obavljaju drugi dijelovi i za to se koriste se drugi resursi. DPDK predstavlja neizostavan alat za izvršavanje gotovo svih aplikacija kod telekom operatora.

Treći sloj NFV radnog okvira je MANO (engl. *management, automation and network orchestration*). Njegove dvije ključne uloge, odnosno njegova dva ključna dijela su prethodno opisani u ovom poglavlju, a to su VIM i VNF upravitelj. VIM je podjednako dio NFVI-a i MANO-a, dok je VNF upravitelj podjednako dio VNF-a i MANO-a. Treći ključni dio je orkestrator (engl. *orchestrator*) što je i vidljivo na slici 5.5.1. Budući su njegova dva ključna dijela prethodno opisana da se zaključiti koje su uloge MANO-a: upravljanje životnim ciklusom resursa kako fizičkim tako i virtualnim, podrška virtualizaciji infrastrukture, upravljanje životnim ciklusom VNF-ova, instanciranje, nadziranje, skaliranje, ažuriranje, terminiranje VNF-ova. Orkestrator je također zadužen za instanciranje, skaliranje i terminiranje VNF-ova, ali u svrhu ispunjavanja zatraženih mrežnih usluga, dakle ima širi pogled na situaciju od VNF upravitelja. Također dijeli sličnu ulogu i s VIM-om pri dodjeli virtualnih resursa, ali ponovno sa višeg gledišta no što je to slučaj kod VIM-a. U pravilu on se ponaša kao upravitelj nad upraviteljima (u ovom slučaju VIM i VNF upravitelj), odnosno on je glavna inteligencija unutar MANO sloja, pa čak i unutar NFV radnog okvira. U pravilu neovisno o složenosti cjelokupne mreže telekom operatora najčešća je izvedba isključivo s jednim orkestratorom koji je zadužen za nadzor cijele mreže.

5.6. SDN

SDN (engl. *software defined networking*) je uz NVF jedna od ključnih transformativnih tehnologija koja je revolucionarizirala tradicionalni pristup planiranju i izradi računalnih mreža u svim sferama, ali pogotovo u telekomunikacijama. SDN donosi programabilni pristup upravljanju mrežom tako što nastoji razdvojiti kontrolnu ravninu (engl. *control plane*) od podatkovne ravnine (engl. *data plane*) i omogućava centraliziranom programu, odnosno kontroloru (engl. *controller*) dinamičko upravljanje mrežnim resursima. Razdvajanje podatkovne i kontrolne ravnine pridonosi fleksibilnosti, agilnosti, skalabilnosti, omogućava mnogo efikasniju i efektivniju mrežnu

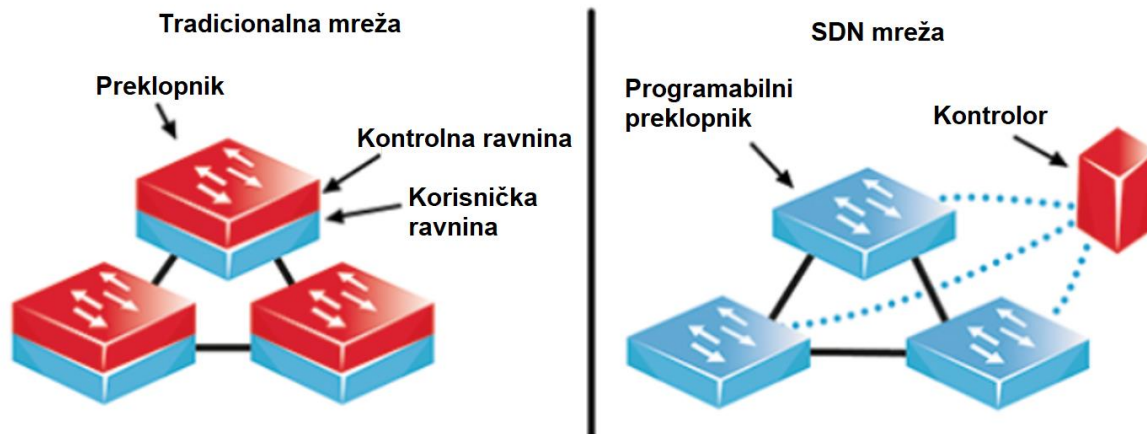
konfiguraciju i optimizaciju. Spajanje i sjedinjenje SDN-a i NFV-a omogućava telekom operatorima stvaranje agilne, odzivne (engl. *responsive*) i ekonomične mreže koja može služiti ne samo optimalnoj primjeni danas nego kao dobar temelj mrežama nove generacije usluga. Iako zajedno polučuju veoma prihvatljive rezultate, SDN i NFV kao tehnologije nisu ovisne jedna o drugoj, tj. jedna može biti implementirana bez druge, ali su veoma kompatibilne i komplementarne i primjena jedne bez primjene druge ne rezultira optimalnom mrežom.

Povezivost (engl. *connectivity*) i dostupnost (engl. *reachability*) mreže mogu predstavljati veliki problem. Za svaki novi čvor u mreži ili za svaku novu uslugu u mreži potrebno je više stvari: potrebna je dodjela IP adresa, alokacija propusnosti (engl. *bandwidth*), otvaranje pristupa (engl. *policy opening*), promjene u usmjeravanju, potrebno je osigurati dostupnost s kraja na kraj i dr. Sve to iziskuje dosta vremena, dizajniranje iziskuje vrijeme, izvršenje promjena iziskuje vrijeme, i sve je to potrebno izvršiti na svim mrežnim elementima (usmjernicima i preklopnicima), a valja napomenuti i da je cijeli postupak sklon pogreškama.

SDN mijenja način kako se sve prethodno navedeno obavlja tako što „inteligenciju“ koja je prethodno bila razdijeljena po cijeloj mreži na mnoštvo manjih i manje sposobnih dijelova nastoji centralizirati. Dakle svo upravljanje i nadzor se sabire u centralni čvor čija je onda dužnost na osnovu odluka razdijeliti nova pravila ostatku mreže.

U tradicionalnim mrežama čvorovi u mreži su spojeni jedni s drugima putem linkova, odnosno sučelja (fizičkih). Po njima se prenose podatci u podatkovnoj ravnini. Kontrolna ravnina služi kako bi se donijele odluke o usmjeravanju i prosljeđivanju. Budući svaki čvor ima svoju „inteligenciju“ tako svaki čvor sam odabire koji je najbolji put za prijenos podataka. Te odluke su donesene na osnovu predefiniranih ruta koje čvorovi imaju pohranjene u sebi i na osnovu ruta koje je čvor naučio od svojih susjednih čvorova. Ukoliko se radi o veoma složenoj mreži tada postoji mogućnost da budući čvorovi komuniciraju isključivo s čvorovima u svojoj blizini neće biti svjesni da je neki drugi čvor ili dio mreže prestao raditi i nastavljaju usmjeravati promet rutom koja ne samo da više nije optimalna nego je možda i potpuno beskorisna. Kontrolna ravnina služi za izvođenje operacija upravljanja mrežom. Uz pomoć nje moguće je odraditi konfiguraciju ili rekonfiguraciju čvorova, generiranje i dohvaćanje izvještaja, dobivanje upozorenja i alarma i sl. Kod tradicionalnih mreža je potrebno pristupati svakom čvoru odvojeno tako da posao upravljanja postaje veoma zamoran, nepotrebno iscrpljuje resurse i često rezultira greškama.

U mreži unutar koje je implementirana SDN tehnologija glavna „inteligencija“ mreže je centralizirana i odvojena od podatkovne ravnine. Slika 5.5. prikazuje koncept SDN mreže uz usporedbu s tradicionalnom mrežom.



Slika 5.5: Usporedba tradicionalne i SDN mreže

Izvor: [32]

Mreža kod koje je implementirana SDN tehnologija postaje programabilna, odnosno upravljanje mrežom postaje programabilno upravo zbog centraliziranog kontrolora. Možda je najvažnija značajka SDN tehnologije njena mogućnost apstrakcije mrežne infrastrukture koja time operatoru mreže omogućava dinamičku dodjelu i provizioniranje propusnosti, automatiziranu skalabilnost, mogućnost implementacije i pokretanja novih usluga i čvorova i sve to s jednog, centralnog, mjesta.

Naravno, ovakav način upravljanja zahtijeva i poseban protokol pomoću kojega će svi čvorovi u mreži ostvariti opisanu komunikaciju. Iako postoji više rješenja de-facto protokol je *OpenFlow*. Radi se o protokolu otvorenog kôda (engl. *open source*) koji je razvila *Open Networking Foundation* upravo za potrebe promocije i usvajanja SDN-a kao standarda [33]. Upravo je priroda otvorenog kôda uvjetovala toliko široku zastupljenost *OpenFlow* protokola i omogućila razvoj mreža koje su sastavljene od mnoštva čvorova koji pripadaju različitim isporučiteljima i uvelike promijenila tradicionalni način izrade mreža i nezamislivo ubrzala sposobnost mreža ka adaptaciji novim čvorovima i uslugama. U nekim, potpuno automatiziranim slučajevima, takav proces može trajati svega nekoliko sekundi.

6. ANALIZA POSTOJEĆIH MREŽA PETE GENERACIJE I POPRATNIH TEHNOLOGIJA

Unutar ovog poglavlja nastojat će se objasniti različite vrste 5G mreža koje su danas u primjeni i koje su dio standardizacije koju provodi 3GPP. Također će se поближе objasniti pojedine tehnologije koje su ključne za ispravno funkcioniranje 5G mreže, te će se napraviti poveznica sa sustavima koji su opisani u prethodnim poglavljima.

6.1. OPCIJE IMPLEMENTACIJE

3GPP je specificirao više opcija implementacije (engl. *deployment options*) 5G mreže znajući da neće biti moguće naglo prijeći na 5G mrežu. Takav prelazak nije moguć i zbog krajnjeg korisnika, budući većina i dalje ne posjeduje 5G mobilni terminalni uređaj, a niti zbog samog operatora koji mora uložiti velike količine resursa u tehnologiju koju će, barem trenutno, malo korisnika koristiti. Osim toga razlozi uvođenja 5G-a navedeni u 4. poglavlju, poput primjene u raznim granama industrije, također ne mogu preko noći biti ostvareni. Poslovni subjekti iz raznih industrijskih grana također bi trebali uložiti znatne resurse sa svoje strane kako bi sve navedene funkcionalnosti 5G bile ostvarive. Zbog svega navedenog došlo je do specifikacije različitih opcija koje se može promatrati kao korake koji vode ka završnom cilju, potpunoj 5G mreži. Specifikacija tih opcija dana je u 3GPP dokumentu pod referentnim brojem 38.801 [34].

Kako će biti pokazano, operator u pravilu može tvrditi da posjeduje 5G mrežu bez da je uložio u 5G jezgrenu mrežu, i ovo je upravo slučaj u većini zemalja svijeta, gdje je operator uložio u 5G pristupnu mrežu, no i dalje se koristi EPC za procesiranje i komunikaciju s ostalim mrežama. Čvorovi koji će se koristiti na slikama su dva jezgrena elementa, EPC koji je jezgrena mreža četvrte generacije i 5GC koji je jezgrena mreža pete generacije. Što se tiče elemenata jezgrene mreže to su gNB, bazna postaja pete generacije koja koristi NR zračno sučelje i koja se spaja na 5GC. Zatim eNB bazna postaja četvrte generacije koja koristi E-UTRA i spaja se na EPC. Postoje i dva dodatna elementa, jedan od njih je prikazan u 4. poglavlju na slici 4.1.1, a to je ng-eNB (u nekim izvorima koristi se i termin eLTE eNB) koji je evoluirana eNB bazna postaja koja koristi E-UTRA, no ima mogućnost spajanja i na EPC i na 5GC. Zadnji element je en-gNB, posebna verzija gNB bazne postaje koji koristi NR sučelje, ali osim mogućnosti povezivanja na 5GC također se može povezati i na EPC.

Postoji još jedna važna podjela, a to je podjela na *standalone* (samostalne) i *non-standalone* (nesamostalne) opcije. U literaturi se često koriste kratice SA za

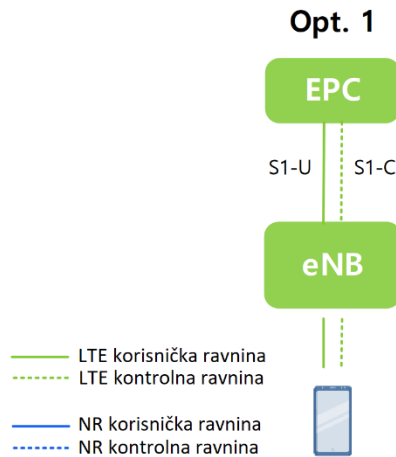
standalone i NSA za *non-standalone* opciju. Pod SA spadaju opcije kod kojih postoji samo jedan element kod pristupne mreže, dok u NSA spadaju opcije koje istovremeno koriste dvije pristupne tehnologije. Kod NSA opcija UE ima mogućnost biti povezan na dvije bazne postaje drugačijih generacija uz pomoć MR-DC (engl. *Multi-Radio Dual Connectivity*). U takvoj konfiguraciji jedan čvor preuzima ulogu gospodara, MN (engl. *Master Node*), dok drugi čvor preuzima sekundarnu ulogu, SN (engl. *Secondary Node*). MN je povezan s SN i za jezgrenom mrežom, dok je SN spojen isključivo s MN-om i preko MN-a komunicira s jezgrenom mrežom (postoje iznimke koje će biti navedene u nastavku). UE ima mogućnost povezivanja i na MN i SN ili može komunicirati sa SN preko MN-a. Ovisno o konfiguraciji koji je element MN, a koji SN koristi se drugačija terminologija za MR-DC, kako je prikazano u tablici 2.1.

Tablica 6.1: Nazivi različitih MR-DC konfiguracija

Popis	Pripadajuća jezgrena mreža	Pridružena opcija	Opis
E-UTRA-NR dvojna povezivost (EN-DC)	EPC	Opcija 3	eNB ima ulogu MN-a i en-gNB ima ulogu SN-a
NR-E-UTRA dvojna povezivost (NE-DC)	5GC	Opcija 4	gNB ima ulogu MN-a i ng-eNB ima ulogu SN-a
NE-RAN E-UTRA-NR dvojna povezivost (NGEN-DC)	5GC	Opcija 7	ng-eNB ima ulogu MN-a i gNB ima ulogu SN-a
NR-NR dvojna povezivost (NR-DC)	5GC	Opcija 2	Jedan gNB ima ulogu MN-a, a drugi gNB ima ulogu SN-a

Izvor: [35]

Opcija 1 prikazana je na slici 6.1. U pravilu se radi o postojećoj situaciji na LTE mreži.

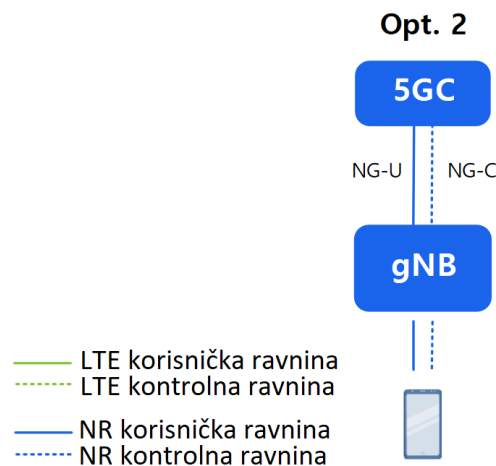


Slika 6.1: 5G Opcija 1

Izvor: [35]

Opcija 1 je SA opcija, gdje postoji EPC jezgrena mreža koja je na korisničkoj i na kontrolnoj ravnini komunicira s eNB čvorom pristupne mreže preko S1 sučelja. Iako u ovoj opciji ne postoje 5G elementi niti u jezgrenoj, niti pristupnoj mreži ova opcija se u literaturi često svrstava kao jedan od koraka u implementaciji 5G mreže.

Opcija 2 prikazana je na slici 6.2. Radi se o potpunoj 5G SA mreži



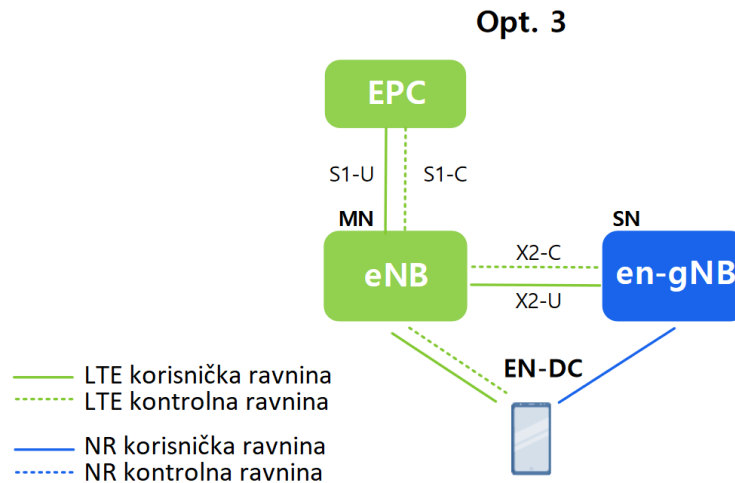
Slika 6.2: 5G Opcija 2

Izvor: [35]

U ovoj opciji je gNB povezan s 5GC-om na korisničkoj i kontrolnoj ravnini. Može se reći kako je Opcija 2 konačni cilj 5G migracije. Ovu opciju ima smisla direktno implementirati ukoliko operator na području namjere izgradnje nije do tada imao

nikakvu drugu mobilnu mrežu (engl. *greenfield*). Ova opcija može u potpunosti ponuditi sve usluge koje 5G nudi, a najvažnije *network slicing*.

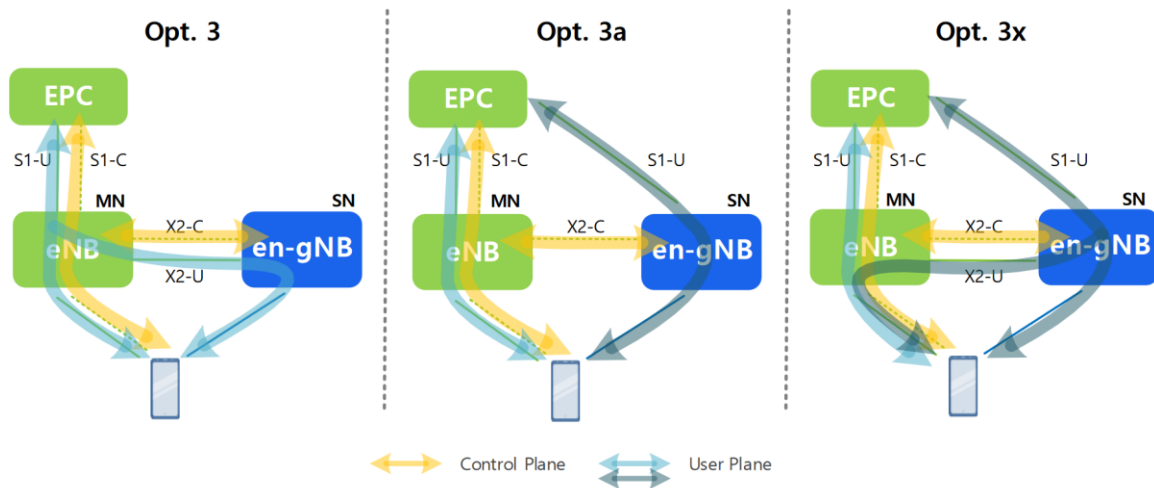
Opcija 3 je danas najpopularnija opcija, radi se o NSA opciji i prikazana je na slici 6.3.



Slika 6.3: 5G Opcija 3

Izvor: [35]

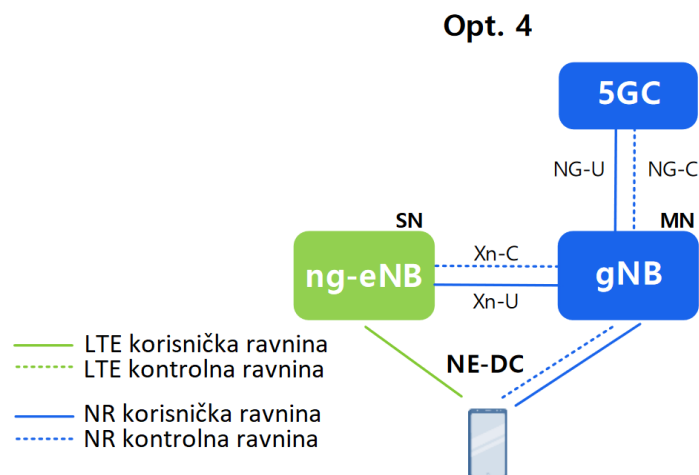
Jezgrena mreža je EPC, dok su elementi pristupne mreže en-gNB za NR sučelje i eNB za E-UTRA sučelje. EPC i eNB su povezani S1 sučeljem na korisničkoj i kontrolnoj ravnini, a eNB koji je u ovom slučaju MN komunicira s en-gNB-om, koji je SN, putem X2 sučelja na korisničkoj i kontrolnoj ravnini. UE je povezan s eNB-om na kontrolnoj ravnini, a na korisničkoj ravnini povezan je i s en-gNB-om i s eNB-om. U ovoj opciji en-gNB ne može komunicirati s EPC-om, stoga cijeli promet (na obje ravnine) mora proći preko eNB-a. Podjela podataka korisničke ravnine odvija se na PDCP (engl. *packet data convergence protocol*) sloju eNB-a, te se promet namijenjen en-gNB-u šalje preko X2 sučelja. Opcija 3 je logičan korak u implementaciji 5G mreže budući većinu posla još uvijek obavlja postojeća pristupna i jezgrena mreža četvrte generacije. No postoji jedan nedostatak kod ove opcije, a to je što je 5G mreža zamišljena i dizajnirana za prijenos mnogo veće količine podataka i s mnogo većim brzinama u odnosu na LTE mrežu, što bi značilo da cijeli promet mora prolaziti preko eNB-a koji jednostavno nisu bili zamišljeni za takav promet. Dakle, ukoliko se operator odluči za ovu opciju osim ulaganja u 5G bazne stanice morao bi nadograditi i postojeće bazne stanice prije bilo kakve implementacije 5G-a. Kako bi se to izbjeglo došlo je do redizajna opcije 3, odnosno njene nadogradnje na druge dvije opcije, a to su opcija 3a i opcija 3x koje su prikazane na slici 6.4.



Slika 6.4: 5G Opcija 3, Opcija 3a i Opcija 3x, [35]

Opcija 3a dodaje S1-U sučelje između en-gNB-a i EPC-a. eNB i dalje pruža povezivanje na kontrolnoj ravnini gNB-u, tako da je i dalje en-gNB SN, dok je eNB MN. Podjelu podataka korisničke ravnine sada odrađuje EPC i promet namijenjen en-gNB-u šalje direktno njemu putem S1-U sučelja, dok promet namijenjen eNB-u prosljeđuje putem njihovog S1-U sučelja. Ovakvim pristupom je riješen nedostatak opcije 3 i moguće je pružiti mnogo veće brzine pristupa bez potrebe značajnije nadogradnje eNB-ova. No i ova opcija ima jedan nedostatak, a to je nemogućnost slanja podataka korisničke ravnine od en-gNB-a prema eNB-u. Ukoliko je 5G signal odličan to neće nužno predstavljati problem, no ukoliko se UE nalazi na području koje nije potpuno pokriveno 5G signalom, ali je LTE signalom tada taj nedostatak dolazi do izražaja, budući en-gNB koji je upravo izgubio komunikaciju s UE-om ne može promet poslati prema eNB-u, budući nema X2-C sučelja. Kako bi se riješio i taj nedostatak opcija 3 je ponovno redizajnirana i osmišljena je opcija 3x. U pravilu opcija 3x je spoj opcije 3 i opcije 3a. U opciji 3x en-gNB i eNB mogu ponovno komunicirati i slati podatke korisničke ravnine preko X2-C sučelja. Razdvajanje podataka korisničke ravnine se i dalje odvija na EPC-u, budući je S1-C sučelje između EPC-a i en-gNB-a i dalje prisutno. Ukoliko se operator odluči za uvođenje prvo pristupne mreže, pa tek kasnije i jezgrene mreže pete generacije, najlogičniji korak bi bio odabir opcije 3x.

Opcija 4 prikazana je na slici 6.5, radi se o NSA opciji koja kao jezgrenu mrežu, za razliku od opcije 3, koristi 5GC.

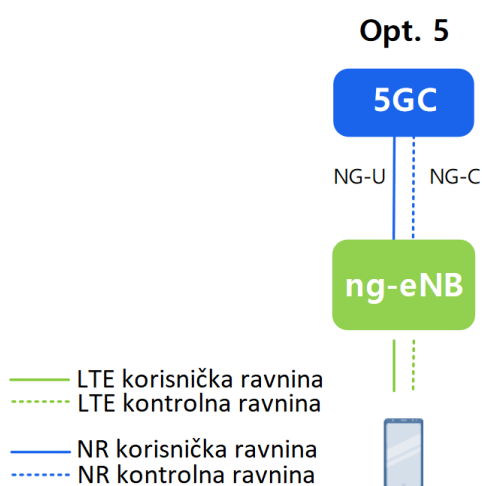


Slika 6.5: 5G Opcija 4

Izvor: [35]

5GC je povezan s gNB-om putem NG sučelja na korisničkoj i kontrolnoj ravnini, dok je ng-eNB povezan s gNB-om putem Xn sučelja na korisničkoj i kontrolnoj ravnini. U ovoj opciji gNB je MN, dok je ng-eNB SN. Također je potrebno odraditi i nadogradnju eNB-a na ng-eNB kako bi mogao komunicirati s 5GC-om. Slično kao kod opcije 3 postoji redizajn opcije 4 na opciju 4a gdje je Xn-C sučelje između gNB i ng-ENB-a zamijenjeno NG-U sučeljem prema 5GC-u. Tako da kod opcije 4 razdvajanje podataka korisničke ravnine se odvija na PDCP sloju gNB-a, dok se kod opcije 4a razdvajanje odvija u samom 5GC-u. UE na kontrolnoj ravnini razgovara isključivo s gNB-om.

Opcija 5 prikazana je na slici 6.6, radi se o SA opciji unutar koje je ng-eNB povezan s 5G jezgrenom mrežom putem NG sučelja na korisničkoj i kontrolnoj ravnini.

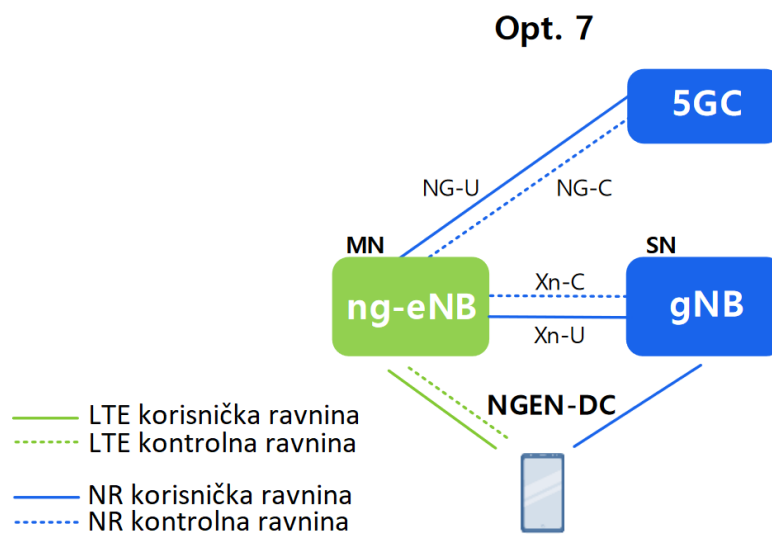


Slika 6.6: 5G Opcija 5

Izvor: [35]

Ova opcija omogućava operatoru implementaciju 5G jezgrene mreže, bez uvođenja novog zračnog sučelja, odnosno bez implementacije g-NB baznih postaja. No i dalje je potrebno nadograditi postojeće eNB čvorove na ng-eNB. Ova opcija će omogućiti neke od naprednih mogućnosti poput *network slicing*-a, no neće biti moguće koristiti prednosti pristupne mreže poput gigabitnih brzina. Mogući razlog uvođenja ove opcije bila bi ušteda na pristupnom dijelu mreže ili ukoliko se radi o operatoru koji nije dobio frekvencijsku koncesiju i ne može koristiti frekvencijske opsege predviđene za 5G.

Opcija 7 prikazana je na slici 6.7. i ona je NSA opcija koja za jezgrenu mrežu koristi 5GC.



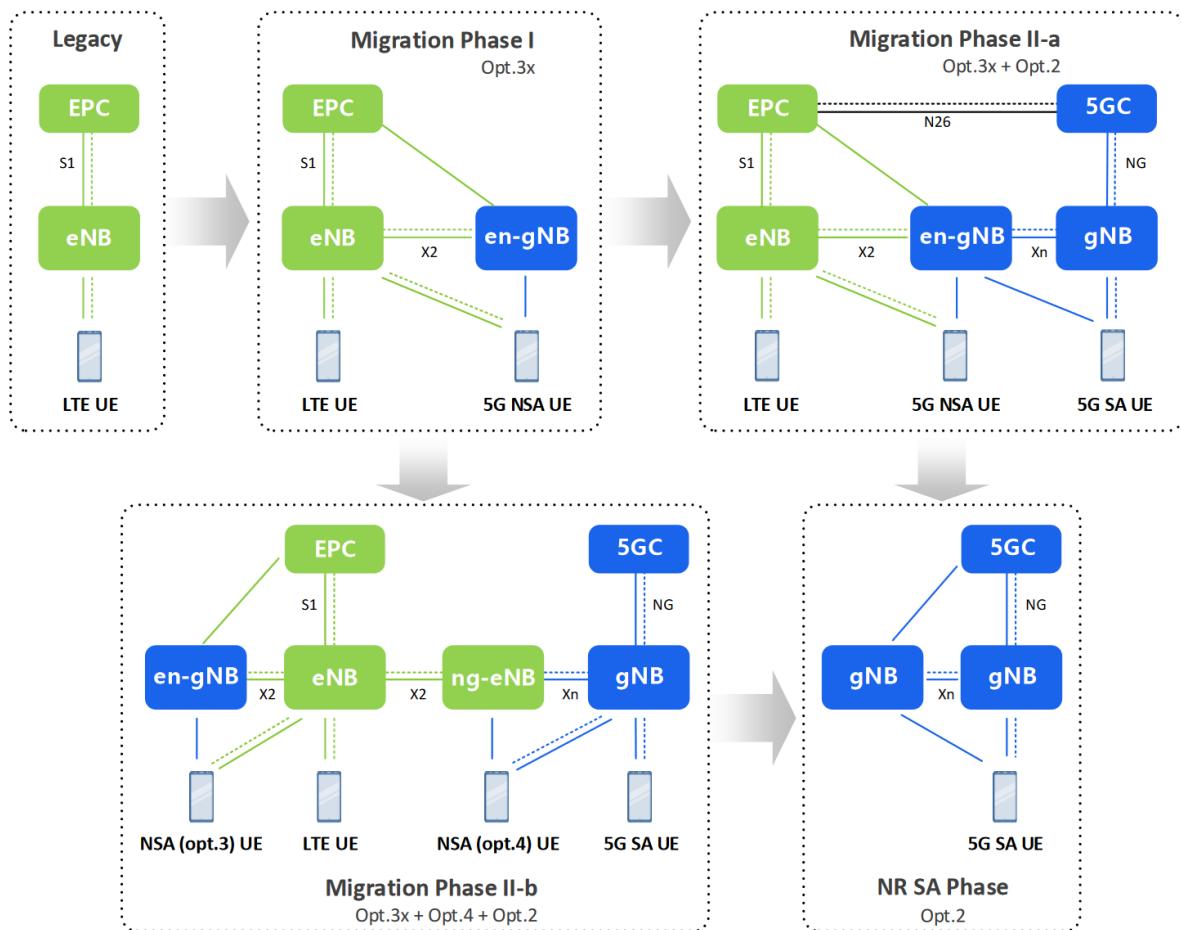
Slika 6.7: 5G Opcija 7

Izvor: [35]

Opcija 7 je slična opciji 5 samo uz dodatak gNB-a. gNB je u ovoj opciji SN, dok je ng-eNB MN. Komunikacija između 5GC-a i ng-eNB-a odvija se putem NG sučelja na korisničkoj i kontrolnoj ravnini, a komunikacija između gNB-a i ng-eNB-a odvija se putem Xn sučelja na obje ravnine. UE na kontrolnoj ravnini komunicira isključivo s ng-eNB-om dok na korisničkoj ravnini može komunicirati s oba elementa. Razdvajanje podataka korisničke ravnine odvija se na PDCP sloju ng-eNB-a. Opcija 7 ima daljnju podjelu na opciju 7a i opciju 7x koje su istovjetne podjeli opcije 3, dakle dodavanje NG-U sučelja između 5GC-a i gNB-a i uklanjanje Xn-U sučelja između ng-eNB-a i gNB-a kod opcije 7a. Dok kod opcije 7x XN-U sučelje ostaje samo se dodaje NG-U sučelje između 5GC-a i gNB-a.

Operatoru se pruža mogućnost odabira, želi li odmah uložiti resurse i odlučiti se za SA mrežu, odnosno opciju 2 ili želi odraditi postepenu migraciju lagano dodajući

funkcionalnosti 5G mreže u svoj ekosustav. Slika 6.8. prikazuje predložene scenarije ukoliko operator odabere postepenu migraciju.



Slika 6.8: Postepena migracija od 4G prema 5G mreži, [35]

Najbolji prvi korak je odabir opcije 3x. Ovo je ujedno i situacija u Hrvatskoj, svi operatori koji nude 5G funkcionalnost trenutno nude NSA 5G mrežu, koja je omogućila znatno veće brzine (no ne i najveće koje se postižu korištenjem milimetarskih valova), no funkcionalnosti poput *network splicing*-a još uvijek nisu moguće. Sljedeći korak je podijeljen na dvije mogućnosti. Jedna je uvođenje 5GC jezgrene mreže koja se nadovezuje na postojeću infrastrukturu, tj. povezuje s en-gNB i koja putem N26 sučelja omogućuje komunikaciju između 5GC-a i EPC-a na kontrolnoj i korisničkoj ravnini. Druga mogućnost je prelazak na opciju 4, koja bi osim 5GC u jezgrenoj mreži uvela i ng-eNB na pristupnoj mreži. U tom slučaju bi bilo četiri različita elementa na pristupnoj mreži: gNB, eNB, en-gNB i ng-eNB. Razlog tomu bi mogla biti potreba za pokrivanjem što većeg broja terminalnih uređaja. Naime uređaji koji mogu raditi na 5G-u ne rade nužno na 5G SA i na 5G NSA. Dodatno terminalni uređaji koji rade na 5G NSA možda ne rade samo na ng-eNB, ali ne rade na en-gNB i obratno. Neovisno o odabiru mogućnosti iz drugog koraka, treći i zadnji korak je isti, a to je konačni cilj: potpuni prelazak na opciju 2 i potpuna implementacija 5G SA mreže.

6.2 GLASOVNE USLUGE U 5G MREŽI

Iako je 5G mreža zamišljena kao podatkovna mreža koja će omogućiti prijenos informacija do sada neviđenim brzinama, koja će omogućiti povezivanje do sada nezamislivog broja uređaja, koja će smanjiti vrijeme kašnjenja u prijenosu paketa, i dalje je to mreža koja mora pružiti glasovne usluge. Kako je već spomenuto 5G mreža je isključivo mreža s komutacijom paketa, dakle ne posjeduje elemente unutar svoje jezgre koji rade na principu komutacije kanala. Komutacija kanala je bio glavni način prijenosa glasa u mrežama druge i treće generacije. U pravilu isti problem s manjkom sustava za komutaciju kanala imala je i LTE mreža koja je također isključivo mreža bazirana na komutaciji paketa. Način na koji se to rješavalo, u početku, kod LTE mreže bio je postupak spuštanja na mreže druge i treće generacije, odnosno spuštanje konekcije na mrežu s komutacijom kanala, CSFB (engl. *circuit switched fallback*). Daljnjim razvojem standardizacije i implementacijom novih tehnologija unutar LTE mreže je omogućeno korištenje glasovnih usluga primjenom komutacije paketa, točnije primjenom IP protokola. To rješenje je bilo VoLTE (engl. *Voice over LTE*). U suštini bio je potrebno implementirati potpuno novi sustav koji bi omogućio prijenos glasa putem IP-a. Taj sustav je IMS koji je detaljno opisan u 3. poglavlju. Registracija na IMS sustav i uspostava VoLTE poziva detaljno su već prikazani i opisani dijagramom na slici 3.2 u 3. poglavlju.

Dakle u LTE mreži su postojale dvije mogućnosti kako ostvariti glasovni poziv CSFB ili VoLTE. Što se tiče 5G mreže stvari su malo drugačije, ali sličnosti itekako postoje. U prethodnom potpoglavlju je objašnjeno da postoje dvije glavne podjele 5G mreža, a to su *standalone SA* i *non-standalone NSA*. Ovisno o tome koji je od tih modela upotrijebljen za 5G mrežu biti će omogućeni drugačiji načini prijenosa glasovnog prometa.

Ukoliko postoji NSA 5G mreža koja nije jedna od opcija koje koriste 5GC, tada je UE u *dual connectivity* načinu rada, kako je i opisano u prethodnom potpoglavlju, odnosno prijavljen je i na eNB i na gNB. Ukoliko LTE mreža nema omogućen VoLTE tada je jedini način da UE ostvari glasovni poziv CSFB. eNB je MN element i sva signalizacija ide preko njega, te će ukoliko korisnik odluči uspostaviti poziv ili se dogodi dolazni poziv prema korisniku LTE mreža to prepoznati i odraditi CSFB na dostupnu mrežu druge ili treće generacije. Ukoliko LTE mreža ima omogućen VoLTE tada će se poziv odraditi identično kako je objašnjeno u 3. poglavlju. U pravilu kod 5G NSA mreža zbog *dual connectivity*-ja glasovni poziv koji za svoj prijenos i uspostavu koristi glasovni EPS nosilac nema previše veze s 5G dijelom. eNB je taj koji je MN čvor tako da on signalizira UE-u da se treba prebaciti na LTE kako bi se poziv uspješno odradio.

Ukoliko postoji SA 5G mreža tada više ne postoji mogućnost koristiti CSFB. No i dalje postoje dvije mogućnosti. Jedna od njih je spuštanje na EPS mrežu (engl. *EPS fallback*), dok je druga VoNR (engl. *Voice over New Radio*). *EPS fallback* omogućava da ukoliko UE želi odraditi odlazni poziv ili ukoliko je prema njemu upućen dolazni

poziv dok je UE na 5G mreži, dobije potvrdu da se prebaci na LTE. U tom slučaju se koriste i jezgrena LTE mreža EPC i pristupna LTE mreža E-UTRA. Nakon toga poziv se obrađuje kao VoLTE poziv. Napomena da je za ovakav pristup dobro imati N26 sučelje jer pojednostavljuje prebacivanje s 5G na LTE. Postoji još jedna podvrsta EPS *fallback*-a, a to je RAT (engl. *radio access technology*) *fallback*. U ovom slučaju se i dalje signalizira UE-u da se prebaci na LTE mrežu, odnosno da se spoji na eNB, ali se za prijenos signalizacije koristi 5GC. VoNR je tehnologija koja omogućava prijenos glasovnih poziva preko potpune 5G mreže, uključujući njen jezgreni kao i pristupni dio, koristeći IMS. U VoNR-u glasovni pozivi se obavljaju na sličan način kao i VoLTE pozivi. Registracija i uspostava poziva u pravilu su jednaki tako da je moguće dijagramom na slici 3.2 iz 3. poglavlja opisati i VoNR poziv, a ne samo VoLTE poziv. Razlika je naravno u komunikaciji prema IMS-u, budući se koristi 5GC umjesto EPC-a. Tako da se umjesto komunikacije između PGW-a i P-CSCF-a komunikacija odvija između UPF-a i P-CSCF-a, također preko Gm sučelja. Još jedna razlika je indikator kvalitete usluge. U 2. i 3. poglavlju objašnjen je indikator kvalitete usluge s oznakom QCI, koji se dodjeljuje svakom EPS nosiocu. No kod 5G SA mreže ne postoje EPS nosioci, nego QoS tokovi (engl. *QoS flow*), te je svaki od njih označen 5QI (engl. *5G QoS identifier*) oznakom. Radi konzistentnosti između generacija i budući se IMS sustav treba koristiti istovremeno za više tehnologija, same vrijednosti se nisu mijenjale. QoS *flow* koji se kreira radi prijenosa SIP signalizacije i dalje će imati vrijednost 5, dok će QoS *flow* koji služi prijenosu glasovnih paketa imati vrijednosti 1.

6.3 EDGE COMPUTING

Edge computing, odnosno računalstvo na rubu, rješava ograničenja i probleme s kašnjenjem u telekomunikacijskim uslugama tako da premješta mogućnosti jezgrene mreže i računarstva u oblaku bliže rubu mreže, odnosno bliže krajnjem korisniku. Time se smanjuje fizička udaljenost koju paketski promet treba prijeći da bi došao do svog odredišta. Osim što Edge Computing značajno smanjuje vrijeme kašnjenja, dodatno i optimizira tokove podataka, poboljšava sigurnost, privatnost, pouzdanost i važno za operatora smanjuje preopterećenost centralnog dijela mreže budući da se tokovi podataka ne trebaju više usmjeravati isključivo preko centralnog dijela, niti ima potrebe za prodiranjem podatkovnog toka duboko u mrežu.

Distribuirana priroda *edge computing* paradigme omogućuje razne poslovne potencijale i nove slučajeve upotrebe, poput autonomnih vozila, industrijskog IoT-a i aplikacija u stvarnom vremenu (engl. *real time applications*). Zbog svega navedenog jasno je zašto je edge computing važan za 5G i zašto je naprednije karakteristike 5G mreže poput *network slicinga* nemoguće pravilno primjenjivati bez njega. Naravno *edge computing* nije isključivo razvijen radi korištenja u 5G mreži, no može se reći da

je njegov ključni dio. Jedan od važnijih primjera je MEC (engl. *multi-access edge computing*) razvijen od strane ETSI-a. MEC je zamišljen kao sustav koji pruža IT okruženje i mogućnosti računarstva u oblaku na samom rubu pristupne mreže koja podržava jednu ili više pristupnih tehnologija i nalazi se u blizini svojih korisnika [36]. Primjer takvog sustava bio bi primjena računalnog oblaka koji bi za određeni grad upravljano komunikacijom između autonomnih vozila. Takva komunikacija bi bila izrazito brza, budući bi sva računalna moć bila sadržana unutar samog grada (ili naselja).

Sve navedeno bilo bi u potpunosti nemoguće izvesti bez primjene virtualizacijskih tehnologija. Kao što je detaljno opisano u 5. poglavlju virtualizacija omogućava dinamičko skaliranje, učinkovito korištenje resursa i brzo implementiranje usluga. U kontekstu *edge computing*-a to bi značilo da se računalni resursi potrebni nekoj aplikaciji ili virtualiziranoj funkciji mogu dinamički dodjeljivati i optimizirati prema trenutnim potrebama, ali isto tako i oduzimati ukoliko se prometno opterećenje odjednom smanji. Sve prethodno opisano usko je vezano za dodjeljivanje „odsječaka mreže“ koji je objašnjen u 4. poglavlju. U tom poglavlju je navedeno i kako se konačna identifikacija *slice*-a naziva NSI ID, gdje prvo slovo „i“ označava instancu, što je termin koji se koristi kod virtualizacije. Dakle virtualizacija je ključna za bilo kakvu dodjelu, odnosno podjelu mreže na *slice*-ove i primjenu *edge computing*-a, budući da bi bez nje za svaki pojedini *slice* ili za svaku pojedinu aplikaciju ili funkciju unutar *edge computing* paradigme bilo potrebno dodjeljivati i nabavljati fizičke uređaje, što je zaista nepraktično i potencijalno nemoguće, te bi onemogućilo dinamičku prirodu samih tih aplikacija i funkcija, njihovo nastajanje i nestajanje.

7. ZAKLJUČAK

Razvoj 5G mreže predstavlja ključni korak naprijed u evoluciji telekomunikacijskih tehnologija, pružajući značajna poboljšanja u brzini, kapacitetu, pouzdanosti i vremenu kašnjenja u usporedbi sa svojim prethodnikom, 4G LTE mrežom. Implementacija 5G mreže ne samo da nadmašuje tehničke specifikacije 4G mreže, već otvara vrata potpuno novim primjenama i uslugama koje su dosad bile nezamislive.

Jedan od najvažnijih aspekata 5G mreže je njena sposobnost da podrži masivnu povezanost uređaja putem Interneta stvari (IoT), što je ključno za razvoj pametnih gradova, industrijske automatizacije i napredne zdravstvene skrbi. Nisko vrijeme kašnjenja i visoka pouzdanost 5G mreža omogućuju razvoj kritičnih aplikacija poput autonomnih vozila i kirurgije na daljinu.

Integracija IMS tehnologije unutar 5G mreže omogućuje pružanje naprednih multimedijских usluga i podršku za VoNR, poboljšavajući kvalitetu komunikacije i korisničko iskustvo. IMS također omogućava bolju interoperabilnost između različitih mreža i uređaja, čime se osigurava besprijekoran prijenos podataka i usluga.

Virtualizacija je još jedan ključni element u okviru 5G mreže, omogućavajući fleksibilnije i efikasnije upravljanje mrežnim resursima. Korištenjem tehnologija kao što su *Network Function Virtualization (NFV)* i *Software-Defined Networking (SDN)*, operateri mogu brzo prilagoditi i optimizirati mrežne resurse prema potrebama korisnika i aplikacija. Ova fleksibilnost doprinosi smanjenju operativnih troškova i povećanju efikasnosti mrežnog upravljanja.

Uvođenje računarstva na rubu (*Edge Computing*) dodatno poboljšava performanse 5G mreža smanjenjem vremena kašnjenja i omogućavanjem lokalne obrade podataka. Ovo je posebno važno za aplikacije koje zahtijevaju brzu reakciju i velike količine podataka, kao što su autonomna vozila i industrijski IoT.

Zaključno, 5G mreža predstavlja tehnološku revoluciju koja će transformirati način na koji ljudi žive, rade i komuniciraju. Njena superiornost u odnosu na 4G mreže, uz integraciju IMS tehnologije, virtualizacije i računarstva na rubu, omogućit će razvoj novih inovacija i usluga koje će oblikovati budućnost. Uvođenjem 5G mreže, društvo će iskoristiti sve prednosti napredne tehnologije, otvarajući put ka pametnijoj, povezanijoj i tehnološki naprednijoj budućnosti.

LITERATURA

- [1] ITU The World in 2010. ICT Facts and Figures; 2010. Preuzeto s: <https://www.itu.int/ITU-D/ict/material/FactsFigures2010.pdf> [Pristupljeno: kolovoz 2024.]
- [2] Morgan Stanley Research: The Mobile Internet Report December 2009; 2009. Preuzeto s: <https://core.ac.uk/download/pdf/30675138.pdf> [Pristupljeno: kolovoz 2024.]
- [3] Internet Engineering Task Force. Introduction to the IETF. Preuzeto s: <https://ietf.org/about/introduction/> [Pristupljeno: kolovoz 2024.]
- [4] Poikselka, Mayer i dr. The IMS IP Multimedia Concepts and Services in the Mobile Domain. West Sussex: Wiley; 2004.
- [5] 3GPP. TSG Rel-20 timeline & content; 2024. Preuzeto s: <https://www.3gpp.org/specifications-technologies/releases/release-20> [Pristupljeno: kolovoz 2024.]
- [6] ETSI. ETSI TS 136 300 V18.1.0. 2024. Preuzeto s: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136300_136399/136300/18.01.00_60/ts_136300v180100p.pdf [Pristupljeno: kolovoz 2024.]
- [7] Yate BTS. LTE Architecture Concepts; 2021. Preuzeto s: <https://yatebts.com/documentation/concepts/lte-concepts/> [Pristupljeno: kolovoz 2024.]
- [8] ETSI. ETSI TS 123 401 V18.6.0; 2024. Preuzeto s: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/123400_123499/123401/18.06.00_60/ts_123401v180600p.pdf [Pristupljeno: kolovoz 2024.]
- [9] ETSI. ETSI TS 135 205 V13.0.0; 2016. Preuzeto s: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/135200_135299/135205/13.00.00_60/ts_135205v130000p.pdf [Pristupljeno: kolovoz 2024.]
- [10] 3GPP A Global Initiative. 3GPP Releases; 2024. Preuzeto s: <https://www.3gpp.org/specifications-technologies/releases> [Pristupljeno: kolovoz 2024.]
- [11] ETSI. ETSI TS 123 228 V18.5.0; 2024. Preuzeto s: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/123200_123299/123228/18.05.00_60/ts_123228v180500p.pdf [Pristupljeno: kolovoz 2024.]
- [12] Poikselka M., Holma H., Hongisto J., Kallio J. Toskala A. Voice Over LTE VoLTE. West Sussex: Wiley; 2012.

- [13] ETSI. ETSI TS 123 501 V18.6.0; 2024. Preuzeto s: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/123500_123599/123501/18.05.00_60/ts_123501v180500p.pdf
[Pristupljeno: kolovoz 2024.]
- [14] ETSI. ETSI TS 138 300 V18.1.0; 2024. Preuzeto s: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138300_138399/138300/18.01.00_60/ts_138300v180100p.pdf
[Pristupljeno: kolovoz 2024.]
- [15] ETSI. ETSI TS 138 420 V18.1.0; 2024. Preuzeto s: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138400_138499/138420/18.01.00_60/ts_138420v180100p.pdf
[Pristupljeno: kolovoz 2024.]
- [16] Cisco. 5G Architecture;2022. Preuzeto s: https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/wireless/ucc/amf/2022-01/config-and-admin/b_ucc-5g-amf-config-and-admin-guide_2022-01/m_5garchitecture.pdf [Pristupljeno: kolovoz 2024.]
- [17] ETSI. ETSI TS 133 501 V18.6.0; 2024. Preuzeto s: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/133500_133599/133501/18.06.00_60/ts_133501v180600p.pdf
[Pristupljeno: kolovoz 2024.]
- [18] 3GPP A Global Initiative. 5G Network slice management; 2023. Preuzeto s: <https://www.3gpp.org/technologies/slice-management> [Pristupljeno: kolovoz 2024.]
- [19] ITU-R. IMT Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond. Geneva: Electronic Publication Geneva; 2015.
- [20] WM Ware. What is virtualization?; 2024. Preuzeto s: <https://www.wmware.com/solutions/virtualization.html> [Pristupljeno: kolovoz 2024.]
- [21] WM Ware. What is a hypervisor?; 2023. Preuzeto s: <https://www.wmware.com/content/vmware/vmware-published-sites/us/topics/glossary/content/hypervisor.html>
[Pristupljeno: kolovoz 2024.]
- [22] Disk Internals, Ltd. What are Hypervisors?; 2024. Preuzeto s: <https://diskinternals.com/raid-recovery/type-1-hypervisor-vs-type-2-hypervisor>[Pristupljeno: kolovoz 2024.]
- [23] Docker Inc. Docker Overview; 2024. Preuzeto s: <https://docs.docker.com/>
[Pristupljeno: kolovoz 2024.]
- [24] Docker Inc. Use containers to Build, Share and Run your applications; 2024. Preuzeto s: <https://www.docker.com/resources/what-container/> [Pristupljeno: kolovoz 2024.]

- [25] The Linux Foundation. Kubernetes overview; 2023. Preuzeto s: <https://kubernetes.io/docs/concepts/overview/> [Pristupljeno: kolovoz 2024.]
- [26] Mike Coleman. Containers and VMs Together; 2016. Preuzeto s: <https://www.docker.com/blog/containers-and-vms-together/> [Pristupljeno: kolovoz 2024.]
- [27] Uwe M, Damker H, Clarke D, Deng H i dr. Network Functions Virtualisation – Introductory White Paper. Darmstadt: Njemačka; 2012. Preuzeto s: https://www.portal.etsi.org/NFV/NFV_White_Paper.pdf [Pristupljeno: kolovoz 2024.]
- [28] Han B, Gopalakrishnan V, Ji L, Lee S. Network Functions Virtualization: Challenges and Opportunities for Innovations. AT&T Labs Research: SAD; 2017.
- [29] ETSI. Report of NFVI Node Physical Architecture Guidelines for Multi-Vendor Environment. ETSI GS NFV-EVE-003 v1.1.1; 2019. Preuzeto s: <https://joinup.ec.europa.eu/collection/ict-standards-procurement/solution/etsi-gs-nfv-eve003-v111-2016-01-network-functions-virtualisation-nfv-ecosystem-report-nfvi-node> [Pristupljeno: kolovoz 2024.]
- [30] RedHat, Inc. VNF and CNF, what's the difference?; 2022. Preuzeto s: <https://www.redhat.com/en/topics/cloud-native-apps/vnf-and-cnf-whats-the-difference> [Pristupljeno: kolovoz 2024.]
- [31] Bhosale S, Caldeira A, Grabowski B, Graham C i dr. IBM Power System SR-IOV: Technical Overview and Introduction. IBM; 2014. Preuzeto s: <https://www.redbooks.ibm.com/redpapers/pdfs/redp5065.pdf> [Pristupljeno: kolovoz 2024.]
- [32] David Dungay. Software Defined Networking (SDN) Explained; 2016. Preuzeto s: <https://www.commsbusiness.co.uk/features/software-defined-networking-sdn-explained/> [Pristupljeno: kolovoz 2024.]
- [33] Open Networking Foundation. ONF SDN Evolution version 1.0. Palo Alto; 2016. Preuzeto s: https://opennetworking.org/wp-content/uploads/2013/05/TR-535_ONF_SDN_Evolution.pdf [Pristupljeno: kolovoz 2024.]
- [34] 3GPP. 3GPP TR 38.801 V14.0.0; 2017. Preuzeto s: <https://www.3gpp.org/DynaReport/38801.html> [Pristupljeno: kolovoz 2024.]
- [35] Samsung. Technical White Paper: 5G Standalone Architecture; 2021. Preuzeto s: https://images.samsung.com/is/content/samsung/assets/global/business/networks/insights/white-papers/0107_5g-standalone-architecture/5G_SA_Architecture_Technical_White_Paper_Public.pdf [Pristupljeno: kolovoz 2024.]

[36] Dongwook Kim. Edge Computing; 2023. Preuzeto s: <https://www.3gpp.org/technologies/edge-computing> [Pristupljeno: kolovoz 2024.]

POPIS KRATICA I AKRONIMA

2G – 2nd generation mobile network

3GPP – third generation partnership project

4G – 4th generation mobile network

5G – 5th generation mobile network

5G-AN – 5G access network

5GC – 5G core

5GS – 5G system

5QI – 5G QoS identifier

AF – application function

AMF – access and mobility management function

AMPS – advanced mobile phone system

APN – access point name

AS – application server

AUSF – authentication server function

BGCF – breakout gateway control function

BIOS – basic input output system

CNF – cloud-native network function ili container network function

CPU – central processing unit

CS – circuit switched

CFSB – circuit switched fallback

CSCF – call session control function

CUPS – control and user plane separation

DCN – dedicated core network

DNS – domain name system

DPDK – data plane development kit

DSL – digital subscriber line

E-CSCF – emergency call session control function

EDGE – enhanced data rates for GSM evolution

eMBB – enhanced mobile broadband

EPC – evolved packet core

ESM – EPS session management

ETSI – European telecommunications standards institute

E-UTRA – evolved universal terrestrial radio access

GBR – guaranteed bit rate

GGSN – gateway GPRS support node

gNB – next generation NodeB

GPON – gigabit passive optical network

GPRS – general packet radio service

GSM – global system for mobile communications

GTP – GPRS tunnelling protocol

GUTI – globally unique temporary identifier

HDLLC – high data rate and low latency communication

HLR – home location register

HMTTC – high performance machine type communication

HSS – home subscriber server

I-CSCF – interrogating call session control function

IETF – Internet engineering task force

IKT – informacijsko komunikacijske tehnologije

IMS – IP multimedia subsystem

IMSI – international mobile subscriber identity

IMS-MGW – IMS media gateway

IoT – Internet of things

IP – Internet protocol

IPTV – IP televizija

KASME – key access security management entries

LTE – long term evolution

MANO – management, automation and network orchestration

MEC – multi-access edge computing

MGCF – media gateway control function

MGW – media gateway

MIoT – massive IoT

MME – mobility management entity

MMS – multimedia messaging service

MN – master node

MNO – management and orchestration

MR-DC – multi-radio dual connectivity

MRB – multimedia resource broker

MRFC – multimedia resource function controller

MRFP – multimedia resource function processor

MTU – mobilni terminalni uređaj

NAS – network attached storage

NAT – network address translation

NEF – network exposure function

NF – network function

NFV – network function virtualisation

NFVI – network function virtualization interface

ng-eNB – next generation eNodeB

NG-RAN – next generation radio access network

NIC – network interface card

NMT – nordic mobile telephone

NR – new radio

NRF – network repository function

NS – non-standalone

NSI ID – network slice instance identity

NSSAI – network slice selection assistance information

NSSF – network slice selection function
NWDAF – network data analytics function
OMA – open mobile alliance
OS – operativni sustav
PCF – policy control function
PCIe – peripheral component interconnect express
P-CSCF – proxy call session control function
PDCP – packet data convergence protocol
PDN-GW – packet data network gateway
PDU – packet data unit
PS – packet switched
PSTN – public switched telephone network
QCI – QoS class identifier
QoS – quality of service
RAM – random access memory
RAT – radio access technology
RRC – radio resource control
S1AP – S1 application protocol
SA – standalone
SBC – session border controller
S-CSCF – serving call session control function
SD – service differentiator
SDN – software defined networking
SDO – standards development organization
SDP – session description protocol
SGSN – serving GPRS support node
SGW – serving gateway
SIP – session initiation protocol
SMF – session management function

SMS – short message service

SN – secondary node

S-NNSAI – single-network slice selection assistance information

SR-IOV – single root input output virtualization

SST – slice service type

TAS – telephony application server

UDM – unified data management

UDR – unified data repository

UE – user equipment

UMTS – universal mobile communications system

UPF – user plane function

URLLC – ultra-reliable low latency communication

V2X – vehicle to everything

VAS – value added services

vCPU – virtual central processing unit

VIM – virtualized infrastructure manager

VM – virtual machine

VNF – virtual network function

VoLTE – voice over LTE

VoNR – voice over new radio

vRAM – virtual random access memory

POPIS SLIKA

Slika 2.1: Broj korisnika koji imaju pristup Internetu u svijetu.....	4
Slika 2.2: Količina mobilnog prometa u <i>terabyte</i> -ima po mjesecu.....	4
Slika 2.3: Prikaz vremenskih etapa vezanih za <i>Release 20</i>	6
Slika 2.4: EPC jezgrena mreža.....	8
Slika 2.5: Sekvencijski dijagram UE povezivanja (engl. <i>attach</i>) na LTE mrežu.....	11
Slika 3.1: Izgled IMS jezgrene strukture unutar <i>Release-a 18</i>	17
Slika 3.2: Sekvencijski dijagram IMS registracije i uspostave poziva.....	19
Slika 4.1: NG-RAN arhitektura.....	23
Slika 4.2: Xn protokolni složaj po korisničkoj (lijevo) i kontrolnoj (desno) ravnini.....	24
Slika 4.3: <i>Service based</i> arhitektura.....	27
Slika 4.4: <i>Reference point</i> arhitektura.....	27
Slika 4.5: NF <i>discovery</i> procedura.....	29
Slika 4.6: Slučajevi upotrebe <i>network slicing-a</i> u 5G mreži.....	31
Slika 5.1: Hipervizor tipa 1 (lijevo) i hipervizor tipa 2 (desno).....	37
Slika 5.2: Konstrukcija kontejnera.....	39
Slika 5.3: Suradnja hipervizora i kontejnera.....	41
Slika 5.4: NFV radni okvir.....	44
Slika 5.5: Usporedba tradicionalne i SDN mreže.....	48
Slika 6.1: 5G Opcija 1.....	51
Slika 6.2: 5G Opcija 2.....	51
Slika 6.3: 5G Opcija 3.....	52
Slika 6.4: 5G Opcija 3, Opcija 3a i Opcija 3x.....	53
Slika 6.5: 5G Opcija 4.....	54
Slika 6.6: 5G Opcija 5.....	54
Slika 6.7: 5G Opcija 7.....	55
Slika 6.8: Postepena migracija od 4G prema 5G mreži.....	56

POPIS TABLICA

Tablica 4.1: Standardizirani tipovi <i>slice</i> -a.....	33
Tablica 6.1: Nazivi različitih MR-DC konfiguracija.....	50

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti
Vukelićeva 4, 10000 Zagreb

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOSTI

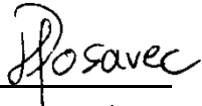
Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je _____ DIPLOMSKI RAD _____
(vrsta rada)

isključivo rezultat mogega vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na objavljenu literaturu, a što pokazuju upotrijebljene bilješke i bibliografija. Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedopušten način, odnosno da je prepisan iz necitiranog rada te da nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem, također, da nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

Svojim potpisom potvrđujem i dajem suglasnost za javnu objavu ~~završnog~~ završnog/diplomskog rada pod naslovom _____ USPOREDNA ANALIZA RAZLIČITIH IMPLEMENTACIJA 5G MREŽNE ARHITEKTURE _____, u Nacionalni repozitorij završnih i diplomskih radova ZIR.

Student/ica:

U Zagrebu, _____ 23.08.2024. _____

Mateo Posavec 
(ime i prezime, potpis)