

Arhitektura 5G mreže i mogućnosti primjene

Havliček, Ivan

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:119:881499>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-01**



Repository / Repozitorij:

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



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI**

ZAVRŠNI RAD

**ARHITEKTURA 5G MREŽE I MOGUĆNOSTI
PRIMJENE
ARCHITECTURE OF 5G NETWORKS AND THEIR
APPLICABILITY**

Mentor: izv. prof. dr. sc. Marko Periša

Student: Ivan Havliček

JMBAG: 0135260886

Zagreb, rujan 2023.

Zagreb, 22. svibnja 2023.

Zavod: **Zavod za informacijsko komunikacijski promet**
Predmet: **Arhitektura telekomunikacijske mreže**

ZAVRŠNI ZADATAK br. 7079

Pristupnik: **Ivan Havliček (0135260886)**
Studij: **Promet**
Smjer: **Informacijsko-komunikacijski promet**

Zadatak: **Arhitektura 5G mreže i mogućnosti primjene**

Opis zadatka:

U radu je potrebno napraviti analizu tehničkih karakteristika 5G tehnologije i na primjeru primjene u prometu te industriji opisati i skicirati elemente arhitekture sustava.

Mentor:

Predsjednik povjerenstva za
završni ispit:

izv. prof. dr. sc. Marko Periša

SAŽETAK

Suvremena komunikacija i tehnologija nezamislive su bez mobilnih mreža. S porastom pametnih uređaja, potreba za bržim i pouzdanijim mrežama postala je ključna. U tom kontekstu, 5G mreža, kao nova generacija mobilnih mreža, donosi izvanredne performanse, uključujući visoke brzine prijenosa podataka, ultra nisku latenciju i sposobnost povezivanja velikog broja uređaja. U radu se istražuju karakteristike mobilnih mreža, definiraju se tehnički aspekti i prati se razvoj mobilnih mreža od prve do pete generacije. Također detaljno se analiziraju elementi arhitekture 5G mreže i istražuju tehničke karakteristike njezina rada. Opisane su tehnologije i usluge koje se primjenjuju u 5G mreži, uključujući virtualnu stvarnost, proširenu stvarnost, masivan prijenos sadržaja, Internet stvari i umjetnu inteligenciju. U rad se također istražuju primjene 5G mreže u industriji i prometu kroz primjere pametnih industrijskih pogona i modernih prometnih sustava povezanih na 5G mrežu.

Ključne riječi: 5G mreža, arhitektura, tehnologije, primjena

SUMMARY

Contemporary communication and technology are inconceivable without mobile networks. With the proliferation of smart devices, the need for faster and more reliable networks has become paramount. In this context, the 5G network, as the new generation of mobile networks, delivers outstanding performance, including high data transfer speeds, ultra-low latency, and the capability to connect a large number of devices. The paper explores the characteristics of mobile networks, defines technical aspects, and traces the development of mobile networks from the first to the fifth generation. Furthermore, it thoroughly analyzes the elements of the 5G network architecture and investigates the technical features of its operation. Technologies and services applied in the 5G network are described, encompassing virtual reality, augmented reality, massive content transmission, the Internet of Things, and artificial intelligence. The paper also explores the applications of the 5G network in industry and transportation through examples of smart industrial operations and modern transportation systems connected to the 5G network.

Keywords: 5G Network, architecture, technologies, applications

Sadržaj

1. Uvod.....	1
2. Analiza karakteristika mobilnih mreža	2
3. Elementi arhitekture 5G mreže	5
3.1. Segmentacija 5G mreže	6
3.2. Tehničke karakteristike rada 5G mreže	18
4. Tehnologije i usluge primijenjene u 5G mreži.....	22
4.1. Virtualna i proširena stvarnost.....	23
4.2. Masivan prijenos sadržaja	23
4.3. Internet stvari.....	24
4.4 Umjetna inteligencija	24
5. Mogućnosti primjene 5G mreže u prometu i industriji.....	26
5.1. Pametni prijevoz.....	26
5.2. Pametni gradovi.....	27
5.3. Autonomna vozila	29
5.4. Dronovi i 5G mreža.....	32
5.5. Pametna industrija (Industrija 4.0 i 6.0).....	32
6. Zaključak.....	36
Literatura	37
Popis kratica	41
Popis slika	43
Popis tablica	44

1. Uvod

Mobilne mreže nužne su za komunikaciju kakvu danas poznajemo. Sve se više koriste pametni telefoni i pametni terminalni uređaji i upravo zbog toga se javlja potreba za boljom, pouzdanijom i bržom mobilnom mrežom koja će odgovoriti zahtjevima korisnika. 5G mreža je nova generacija mobilne mreže koja pruža puno bolje performanse od onih prijašnjih, neke od glavnih prednosti pete generacije mobilnih mreža su izrazito velika brzina prijenosa, ultra niska latencija i povezanost velikog broja uređaja.

Rad je podijeljen na šest poglavlja, redom su to :

1. Uvod
2. Analiza karakteristika mobilnih mreža
3. Elementi arhitekture 5G mreže
4. Tehnologije i usluge primijenjene u 5G mreži
5. Mogućnost primjene 5G mreže u prometu i industriji
6. Zaključak

U drugom poglavlju objašnjeno je što su mobilne mreže, definirane su tehnološke karakteristike mobilnih mreža i prikazan je razvoj mobilnih mreža od prve do pete generacije uspoređujući karakteristike svake mreže.

U trećem poglavlju rada analizirani se elementi arhitekture 5G mreže kroz segmentaciju mreže na korisničku, pristupnu i jezgrenu mrežu. Također u ovom poglavlju prikazane su tehničke karakteristike rada 5G mreže.

U četvrtom poglavlju rada prikazane su tehnologije i usluge koje se primjenjuju u 5G mreži. U radu su objašnjenja virtualna i proširena stvarnost, masivan prijenos sadržaja, Internet stvari i umjetna inteligencija.

U petom poglavlju kroz primjere primjene 5G mreže u industriji i prometu prikazano je kako izgledaju arhitekture pametnih industrijskih pogona i arhitekture modernih prometnih sustava spojenih na 5G mrežu

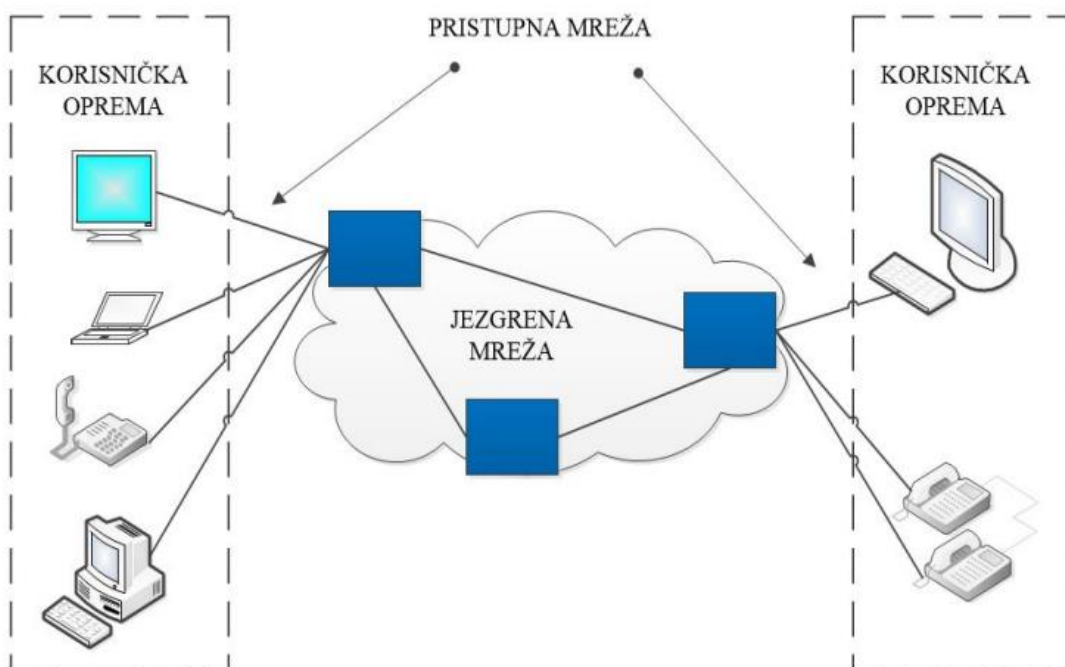
2. Analiza karakteristika mobilnih mreža

Mobilne mreže su telekomunikacijske mreže dizajnirane za povezivanje i prijenos informacija između uređaja kao što su pametni telefoni, laptopi, senzori, itd. Telekomunikacija je proces prijenosa i distribucije informacija od odašiljača prema prijemu na određenoj udaljenosti. U osnovi, telekomunikacija koristi određeni oblik elektromagnetske energije kako bi prenijela informacije preko različitih prijenosnih medija poput bakra, optičkih vlakana ili čak zraka. Mreža predstavlja sustav za prijenos informacija. To je niz međusobno povezanih dijelova, tj. komunikacijskih sustava, koji se organiziraju u cjelinu kako bi se postigla distribucija informacija.

Arhitektura telekomunikacijske mreže definira raspored elemenata mreže, složenu strukturu i ustroj mreže. Ovaj koncept omogućuje uspostavu učinkovitih i pouzdanih komunikacijskih veza, bez obzira na udaljenost ili oblik informacija.

Telekomunikacijska mreža je složeni sustav koji se sastoji od tri osnovna dijela, svaki s ključnom ulogom u procesu komunikacije. Ta tri osnovna dijela su korisnička mreža, pristupna mreža i jezgrena mreža kao što je prikazano na slici 1.

1. Korisnička mreža predstavlja dio mreže koji se nalazi isključivo na strani korisnika. Ova mreža sastoji se od krajnjih ili terminalnih uređaja, kao što su računala, pametni telefoni ili drugi uređaji koje korisnici koriste za komunikaciju.
2. Pristupna mreža je ključni dio komunikacijske mreže koji omogućava korisnicima da se povežu svojim uređajima s jezgrenom mrežom. Ova mreža osigurava fizičku i logičku vezu između korisničke mreže i jezgrene mreže. Pristupna mreža omogućava korisnicima da komuniciraju preko različitih tehnologija kao što su kableske veze, bežične veze itd.
3. Jezgrena mreža predstavlja središnji dio komunikacijske mreže. Njena ključna uloga je usmjeravanje i prijenos informacija između dva rubna dijela mreže. Jezgrena mreža omogućava brzu razmjenu podataka te podržava različite usluge kao što su glasovna komunikacija, video prijenos i podatkovne usluge.



Slika 1. Segmentacija mreže

Izvor: [1]

Arhitektura i podjela mobilne mreže važna je za razumijevanje bitnih karakteristika mreže kao što su brzina prijenosa podataka, pouzdanost mreže, kapacitete mreže i latencija.

Brzina prijenosa podataka je mjera koliko podataka se može prenijeti između dvije točke u mreži u određenom vremenskom periodu. Obično se izražava u bitovima po sekundi [bps] ili u njegovim višim multiplikatorima kao što su kilobiti po sekundi [Kbps], megabiti po sekundi [Mbps] ili gigabiti po sekundi [Gbps]. Ova brzina određuje koliko podataka se može prenijeti u određenom vremenskom intervalu te utječe na performanse i iskustvo korisnika prilikom korištenja interneta i preuzimanja datoteka.

Kapacitet mreže je mjera koliko podataka ili informacija mreža može prenijeti ili obraditi u određenom vremenskom periodu. Kapacitet mreže ovisi o mnogim faktorima, uključujući tehničke karakteristike mreže, poput širine pojasa (eng. *bandwidth*), brzine prijenosa podataka, broja korisnika koji istovremeno koriste mrežu te vrste usluga i aplikacija koje se koriste. Što je veći kapacitet mreže, to će više podataka moći biti preneseno ili obrađeno u isto vrijeme. Visok kapacitet mreže je ključan za pružanje kvalitetnih usluga korisnicima, posebno u situacijama kada mreža ima veliki broj korisnika ili kada se koriste aplikacije koje

zahtijevaju veliku propusnost, poput streaminga video sadržaja u visokoj razlučivosti (HD) ili prijenosa velikih datoteka.

Latencija u kontekstu mrežnih i komunikacijskih sustava odnosi se na vrijeme koje je potrebno da podaci ili signali putuju od izvora do odredišta ili obratno kroz mrežu. To je mjera kašnjenja u komunikaciji i izražava se obično u milisekundama [ms].

Razvojem mobilnih mreža od prve do pete generacije performanse mreža bile su sve bolje i bolje, svaka generacija nastojala je omogućiti bolju brzinu prijenosa, osigurati pouzdanost i visok kapacitet te smanjiti latenciju prijenosa podataka.

Na tablici 1. prikazan je razvoj mobilnih mreža kroz analizu karakteristika mobilnih mreža. Prve generacija mobilne mreže (1G) omogućila je analogne signale odnosno samo glasovne pozive uz nisku kvalitetu zvuka i ograničenu dostupnost mreže. Druga generacija mobilne mreže omogućila je digitalni signala, SMS poruke i osnovne podatkovne usluge. Treća generacija mobilne mreže (3G) donosi razvoj brzine prijenosa u odnosu na prijašnje mreže omogućujući do nekoliko desetaka [Mbps]. Četvrta generacija mobilnih mreža (4G) donosi brzine prijenosa podataka do nekoliko stotina Mbps što omogućuje streaming visoke razlučivosti, također 4G donosi nisku latenciju. Peta generacija mobilnih mreža (5G) donosi izrazito visoke brzine prijenosa do čak Gbps što je ultra brzo, uz visoku brzinu donosi znatno nisku latenciju manju od 1 [ms]. 5G mreže podržavaju zbog svog kapaciteta mreže velike količine uređaja što je ključno za internet stvari (eng. *IoT-Internet of Things*) [2].

Tablica 1. Razvoj mobilnih mreža

Izvor:[2]

Generacija mobilne mreže	Karakteristike
1G	Analogne linije, bez prijenosa podataka
2G	Digitalne linije, SMS, Internet [0,5 Mbps]
3G	Brzina prijenosa [10 Mbp], video pozivi
4G	Visoke brzine prijenosa (stotine [Mbps]), LTE, niska latencija
5G	Velik kapacitet mreže, ekstremno niska latencija (manje od [1ms]) , visoke brzine prijenosa podataka [Gbps]

3. Elementi arhitekture 5G mreže

Arhitektura 5G mreže predstavlja temeljni okvir i strukturu koja omogućava implementaciju pete generacije mobilnih mreža. Uspostavljena s ciljem revolucioniranja načina na koji komuniciramo i koristimo mobilne usluge, ova arhitektura temelji se na ključnim principima i tehnološkim inovacijama koje omogućavaju brže, pouzdanije i prilagodljivije povezivanje.

Jedan od osnovnih aspekata arhitekture 5G mreže je njezina sposobnost podržavanja raznolikih scenarija uporabe. Ova fleksibilnost omogućava prilagodbu mreže potrebama različitih industrija i aplikacija, od pametnih gradova do autonomnih vozila. Analiza ove arhitekture je podijeljena na tri glavna dijela: korisničku mrežu, pristupnu mrežu i jezgenu mrežu.

U korisničkoj mreži nalaze se krajnji uređaji poput pametnih telefona, računala i IoT uređaja. Ovi uređaji predstavljaju ulaznu točku korisnika u mrežu te su osnova za komunikaciju i razmjenu podataka. Pristupna mreža, drugi važan element arhitekture 5G mreže, odnosi se na infrastrukturu koja povezuje krajnje uređaje s jezgrenom mrežom. Ovdje se primjenjuju napredne tehnike kao što su *Massive MIMO* (eng. *Multiple Input Multiple Output*) i *beamforming*. Ove tehnologije omogućavaju istovremenu komunikaciju s više uređaja i precizno usmjeravanje signala prema korisnicima. To rezultira povećanjem kapaciteta mreže i poboljšanjem kvalitete usluge. Jezgrena mreža, treći ključni dio arhitekture, predstavlja središnji element sustava. Ovdje se podaci usmjeravaju, obrađuju i upravljaju. Jezgrena mreža koristi softverom definiranu arhitekturu (eng. *Software Defined Networking-SDN*) koja omogućava dinamičko upravljanje i optimizaciju resursa. Koncept virtualizacije mrežnih funkcija (eng. *Network Function Virtualization-NFV*) omogućava premještanje tradicionalnih mrežnih funkcija na virtualizirane platforme, što povećava fleksibilnost i efikasnost mreže. Arhitektura 5G mreže također omogućava potpunu integraciju *Edge Computinga*. Ovaj koncept se temelji na premještanju računalnih resursa bliže korisnicima, što smanjuje latenciju i omogućava bržu obradu podataka. Uz podršku *Edge Computinga*, 5G mreža postaje sposobna za podršku aplikacijama koje zahtijevaju gotovo trenutačnu reakciju, poput autonomnih vozila i pametnih gradova [3].

3.1. Segmentacija 5G mreže

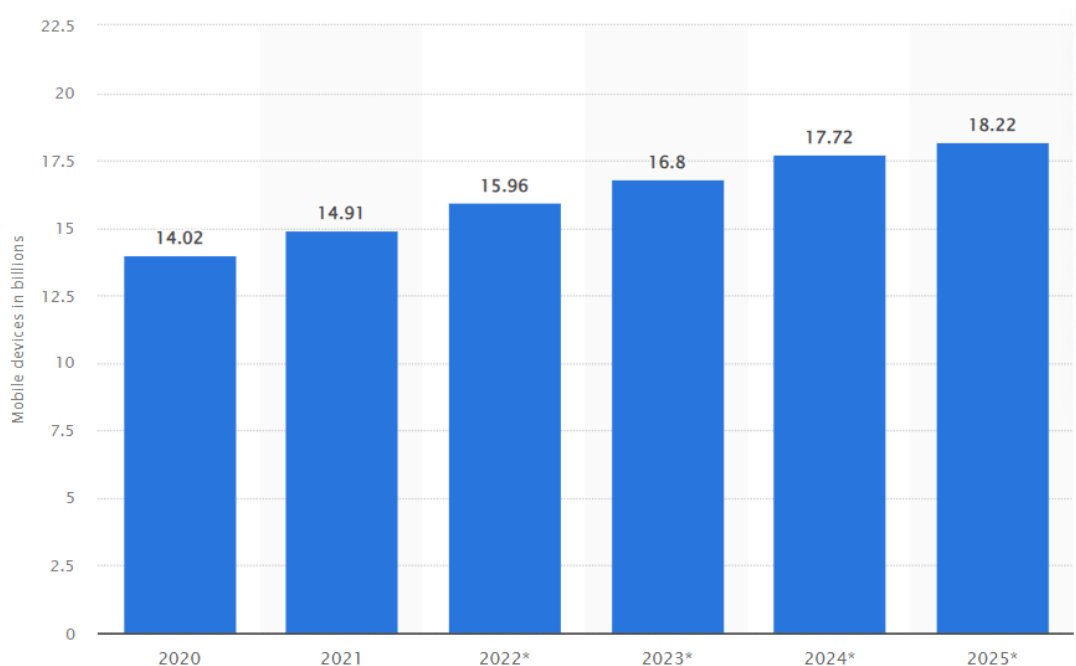
Terminalni uređaji imaju važnu ulogu u korisničkoj mreži 5G tehnologije, predstavljajući osnovno sučelje između korisnika i raznolikih mobilnih usluga i aplikacija koje 5G pruža. Ovi uređaji, poznati i kao krajnji uređaji (eng. *User Equipment-UE*), osiguravaju vitalnu komunikacijsku vezu i omogućuju korisnicima da iskoriste visoke performanse i kapacitete 5G mreže.

Uloga terminalnih uređaja je omogućiti korisnicima pristup internetu, komunikaciju putem raznih medija kao što su glasovni i video pozivi te interakciju s raznovrsnim aplikacijama. Oni su ključni za stvaranje povezanosti korisnika s mrežom te pružanje platforme za ostvarivanje različitih usluga i iskustava. Na primjer, zamislite korisnika koji putuje i treba pristupiti informacijama, aplikacijama i uslugama putem svog pametnog telefona. Terminalni uređaj omogućuje mu brzu i stabilnu vezu s mrežom, omogućujući mu da pregledava web stranice, koristi aplikacije za navigaciju ili čak da pristupi poslovnim sustavima izvan ureda. Terminalni uređaji imaju ključnu ulogu u podržavanju naprednih tehnoloških značajki 5G mreže. To uključuje visoke brzine prijenosa podataka, nisku latenciju i sposobnost povezivanja s velikim brojem uređaja istovremeno. Na primjer, terminalni uređaji omogućuju korisnicima brzo preuzimanje velikih datoteka, gledanje visokokvalitetnih video sadržaja bez zastoja te igranje online igara s niskom latencijom. Također, oni podržavaju razvoj pametnih gradova i IoT arhitekture, gdje se različiti uređaji i senzori povezuju kako bi poboljšali kvalitetu života i optimizirali resurse. Jedna od ključnih karakteristika terminalnih uređaja je njihova sposobnost povezivanja s različitim radio pristupnim tehnologijama. To omogućuje korisnicima da ostanu povezani čak i kad se kreću iz jednog područja pokrivenosti u drugo. Na primjer, dok korisnik putuje gradskim područjem, terminalni uređaj može prelaziti s mikroćelije na makroćeliju i osigurati kontinuiranu komunikaciju bez prekida. Ova sposobnost omogućuje korisnicima da iskoriste optimalne performanse mreže i da ostanu povezani bez obzira na svoju lokaciju [4].

Uzimajući u obzir napredak tehnologije, terminalni uređaji postaju ključni za inovacije u području mobilnih aplikacija. Oni omogućuju korisnicima da iskuse razne usluge, uključujući virtualnu stvarnost (eng. *Virtual Reality-VR*), proširenu stvarnost (eng. *Augmented Reality-AR*) i napredne komunikacijske platforme. Na primjer, terminalni uređaji mogu omogućiti korisnicima da sudjeluju u virtualnom sastanku s kolegama iz različitih dijelova svijeta ili da dožive interaktivne AR aplikacije koje omogućuju stvarnost informacijama putem ekrana uređaja [4].

5G mreža uvodi nove tehnologije, frekvencijske opsege i infrastrukturne elemente kako bi postigla znatno veće brzine prijenosa podataka, manju latenciju i veći kapacitet u odnosu na prethodne generacije mreža poput 4G. Međutim, kako bi terminalni uređaji mogli iskoristiti te prednosti, moraju biti kompatibilni s 5G mrežom. Terminalni uređaji moraju biti opremljeni odgovarajućim radio frekvencijskim (*eng. Radio Frequency-RF*) komponentama koje podržavaju frekvencijske opsege specifične za 5G mrežu. To uključuje hardverske komponente kao što su antene, modemi i procesori koji su sposobni obrađivati 5G signale. Osim toga, softverski aspekti uređaja moraju biti usklađeni s 5G protokolima i standardima kako bi se omogućila uspješna komunikacija s 5G mrežom. Uzmimo primjer pametnog telefona. Ako posjedujete pametni telefon koji podržava samo 4G mrežu, on neće biti u mogućnosti koristiti 5G signal i iskoristiti prednosti tehnologije. Da bi se koristila 5G mreža, pametni telefon mora imati ugrađene komponente koje omogućuju komunikaciju putem 5G frekvencija. To znači da treba podržavati 5G antene, modeme i procesore. Samo kada terminalni uređaj ima ove komponente, može se povezati s 5G mrežom i iskoristiti njene brzine i kapacitete. Bez podrške terminalnih uređaja za 5G mrežu, korisnici neće moći iskusiti sve prednosti koje 5G nudi. Brzo preuzimanje velikih datoteka, streaming visokokvalitetnih sadržaja bez zastoja te niska latencija za aplikacije poput virtualne stvarnosti i internetskih igara bit će nedostupni na uređajima koji nisu kompatibilni s 5G. Stoga je potrebno da korisnici imaju terminalne uređaje koji su kompatibilni s 5G mrežom kako bi iskoristili sve što ta tehnologija nudi [4].

Terminalni uređaji predstavljaju ključnu komponentu korisničke mreže 5G tehnologije. Njihova sposobnost povezivanja s mrežom, podrška visokim brzinama prijenosa podataka i sudjelovanje u razvoju naprednih aplikacija čine ih važnim za rad mreže i upravo iz toga razloga terminalni uređaji postaju sve više i više dostupni. Na slici 2. prikazan je predviđeni porast broja mobilnih uređaja u periodu od 2020. do 2025. godine [5].



Slika 2. Statistički prikaz porasta broja terminalnih uređaja

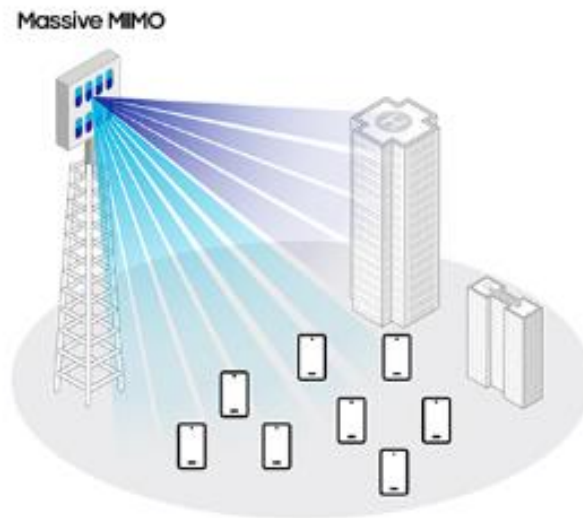
Izvor:[5]

Pristupna mreža 5G tehnologije sastoji se od različitih komponenti koje zajedno omogućavaju povezivanje korisničkih uređaja sa širom mrežnom infrastrukturom. Evo osnovnih komponenata pristupne mreže u okviru 5G tehnologije.

5G bazna stanica(eng. *5G Base Station-gNodeB*) predstavlja ključnu komponentu u 5G pristupnoj mreži. Ova bazna stanica donosi brojne inovacije i poboljšanja u odnosu na prethodne generacije mreža. Glavna uloga gNodeB bazne stanice je uspostavljanje i održavanje bežične veze između korisničkih uređaja, ova bazna stanica omogućava pristup mreži i komunikaciju između uređaja. Bazna stanica gNodeB je odgovorna za komunikaciju signalizacijskih poruka s korisničkim uređajima kako bi inicirala, održavala i prekinula veze, uključujući procese kao što su registracija uređaja, alokacija resursa i upravljanje kapacitetom. Alokacija resursa u 5G gNodeB odnosi se na precizno dodjeljivanje kapaciteta kao što su frekvencijski opsezi, vremenski intervali i energetska ograničenja različitim korisničkim uređajima i uslugama. gNodeB koristi tehnologiju MIMO kako bi istovremeno podržavao više korisnika i usluga. Tako uređaji koji zahtijevaju velike brzine prijenosa podataka mogu dobiti veći dio frekvencijskog spektra, dok uređaji s niskom latencijom dobivaju posebno alocirane vremenske intervale. Ova prilagodljivost omogućava optimizaciju mrežnih resursa i osigurava sigurnost mreže. Registracija uređaja u kontekstu 5G gNodeB podrazumijeva postupak identifikacije, autentifikacije i autorizacije uređaja koji se povezuju s mrežom. Kada uređaj

pokuša uspostaviti vezu s 5G mrežom putem gNodeB, prvo se identificira putem međunarodnih identifikacijskih brojeva mobilne opreme (eng. *International Mobile Equipment Identity-IMEI*), nakon toga uređaj prolazi kroz autentifikaciju koja potvrđuje njegovu legitimnost i integritet. Ovaj proces koristi sigurnosne protokole kako bi osigurao da samo legitimni uređaji imaju pristup mreži. Nakon autentifikacije, gNodeB autorizira uređaj za pristup odgovarajućim uslugama i resursima. To uključuje alokaciju resursa poput frekvencija i vremenskih intervala kako bi omogućili efikasnu komunikaciju. Ova registracija omogućava 5G mreži da precizno upravlja pristupom i resursima mreže [6].

MIMO je tehnologija u području bežičnih komunikacija, a u kontekstu 5G gNodeB ima ulogu u unaprjeđenju performansi i efikasnosti bežičnih mreža. Ova tehnologija temelji se na konceptu korištenja više antena za istovremeni prijenos i primanje signala, čime se omogućava paralelni prijenos više tokova podataka. U osnovi, MIMO omogućava korisnicima da koriste više antena za slanje i primanje, i to ne samo na strani bazne stanice (gNodeB), već i na strani korisničkih uređaja. Na primjer, standardni uređaj može imati jednu antenu, dok 2x2 MIMO uređaj ima dvije antene za slanje i dvije antene za primanje. Ovo omogućava istovremeni prijenos i primanje više nezavisnih signala. Jedna od tehnika unutar MIMO-a je "spatial multiplexing" ili višestruko prostorno prenošenje. Ova tehnika koristi informacije o prostornim karakteristikama signala kako bi se istovremeno prenosili različiti tokovi podataka kroz različite antene. Na primjer, ako imamo dva nezavisna signala, svaki signal će biti kodiran i prenesen putem odvojenih antena, a uređaj za primanje će dekodirati ova dva signala kako bi povratio originalne podatke. Osim toga, MIMO donosi i koncept raznolikosti putanja, ovo znači da se signali šalju različitim putanjama između bazne stanice i uređaja, prikazano na slici 3. Ako je jedna putanja oslabljena zbog interferencije ili odbijanja, druga putanja može pojačati signal, što doprinosi povećanoj pouzdanosti i manjim pogreškama u komunikaciji. Prednosti MIMO tehnologije su mnogobrojne, povećava ukupnu brzinu prijenosa podataka putem istovremenog prijenosa više signala. Također poboljšava pokrivenost signala i kvalitetu veze, posebno u gusto naseljenim područjima ili onima s puno prepreka. MIMO povećava kapacitet mreže omogućavajući više korisnika da istovremeno koriste isti frekvencijski spektar. Interferencija između signala se smanjuje, a spektar se koristi učinkovitije. Zahvaljujući MIMO tehnologiji, bazne stanice poput 5G gNodeB mogu podržati više uređaja s poboljšanim kapacitetom, pouzdanošću i kvalitetom usluge, čime se postiže bolje iskustvo korisnika i optimizacija mrežnih resursa [7].



Slika 3. MIMO tehnologija- prikaz emitiranja signala

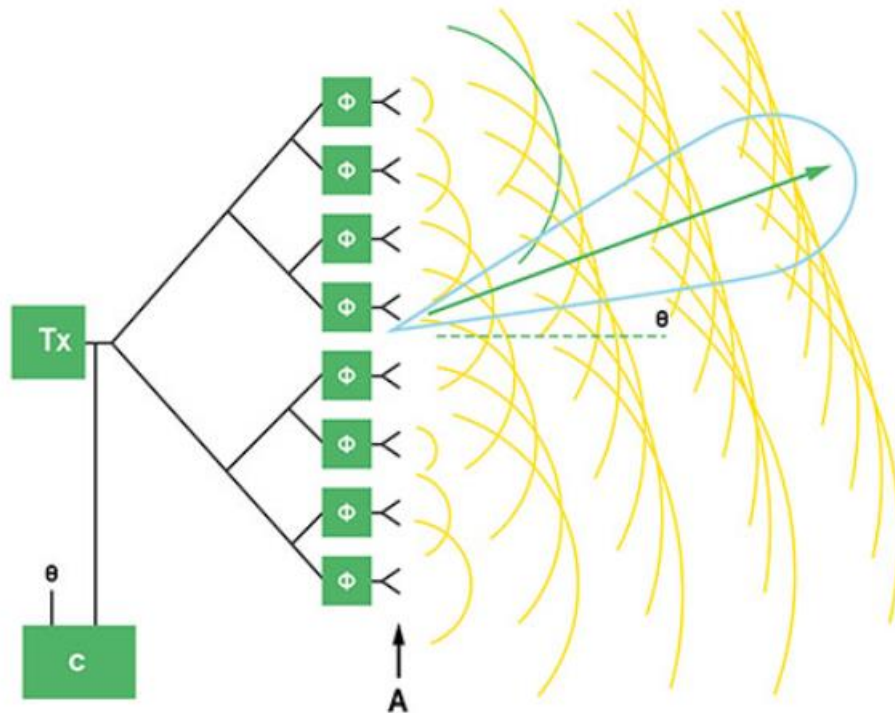
Izvor:[8]

gNodeB koristi različite frekvencijske opsege, uključujući niže frekvencije (sub-6 [GHz]) i više frekvencije (eng *Millimeter Waves*-mmWave). Niže frekvencije omogućavaju širi domet signala, dok više frekvencije donose veće brzine prijenosa podataka. Frekvencijski raspon nižih frekvencija koji obuhvaća frekvencijske pojaseve ispod 6 [GHz] uključuje poznate opsege koji su se koristili u prethodnim standardima, ali je proširen kako bi obuhvatio potencijalno nove ponude spektra, protežući se od 410 [MHz] do 7125 [MHz]. Ovi opsezi donose određene prednosti, uključujući veći domet signala i bolju sposobnost prodiranja kroz prepreke. To ih čini korisnim za širenje signala u ruralnim područjima i unutar zgrada. S druge strane, frekvencijski raspon viših frekvencija obuhvaća frekvencijske pojaseve od 24,25 [GHz] do 52,6 [GHz]. Ovi opsezi pripadaju milimetarskom valnom spektru i donose svoje karakteristike. Naime, iako imaju kraći domet u odnosu na opsege u nižim frekvencijama, nude znatno veću dostupnu širinu pojasa, ovo ih čini pogodnim za primjenu u gusto naseljenim urbanim područjima gdje je potrebno visoko opterećenje mreže i brži prijenos podataka. Sinteza frekvencija unutar gNodeB omogućava precizno generiranje signala unutar ovih različitih frekvencijskih opsega, osiguravajući stabilne komunikacije za različite scenarije. Ključno je napomenuti da je pravilna alokacija frekvencijskih opsega, kako unutar nižih tako i unutar viših frekvencija, izuzetno važna za efikasno korištenje dostupnog spektra i optimiziranje performansi 5G mreža [7].

Beamforming je tehnika unutar 5G gNodeB koja iz temelja mijenja način komunikacije između baznih stanica i korisničkih uređaja. Ova sofisticirana metoda omogućava baznim stanicama da prilagode oblik signala putem više antena kako bi ga usmjerile prema točno određenom smjeru ili korisniku. Digitalni *beamforming* postiže to prilagođavanje kroz precizno upravljanje fazom i amplitudom signala, omogućujući gNodeB da stvori usmjereni snop signala prema željenom cilju.

U 5G gNodeB mrežama, *beamforming* donosi niz ključnih prednosti. Prvo, optimizira pokrivenost mreže. Umjesto da se signal širi pod jednakim kutem, *beamforming* omogućava baznim stanicama da usmjere jači signal prema udaljenim korisnicima ili područjima s lošijom pokrivenošću, čime se poboljšava kvaliteta veze. Drugo, kapacitet mreže se značajno povećava. 5G gNodeB koristi MIMO tehnologiju u kombinaciji s *beamformingom* kako bi istovremeno podržao više korisnika. Svaki korisnik može primiti vlastiti usmjereni snop signala, što povećava ukupan kapacitet mreže i omogućava veći broj istovremenih veza. Treće, *beamforming* smanjuje interferenciju, ova tehnika omogućava gNodeB da selektivno usmjerava signale prema određenim korisnicima, smanjujući međusobnu interferenciju između korisničkih uređaja, što dalje povećava stabilnost i pouzdanost veza. Također, *beamforming* doprinosi energetskej efikasnosti jer omogućava usmjeravanje energije prema određenim korisnicima umjesto da se rasipa široko. Ovo je posebno značajno za mobilne uređaje jer produžuje trajanje baterije. Kroz integraciju *beamforminga* u 5G gNodeB mreže, postiže se personalizirana, prilagodljiva i učinkovita komunikacija. Precizno usmjereni snopovi signala unaprjeđuju kvalitetu veze, kapacitet i energetskej efikasnost mreže [9].

Na slici 4. prikazano je oblikovanje snopa signala koje generiraju antene. Formiranje snopa koristi se za fokusiranje bežičnog signala u odabranom smjeru, obično prema određenom prijemnom uređaju. To rezultira poboljšanim signalom na korisničkoj opremi, te manjom interferencijom između signala pojedinačnih terminalnih uređaja [10].



Slika 4. Oblikovanje snopa signala

Izvor: [10]

gNodeB smanjenju latencije u 5G mrežama. Latencija se odnosi na vrijeme koje je potrebno za prijenos podataka. Kroz brzu obradu signala i prilagodbu resursa, gNodeB smanjuje latenciju omogućujući brži prijenos podataka između bazne stanice i uređaja korisnika. Također, gNodeB se povezuje s konceptom "*edge computing*", koji dodatno doprinosi smanjenju latencije. *Edge computing* znači da se obrada podataka ne odvija samo na udaljenim poslužiteljima, već i na uređajima i mrežnim čvorovima koji su bliže korisnicima. To omogućava bržu obradu podataka i reakciju jer podaci ne moraju putovati kroz cijelu mrežu do udaljenih poslužitelja. Kombinacija brze obrade podataka u gNodeB i *edge computinga* omogućava gotovo trenutnu komunikaciju, što je posebno važno za aplikacije poput virtualne stvarnosti, autonomnih vozila i drugih naprednih primjena.

Dinamička podjela spektra (eng. *Dynamic Spectrum Sharing* -DSS) je tehnika koja se povezuje s gNodeB u 5G mrežama i predstavlja inovativan pristup dijeljenju radio frekvencijskog spektra. Ova tehnika omogućava da se isti frekvencijski pojas dijeli između različitih generacija mobilnih mreža, poput 4G i 5G, kako bi se postigla bolja iskoristivost spektra i glatka tranzicija na novu tehnologiju. U prijašnjim mrežama, svaka generacija (kao što je 4G ili 3G) koristila je zasebne frekvencijske opsege, što je rezultiralo neefikasnim

korištenjem raspoloživog spektra. *Dynamic Spectrum Sharing* omogućava 5G gNodeB-ima da dijele iste frekvencijske opsege s postojećim 4G baznim stanicama, koristeći ih paralelno. Ovo omogućava postupno uvođenje 5G tehnologije bez potrebe za potpunim prelaskom na nove frekvencije. S obzirom na to da se 4G i 5G uređaji koriste istim frekvencijama, gNodeB može dinamički prilagoditi kako će se spektar dijeliti između dviju generacija mreža. Ako postoji više 4G uređaja koji koriste spektar, više će se resursa dodijeliti 4G komunikaciji. S druge strane, ako postoji veći broj 5G uređaja, više će resursa biti dodijeljeno za 5G komunikaciju. Ovo omogućava optimalno iskorištavanje dostupnog spektra bez potrebe za dodatnim spektralnim resursima. Također, omogućava glatku migraciju s postojeće 4G na 5G mrežu bez prekida u uslugama ili potrebe za promjenom frekvencija. DSS je važna tehnika koja pomaže 5G mrežama da iskoriste raspoloživi spektar na najbolji način, olakšavajući prijelaz na novu tehnologiju uz minimalne promjene u infrastrukturi i uslugama [11].

Na tablici 2. prikazana je evolucija baznih stanica kroz generacije mobilnih mreža. Bazne stanice kao osnovne komponente svake pristupne mreže razvijale su se kako i same generacije mreža. Razvoj baznih stanica odvijao se postepeno, odnosno kod svake nove generacije prijašnja bazna stanica bila je nadograđena što je i vidljivo na slici.

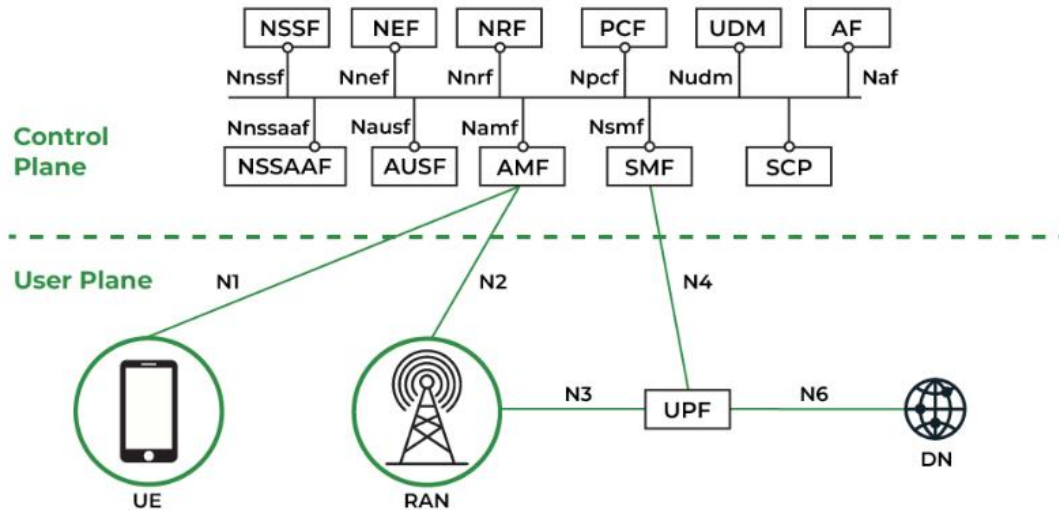
Tablica 2. Razvoj baznih stanica

Izvor: [6]

Generacija	Radio tehnologija	Naziv bazne stanice
2G	GSM	BTS (bazna primopredajna stanica)
3G	UMTS	Čvor B
4G	LTE	eNB, razvijeni čvor B
5G	NR	gNB, gNodeB

5G jezgrena mreža temelji se na složenoj i visoko optimiziranoj arhitekturi koja je osmišljena kako bi podržala visoke brzine prijenosa podataka, nisku latenciju, masovnu povezanost uređaja i raznovrsne aplikacije. 5G jezgrena mreža koristi fleksibilnu i virtualiziranu arhitekturu koja omogućava dinamičko raspoređivanje resursa prema potrebama mreže. Ova fleksibilnost omogućava brzu rekonfiguraciju i optimizaciju mreže kako bi se bolje nosila s različitim zahtjevima korisnika.

Na slici 5. je prikazana arhitektura 5G mreže. Prikazana su sva tri dijela mreže, korisnička, pristupna i jezgrena mreža. Kod korisničke mreže najvažniji je uređaj kojim korisnik pristupa mreži. Pristupna mreža omogućuje spajanje korisnika s jezgrenom mrežom u kojoj se odvija komunikacija. Unutar jezgrene mreže nalaze se sve komponente koje su detaljno opisane u radu.



Slika 5. Arhitektura 5G mreže

Izvor: [16]

Software-Defined Networking predstavlja koncept unutar 5G jezgrene mreže, transformirajući način na koji se mreže upravljaju i optimiziraju. U okviru 5G tehnologije, SDN omogućava centralizirano upravljanje i kontrolu mrežnim resursima, oslobađajući mrežne operatore od tradicionalno složenih i fragmentiranih postavki. Kroz SDN, kontroler ima sposobnost donošenja dinamičnih odluka o preusmjeravanju i upravljanju prometom, optimizirajući mrežnu učinkovitost u skladu s promjenjivim zahtjevima korisnika. Omogućava brzu rekonfiguraciju resursa kako bi se bolje nosilo s rastućim zahtjevima za brzinom, niskom latencijom i pouzdanošću. Također, SDN podržava koncept "*network slicinga*", omogućavajući stvaranje virtualnih mrežnih segmenata s prilagođenim karakteristikama i performansama za različite aplikacije i industrije. Ovo je ključno za podršku raznolikosti usluga, od masovnih IoT uređaja do kritičnih komunikacija. Jedan od najvećih doprinosa SDN-a 5G jezgrenom mrežnom okruženju je njegova sposobnost brze implementacije i skalabilnosti novih usluga. Ovo omogućava pružateljima usluga da ubrzaju razvoj i implementaciju inovativnih aplikacija, bez potrebe za kompleksnim i dugotrajnim fizičkim intervencijama na mreži. Osim toga, SDN

podržava "edge computing", premještajući računalne resurse bliže korisnicima kako bi se postigla niska latencija i brži odziv, što je ključno za aplikacije poput proširene stvarnosti i industrijskih primjena. SDN predstavlja temelj za 5G jezgrene mreže, omogućavajući agilnost, efikasnost i prilagodljivost potrebnu za podržavanje širokog spektra usluga i aplikacija. Kroz ovaj koncept, 5G mreže postaju sposobne odgovoriti na dinamične potrebe modernih telekomunikacija i osigurati značajne performanse za korisnike [12].

Virtualizacija mrežnih funkcija je koncept unutar 5G jezgrene mreže. Ovaj koncept se bazira na ideji virtualizacije ključnih mrežnih funkcija koje su ranije izvođene na specijaliziranim hardverskim uređajima, a sada se izvode unutar virtualnih instanci na standardnom hardveru pomoću tehnologije virtualizacije. NFV pruža fleksibilnost, skalabilnost i ekonomičnost u implementaciji i upravljanju mrežnim resursima. Aspekt virtualizacije omogućava izvođenje mrežnih funkcija u virtualnim strojevima ili kontejnerima, optimizirajući iskorištavanje resursa i omogućavajući dinamičku raspodjelu resursa. Razdvajanje funkcija od fizičkog hardvera omogućuje lakše premještanje i skaliranje resursa bez potrebe za velikim fizičkim promjenama. Ova dinamička raspodjela resursa ključna je za NFV, jer omogućava glatku prilagodbu resursa virtualnim instancama prema fluktuacijama potražnje. Brza implementacija novih usluga postaje moguća putem stvaranja virtualnih instanci za nove funkcije, čime se eliminira potreba za specijaliziranim hardverom i smanjuju se vremenski okviri implementacije. NFV donosi značajne prednosti u smislu ekonomske isplativosti, iskorištavanja virtualizacije i smanjenja ovisnosti o mnogobrojnim fizičkim uređajima. Nadalje, skalabilnost NFV-a znači da se dodjela resursa može brzo prilagoditi prema potrebama. Ovo održava optimalnu kvalitetu usluge tijekom porasta prometa ili varijacija u potražnji. Kao primjer, zamislite 5G jezgrenu mrežu koja mora podržavati različite usluge poput IoT komunikacije, prijenosa visoke rezolucije i kritičnih komunikacija. NFV omogućava svaku od ovih funkcija da se izvodi kao virtualna instanca na istom hardveru, olakšavajući upravljanje, brzu prilagodbu resursa i maksimiziranje efikasnosti. Virtualizacija mrežnih funkcija predstavlja transformacijsku snagu unutar 5G jezgrenih mreža, pružajući agilnost, prilagodljivost i ekonomičnost. Omogućujući virtualno izvođenje različitih mrežnih funkcija na zajedničkim hardverskim resursima, NFV omogućava 5G mrežama da učinkovito podrže raznolike usluge i aplikacije, osiguravajući optimalno iskorištavanje resursa i skalabilnost [12].

Ultra-Reliable Low Latency Communication (URLLC) je karakteristika 5G jezgrene mreže koja osigurava izuzetno pouzdanu i niskolatenentnu komunikaciju. URLLC omogućava ekstremno nisku latenciju između slanja i primanja podataka, uz visoku razinu pouzdanosti i

prioritet za kritične prometne tokove. Ova značajka omogućava primjenu u područjima kao što su autonomna vozila gdje su brza reakcija i minimalni gubici podataka ključni [13].

Massive Machine Type Communications (mMTC) je aspekt 5G mreže usmjeren na masivnu komunikaciju između velikog broja uređaja, poput senzora, uređaja za praćenje i drugih IoT uređaja. Ova karakteristika omogućava povezivanje milijuna uređaja na mrežu istovremeno. mMTC se oslanja na sposobnost 5G mreže da podrži veliku gustoću uređaja, minimalnu potrošnju energije i optimalno iskorištavanje resursa. Primjer primjene mMTC-a uključuje pametne gradove gdje se veliki broj senzora i uređaja koristi za praćenje prometa, okoliša i infrastrukture te za poboljšanje upravljanja resursima [13].

Cloud-Native Architecture predstavlja način dizajniranja i implementacije softverskih aplikacija i usluga koji je usmjeren na iskorištavanje mogućnosti koje pružaju cloud okruženja. *Cloud-native* aplikacije su dizajnirane tako da budu skalabilne, otporne na kvarove i brzo implementirane, što je ključno za brze promjene i zahtjeve modernih tehnoloških okruženja. Primijenjeno na 5G mrežu, *cloud-native* arhitektura omogućava brzu implementaciju novih usluga i aplikacija, kao i dinamično upravljanje resursima prema potrebama korisnika [13].

Authentication Server Function (AUSF) je komponenta u arhitekturi 5G mreže koja se bavi autentifikacijom i autorizacijom korisnika. Njegova glavna uloga uključuje provjeru autentičnosti korisnika, provjeru ovlaštenja za pristup mreži, te održavanje sigurnosnog konteksta korisnika za zaštitu resursa. AUSF također podržava autentifikaciju korisnika u gostujućim mrežama te može tražiti ponovnu autentifikaciju u određenim situacijama [14].

Access and Mobility Management Function (AMF) je komponenta u 5G mrežnoj arhitekturi. Njegova uloga uključuje upravljanje pristupom korisnika mreži, olakšavanje mobilnosti unutar mreže te osiguranje sigurne i nesmetane komunikacije. AMF provodi autentifikaciju, dodjelu privremenih identifikatora korisnicima i upravlja procesima uspostavljanja i raskidanja veza. Osim toga, AMF osigurava sigurnost komunikacije i štiti privatnost korisnika [15].

Data Network (DN) je infrastruktura za prijenos digitalnih podataka između različitih uređaja i sustava. U 5G mrežama, DN je jezgra koja omogućava brz i kapacitetski veliki prijenos podataka s niskom latencijom. Ova tehnologija podržava aplikacije kao što su virtualna stvarnost, autonomna vozila i IoT, omogućujući i ogroman broj povezanih uređaja za pametne gradove i industrijsku automatizaciju. Koristi širok spektar frekvencija, uključujući milimetarske valove, za bolju pokrivenost i kapacitet [15].

Network Exposure Function (NEF) je komponenta 5G arhitekture koja omogućava siguran pristup mrežnim funkcijama i podacima vanjskim aplikacijama, potičući razvoj inovativnih aplikacija. Također brine o sigurnosti i ovlaštenju pristupa. *Network Repository Function* (NRF) je središnja registracija unutar 5G mreže koja održava popis dostupnih mrežnih funkcija, omogućujući dinamično otkrivanje i pristup tim funkcijama te kontrolira pristup tim funkcijama kako bi osigurao siguran pristup i suradnju između različitih dijelova mreže [15].

Network Slice Specific Authentication and Authorization Function (NSSAAF) je dio 5G arhitekture koji se bavi autentifikacijom i ovlaštenjem korisnika za pristup specifičnim mrežnim rezovima. Ova funkcija osigurava siguran i kontroliran pristup resursima i uslugama unutar svakog reza [16].

Network Slice Selection Function (NSSF) je komponenta koja odabire odgovarajući mrežni rez za korisnike i aplikacije temeljem njihovih zahtjeva, uzimajući u obzir faktore kao što su brzina prijenosa podataka i latencija. NSSF osigurava da svaki rez odgovara specifičnim potrebama i dinamički prilagođava odabir rezova kako bi optimizirao iskorištavanje resursa 5G mreže [16].

Policy Control Function (PCF) u 5G mrežnoj arhitekturi upravlja politikama i pravilima unutar mreže, osiguravajući optimalno iskustvo korisnika i sigurnost. Prilagođava resurse i prioritete tijekom prometa kako bi podržao različite usluge i zaštitio mrežu [16].

Session Management Function (SMF) je odgovorna za upravljanje komunikacijskim sesijama u 5G mreži. Osigurava glatko usmjeravanje podataka, sigurnost, i kontinuitet komunikacije između uređaja i mrežnih servisa, prilagođavajući se različitim aplikacijama i njihovim zahtjevima za sesijama [16].

Unified Data Management (UDM) i *Unified Data Repository* (UDR) su pojmovi unutar 5G mrežne arhitekture. UDM se odnosi na funkciju koja upravlja različitim podacima vezanim uz korisnike, uređaje i usluge. Ova komponenta omogućava skladištenje, upravljanje i siguran pristup podacima kao što su korisnički profili, autentifikacija, autorizacija, te pravila i politike usluga. S druge strane, UDR predstavlja centralno skladište podataka unutar mreže. Ovdje se pohranjuju informacije o korisnicima, uređajima, uslugama, pretplatama, naplati te analitički podaci. UDR omogućava efikasno upravljanje podacima, osigurava brz pristup relevantnim informacijama za upravljanje mrežnim prometom, analizu performansi i osiguravanje kvalitete usluge. Ova dva koncepta zajedno čine temelj za uspješno upravljanje podacima i resursima u

5G mrežama. UDM omogućava kontrolu i upravljanje podacima, dok UDR pruža fizičko skladištenje tih podataka [16].

User Plane Function (UPF) u 5G arhitekturi upravlja korisničkim prometom, osiguravajući brzu isporuku podataka uz QoS, sigurnost i optimalnu iskoristivost resursa. Također omogućava razdvajanje prometa različitih usluga i podržava mobilnost korisnika [16].

Application Function (AF) olakšava integraciju i upravljanje aplikacijama unutar 5G mreže, omogućujući njihovu komunikaciju, prilagodbu usluga te osigurava kvalitetu usluge [16].

Service Communication Proxy (SCP) djeluje kao posrednik koji olakšava komunikaciju između različitih usluga i aplikacija unutar mreže, osiguravajući sigurnost, balansiranje opterećenja i otpornost na greške, unaprjeđujući efikasnost i funkcionalnost 5G mreže [16].

Na temelju slike 6. opisan je primjer komunikacije kroz cijelu 5G mrežu. Kada krajnji korisnik koristi svoj pametni telefon ili uređaj, signal se prvo usmjerava prema najbližoj baznoj stanici koja se nalazi u pristupnom dijelu mreže. Bazna stanica prikuplja podatke o korisnikovom uređaju i šalje ih do AMF koja upravlja korisničkim mobilnostima i dodjeljuje kontekst uređaja. Odatle, zahtjev se prosljeđuje do SMF-a koji upravlja kreiranjem i upravljanjem sesija za korisničke usluge. Nadalje, ako je potrebno, zahtjev se šalje prema NSSF koja odabire odgovarajući "*network slice*" prema potrebama korisnika npr. visoka brzina za preuzimanje videozapisa. Ako su podaci izvan mreže, AF komponenta ih prosljeđuje prema DN koja omogućava povezanost sa servisima izvan mobilne mreže. U međuvremenu SCP omogućuje komunikaciju između različitih usluga i aplikacija unutar mreže tako da posreduje zahtjeve za komunikaciju i osigurava sigurnost podataka. U cijelom tom procesu, AUSF osigurava sigurnu autentifikaciju korisnika i uređaja. Sve te komponente surađuju kako bi omogućile brzu, sigurnu i pouzdanu komunikaciju.

3.2 Tehničke karakteristike rada 5G mreže

Tehničke karakteristike rada 5G mreže predstavljaju ključni temelj telekomunikacijskog svijeta. Poboljšana brzina prijenosa podataka, niska latencija i sposobnost povezivanja velikog broja uređaja ostvaruju preduvjete novim mogućnostima u područjima poput autonomnih vozila, interneta stvari i visokokvalitetnog *streaminga*.

Tablica 3. prikazuje tehničke zahtjeve za različite 5G usluge:

- eMBB (Enhanced Mobile Broadband) nudi visoku brzinu podataka, efikasnost spektra i mobilnost, idealno za brze podatke poput video streaminga.
- mMTC (Massive Machine-Type Communications) ima nisku brzinu podataka, ali visoku povezivost i energetska učinkovitost, što ga čini idealnim za velik broj IoT uređaja.
- URLLC (Ultra-Reliable and Low-Latency Communications) ima nisku latenciju i visoku pouzdanost za kritične komunikacije, ali nisku brzinu podataka.

Tablica 3. Tehnički zahtjevi za 5G usluge

Izvor:[17]

Kategorija	Brzina podataka	Efikasnost spektra	Gustoća mobilnosti	Latencija	Povezanost	Efikasnost mreže	Kapacitet	Energija
eMBB	Visoka	Visoka	Visoka	Visoka	Srednja	Srednja	Visoka	Visoka
mMTC	Niska	Niska	Niska	Niska	Visoka	Srednja	Niska	Niska
URLLC	Niska	Niska	Niska	Visoka	Visoka	Niska	Niska	Niska

Tablica 4. predstavlja tehničke zahtjeve za 5G usluge, koji su ključni za pružanje različitih vrsta visoko naprednih i raznovrsnih usluga na 5G mrežama. Svaka kategorija u tablici obuhvaća specifične tehničke parametre koji su neophodni za podršku različitim scenarijima povezivanja uređaja.

- Prva kategorija, "Širokopojasni pristup u gustoći," ističe visoke brzine prijenosa podataka, nisku latenciju i gustoću povezivanja koja omogućuje brzu i pouzdanu komunikaciju u gusto naseljenim urbanim područjima.
- Druga kategorija, "Indoor ultra-visoki," naglašava potrebu za ultra-visokim brzinama prijenosa podataka u zatvorenim prostorima, što je ključno za podršku visokokvalitetnim uslugama u unutarnjim okruženjima.
- Treća kategorija, "Širokopojasni pristup u gužvi," fokusira se na održavanje performansi mreže čak i u gužvama, s posebnim naglaskom na pješake u urbanim sredinama.

- Četvrta kategorija, "50+ Mbps svugdje," istražuje mogućnost pružanja brzih usluga na velikim brzinama kretanja, što je ključno za mobilne korisnike u pokretu.

Tablica 4. Tehnički zahtjevi za 5G mrežu

Izvor:[17]

Kategorija	Brzina podataka	Latencija	Gustoća Povezivanja
Širokopolasni pristup u gustoći	DL: 300 [Mbps]	10 [ms]	2500/[km ²] DL: 750 Gbps/[km ²]
Indoor ultra-visoki	DL: 1 [Gbps]	10 [ms]	75,000/[km ²] DL: 15 Tbps/[km ²]
Širokopolasni pristup u gužvi	DL: 25 [Mbps]	10 [ms]	150,000/[km ²] DL: 3.75 Tbps/[km ²]
50+ Mbps svugdje	DL: 50 [Mbps]	10 [ms]	400/[km ²]

Tablica 5. prikazuje tehničke zahtjeve različitih kategorija 5G usluga u okviru 3GPP tehnologija. 3GPP je međunarodna organizacija za razvoj mobilnih komunikacija. Ključne kategorije usluga uključuju:

1. **eMBB (Enhanced Mobile Broadband):** Ova kategorija usluge usmjerena je na brze podatke i visoke brzine prijenosa, dostižući do 10 Gbps. Latencija, odnosno vrijeme koje podaci trebaju putovati od pošiljatelja do primatelja, ovdje je niska, posebno za visoke brzine. Pouzdanost ove usluge osigurava niskolatencijalna povezanost između letjelica, čime se omogućuje brza i stabilna komunikacija. Gustoća prometa je visoka, što znači da se podržava velik broj aktivnih korisničkih uređaja (UE) na malom prostoru od 2500 korisničkih uređaja po kvadratnom kilometru, s mogućnošću istovremene aktivacije 50 UE-ova.
2. **CriC (Critical Communications):** U ovoj kategoriji, određeni tehnički aspekti nisu primjenjivi, što znači da se neke karakteristike, poput brzine podataka, ne ističu. Fokus je na pružanju stvarnog vremena s niskom latencijom, što znači da podaci stižu brzo i gotovo trenutačno (npr., 1 ms od pošiljatelja do primatelja). Pouzdanost i dostupnost ovdje su izuzetno visoke, a kvaliteta komunikacije je prioritet. Gustoća distribucije podrazumijeva visoku koncentraciju senzora na malom prostoru, omogućujući do 10 000 senzora na kvadratnom kilometru.
3. **mIoT (Massive Internet of Things):** Ova kategorija je posebno usmjerena na scenarije s velikim brojem uređaja i veza. Tehnički aspekti kao što su brzina podataka i latencija

nisu istaknuti jer se ovdje radi o ogromnom broju veza. Visoka gustoća veza podrazumijeva podršku za masovnu povezanost, s mogućnošću podrške do 1 milijuna veza po kvadratnom kilometru.

Tablica 5. Zahtjevi za 5G usluge u 3GPP tehnologijama

Izvor:[17]

Kategorija	Brzina podataka	Latencija	Pouzdanost	Gustoća prometa
eMBB	Visoka (do 10 Gbps)	Niska i niska za visoke brzine	Pouzdana niskolatencijalna povezanost između letjelica	Visoka (2500/km ² , 50 aktivnih UE-a istovremeno)
CriC	Nije primjenjivo	Realno vrijeme s niskom latencijom (npr., 1 ms end-to-end)	Izuzetno visoka pouzdanost, visoka dostupnost	Visoka gustoća distribucije (10,000 senzora na 10 km ²)
mIoT	Nije primjenjivo	Nije primjenjivo	Nije primjenjivo	Visoka (npr., 1 milijun veza po km ²)

5G mreža, razvijena od strane 3GPP, nudi tri glavne kategorije usluga: brze podatke i stabilnu komunikaciju (eMBB), stvarno vrijeme s niskom latencijom (CriC), te masovnu povezanost uređaja (mIoT). Svaka kategorija ima svoje specifične tehničke zahtjeve i primjene, čineći 5G mrežu iznimno prilagodljivom i obećavajućom za različite potrebe korisnika.

4. Tehnologije i usluge primijenjene u 5G mreži

Uvođenje 5G mreže predstavlja revoluciju u svijetu telekomunikacija implementacijom novih tehnologija i usluga koje će transformirati digitalnu stvarnost. U ovom se odlomku istražuju ključne tehnologije i usluge koje su primijenjene u 5G mreži.



Slika 6. Kategorizacija scenarija mobilnih usluga 5G mreže

Izvor:[17]

Na slici 6. je prikazana kategorizacija scenarija mobilnih usluga u okviru 5G mreže koja obuhvaća različite područja, uključujući virtualnu i proširenu stvarnost (VR/AR), internet stvari (IoT), masovni prijenos sadržaja (MCS) te primjenu umjetne inteligencije (AI). U kontekstu VR/AR, 5G omogućuje usluge koje podržavaju simulacije, igre i obrazovanje putem virtualne i proširene stvarnosti. IoT scenariji povezani su s velikim brojem uređaja i senzora koji koriste 5G mrežu za komunikaciju, što se primjenjuje u pametnim kućama, pametnim gradovima i industriji. MCS se odnosi na masovni prijenos sadržaja kao što su sportski događaji i koncerti, zahtijevajući brzu mrežnu povezanost. Konačno, primjena umjetne inteligencije u mobilnim uslugama 5G obuhvaća autonomne sustave, analizu podataka i AI aplikacije, pružajući

raznolike mogućnosti za korisnike i industrije. Ove kategorije dodatno obogaćuju spektar 5G usluga, odgovarajući na raznolike potrebe i zahtjeve korisnika diljem svijeta.

4.1. Virtualna i proširena stvarnost

Virtualna i proširena stvarnost (VR/AR) predstavljaju izvanredno uzbudljivo područje unutar svijeta 5G tehnologije. Ove tehnologije omogućuju korisnicima da zakorače izvan granica stvarnog svijeta i stupe u digitalne svjetove koji su obogaćeni simulacijama i interaktivnim iskustvima. Zahvaljujući brzini prijenosa podataka i niskoj latenciji koju 5G mreža pruža, VR i AR aplikacije postaju još uvjerljivije i pristupačnije nego ikada prije [18].

U kontekstu virtualne stvarnosti (VR), korisnici mogu potpuno uroniti u digitalni svijet stvoreni za igre, simulacije, obuku i zabavu. Uz 5G, visoka razlučivost i brza izmjena podataka omogućuju glatko i realistično iskustvo bez vidljive kašnjenja, što znatno poboljšava stvarnost virtualnog okruženja [18].

S druge strane, proširena stvarnost (AR) omogućuje integraciju digitalnih elemenata u stvarni svijet. To znači da korisnici mogu gledati kroz svoje pametne naočale ili uređaje kako bi dobili dodatne informacije ili interakciju s digitalnim objektima u stvarnom okruženju. 5G mreža osigurava da AR aplikacije budu trenutačne i precizne, bez obzira na to gdje se korisnici nalaze [18].

4.2. Masivan prijenos sadržaja

Masovni prijenos sadržaja (MCS) u kontekstu 5G tehnologije predstavlja izuzetno značajan napredak u načinu na koji konzumiramo multimedijalni sadržaj. S 5G mrežom, korisnici su u mogućnosti uživati u brzom, pouzdanom i visokokvalitetnom streamingu koji obuhvaća sve, od videozapisa u ultra visokoj razlučivosti (UHD) do impresivnih iskustava virtualne stvarnosti (VR). Brzina prijenosa podataka na 5G mreži omogućava gotovo trenutačno preuzimanje sadržaja, čak i kada se radi o velikim datotekama. Osim toga, stabilnost i pouzdanost streaminga osiguravaju da korisnici ne moraju trpjeti nepoželjne prekide ili kašnjenja tijekom gledanja ili slušanja. No, ono što čini MCS još fascinantnijim je personalizacija sadržaja. Zahvaljujući analizi podataka i umjetnoj inteligenciji, 5G može pružiti korisnicima sadržaj koji je usklađen s njihovim interesima i preferencijama, čime se stvara bogatije i relevantnije medijsko iskustvo. Uz to, MCS otvara vrata novim načinima

konsumacije medijskog sadržaja, omogućavajući gledanje sportskih događaja uživo, koncerata i drugih događaja u stvarnom vremenu s gotovo nikakvim kašnjenjem. Sve u svemu, 5G tehnologija transformira način na koji doživljavamo i dijelimo multimedijalni sadržaj, čineći ga bržim, personaliziranijim i zadovoljavajućim [17].

4.3. Internet stvari

Internet stvari (IoT) predstavlja koncept u kojem različiti uređaji i objekti postaju međusobno povezani putem internetskog protokola kako bi razmjenjivali podatke i informacije. Ova globalna mreža povezanih uređaja omogućava ne samo prikupljanje podataka o njihovom okolišu, već i njihovu analizu, što rezultira korisnim uvidima. Kroz IoT, uređaji mogu automatizirati određene funkcije ili omogućiti ljudima daljinsko upravljanje, povećavajući učinkovitost i produktivnost u različitim sektorima, uključujući industriju, poljoprivredu, zdravstvo i transport. Unatoč svim prednostima, sigurnost i zaštita privatnosti ostaju ključni izazovi koji zahtijevaju pažnju. Usprkos tim izazovima, IoT će i dalje oblikovati način na koji živimo i radimo, pružajući veću kontrolu, učinkovitost i udobnost u svakodnevnom životu [19].

4.4 Umjetna inteligencija

Umjetna inteligencija (AI) igra ključnu ulogu u kontekstu 5G mreže, transformirajući način na koji upravljamo, optimiziramo i pružamo usluge. Uz 5G, AI postaje neophodan alat za dinamičko upravljanje resursima mreže kako bi se omogućila visoka propusnost podataka i minimalna latencija. Također, AI ima ključnu ulogu u održavanju mreže i predviđanju potencijalnih problema, što doprinosi većoj pouzdanosti i stabilnosti 5G mreže. Osim toga, AI se koristi za optimizaciju energetske učinkovitosti 5G mreže, što je posebno važno s obzirom na potrošnju energije u ovim mrežama. AI može dinamički prilagođavati energetske profile mreže kako bi se minimizirala potrošnja energije bez narušavanja performansi. Upravljanje prometom je još jedno područje gdje AI igra ključnu ulogu, osiguravajući da se resursi mreže alociraju u skladu s trenutnim zahtjevima prometa. To rezultira boljim korisničkim iskustvom i optimalnim isporukama usluga, posebno u gusto naseljenim urbanim područjima. Sigurnost mreže također je povezana s AI, jer AI sustavi mogu otkriti i reagirati na sigurnosne prijetnje u stvarnom vremenu. Ovo je ključno za zaštitu 5G mreže od različitih oblika napada. Napredne usluge i korisničko iskustvo također su obogaćeni AI-jem u 5G mreži, omogućavajući personalizirane i inteligentne usluge, uključujući virtualnu i proširenu stvarnost te brzi pristup sadržaju. Automatizacija i autonomija postaju stvarnost u upravljanju 5G mrežom, jer AI može

donositi brze odluke i izvršavati zadatke bez potrebe za ljudskim intervencijama. Ova sposobnost optimizira učinkovitost mreže i osigurava pouzdanost usluga [17].

5. Mogućnosti primjene 5G mreže u prometu i industriji

5G mreža svojim performansama značajno utječe na razvoj industrije i prometa. Industrija 4.0 predstavlja četvrtu industrijsku generaciju koja implementacijom 5G mreže donosi digitalizaciju, automatizaciju, povezivanje i pametne tehnologije u industrijske procese i proizvodnju. Ova generacija se temelji na upotrebi naprednih tehnologija kako bi se stvorila inteligentna i visoko učinkovita proizvodnja. Industrija 4.0 koristi IoT kao glavnu komponentu za povezivanje uređaja i sustava u industrijskom okruženju. Industrija 6.0 predstavlja novu fazu proizvodnje koja združuje najnovije tehnologije poput Interneta stvari, umjetne inteligencije, robotike i 3D ispisa kako bi se postigla veća produktivnost i učinkovitost u proizvodnji.

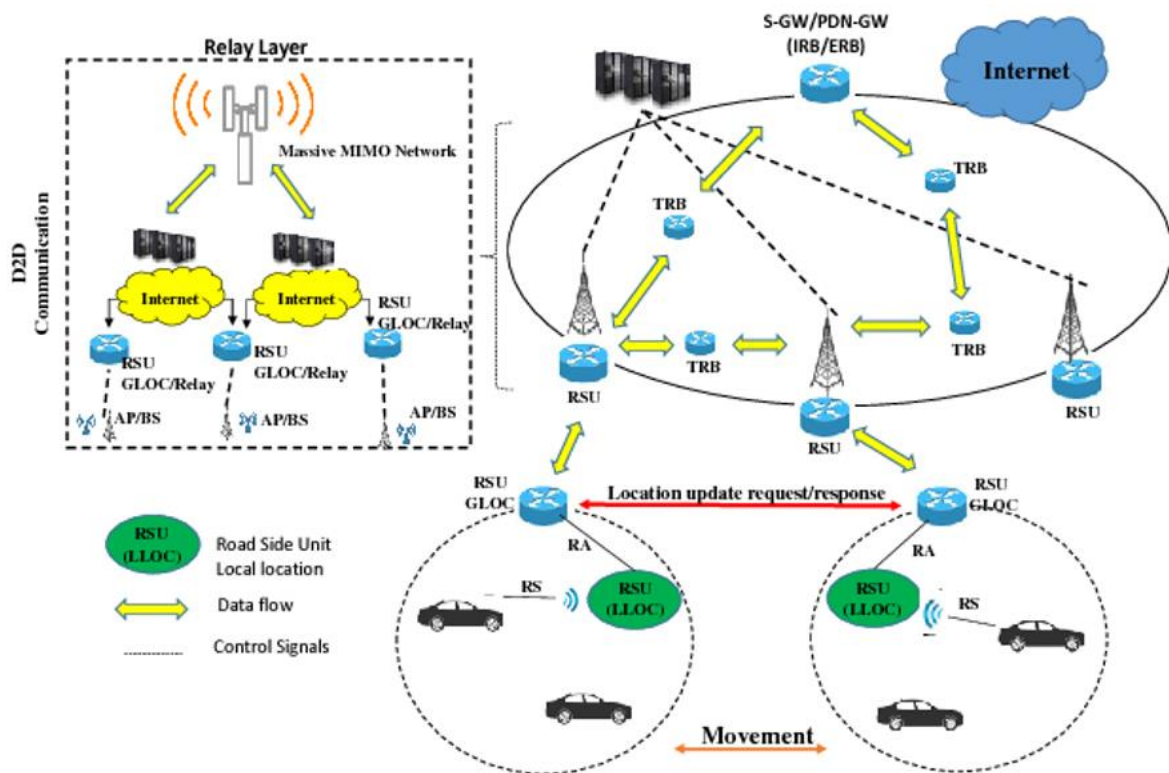
Primjena 5G mreže u grani prometa vidljiva je u razvoju autonomnih vozila koji uz pomoć mreže brzo i efikasno komuniciraju međusobno s ostalim automobilima i okolinom. Zbog velike količine uređaja koji mogu biti na mreži u prometu se razvijaju pametni gradovi, pametne prometnice, pametna raskrižja, pametne pomorske luke, pametne željeznice i pametni aerodromi.

5.1. Pametni prijevoz

Pametni prijevoz je sveobuhvatan koncept koji koristi napredne informacijske tehnologije kako bi transformirao način na koji se ljudi kreću i transportiraju u urbanim i ruralnim sredinama. Ovaj koncept obuhvaća niz ključnih elemenata:

Integrira vozila, infrastrukturu i korisnike putem senzora, pametnih uređaja i komunikacijskih mreža, prikazano na slici 7. To omogućuje brzu razmjenu podataka, uključujući informacije o prometu, stanju cesta i vremenskim uvjetima. Pametni prijevoz prikuplja, analizira i interpretira ogromne količine podataka o prometu. To uključuje informacije o brzinama vožnje, gužvama, nesrećama i drugim faktorima koji utječu na promet. Ovi sustavi koriste podatke o prometu kako bi automatski upravljali prometom. Na primjer, mogu prilagođavati semafore i putokaze kako bi optimizirali protok vozila i smanjili zagušenja. Pametni prijevoz promovira električna vozila i infrastrukturu za punjenje. Cilj je smanjiti emisije stakleničkih plinova i ovisnost o fosilnim gorivima. Razvoj autonomnih vozila predstavlja revoluciju u prometnom sektoru. Ta vozila su sposobna za samostalnu vožnju i

obećavaju poboljšanu sigurnost i efikasnost. Koncepte poput vožnje s dijeljenjem i javnih bicikala promovira pametni prijevoz kako bi se smanjila potreba za vlastitim vozilima i olakšalo dijeljenje resursa. Mobilne aplikacije omogućuju korisnicima da planiraju svoja putovanja, kupuju karte, rezerviraju dijeljenje vožnje i pristupe informacijama o prometu u stvarnom vremenu. Pametni prijevoz naglašava održivost kroz smanjenje emisija, učinkovitu upotrebu resursa i poticanje alternativnih oblika prijevoza poput bicikala i pješaćenja. Uvođenje naprednih sigurnosnih tehnologija, poput sustava za upozoravanje na sudar ili autonomnog kočenja, poboljšava sigurnost sudionika u prometu [20].



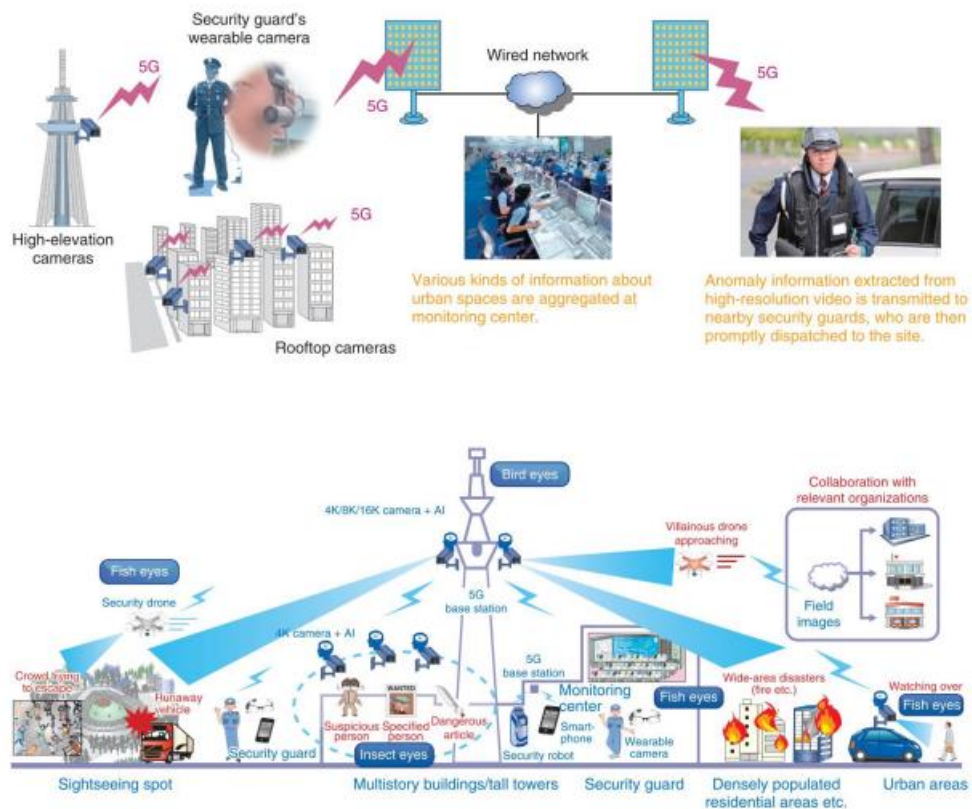
Slika 7. Arhitektura povezanosti 5G mreže i prometa

Izvor:[21]

5.2. Pametni gradovi

Pametni gradovi predstavljaju inovativan koncept urbanog razvoja koji se oslanja na 5G mrežu i napredne informacijske tehnologije kako bi integrirali različite aspekte gradskog života. Pametni gradovi koriste pametnu infrastrukturu sa sensorima i IoT uređajima za nadzor i upravljanje urbanim elementima. Infrastruktura pametnih gradova temelji se na integraciji naprednih informacijskih i komunikacijskih tehnologija, poput 5G mreže, senzora i uređaja IoT, kako bi unaprijedila urbanu sredinu. Ova infrastruktura obuhvaća brzu i pouzdanu mrežu koja

omogućava stvarno-vremensku komunikaciju između različitih uređaja i sistema u gradu. Senzori i uređaji prikupljaju podatke o kvaliteti zraka, gustoći prometa, energetskej potrošnji i drugim parametrima. Pametni gradovi također koriste sustave za pametnu distribuciju energije, pametno upravljanje prometom, digitalne usluge za građane, pametnu javnu rasvjetu i napredne alate za analizu podataka kako bi stvorili održivu, efikasnu i sigurnu urbanu okolinu, poboljšavajući tako kvalitetu života građana i optimizirajući korištenje gradskih resursa [22].



Slika 8. Arhitektura povezanosti 5G mreže i pametnog grada

Izvor:[23]

Pametni gradovi, kao što je prikazano na slici 8, obuhvaćaju širok spektar područja upravljanja gradom, uključujući transport, energetiku, zaštitu okoline, sigurnost, javne usluge i infrastrukturu. Primjeri uključuju pametne parkirne mjerače koji olakšavaju pronalazak parkirnih mjesta, pametno upravljanje prometom za optimizaciju ulične rasvjete i smanjenje gužvi, te koordinaciju pametnog javnog prijevoza radi poboljšanja učinkovitosti. Također, pametne tehnologije se koriste za očuvanje energije, praćenje ekoloških problema poput onečišćenja i klimatskih promjena te za unaprjeđenje javne sigurnosti [22].

Primjena 5G mreže u prometnom sustavu pruža brojne koristi različitim korisnicima. Vozači imaju brz pristup navigaciji i prometnim informacijama, dok putnici javnog prijevoza uživaju u boljoj povezanosti i internetu tijekom vožnje. Operateri javnog prijevoza optimiziraju usluge, hitne službe koriste brzu komunikaciju, prometni stručnjaci analiziraju podatke, a gradski planeri planiraju budućnost. Sve to čini prometni sustav sigurnijim i učinkovitijim za sve korisnike.

5.3. Autonomna vozila

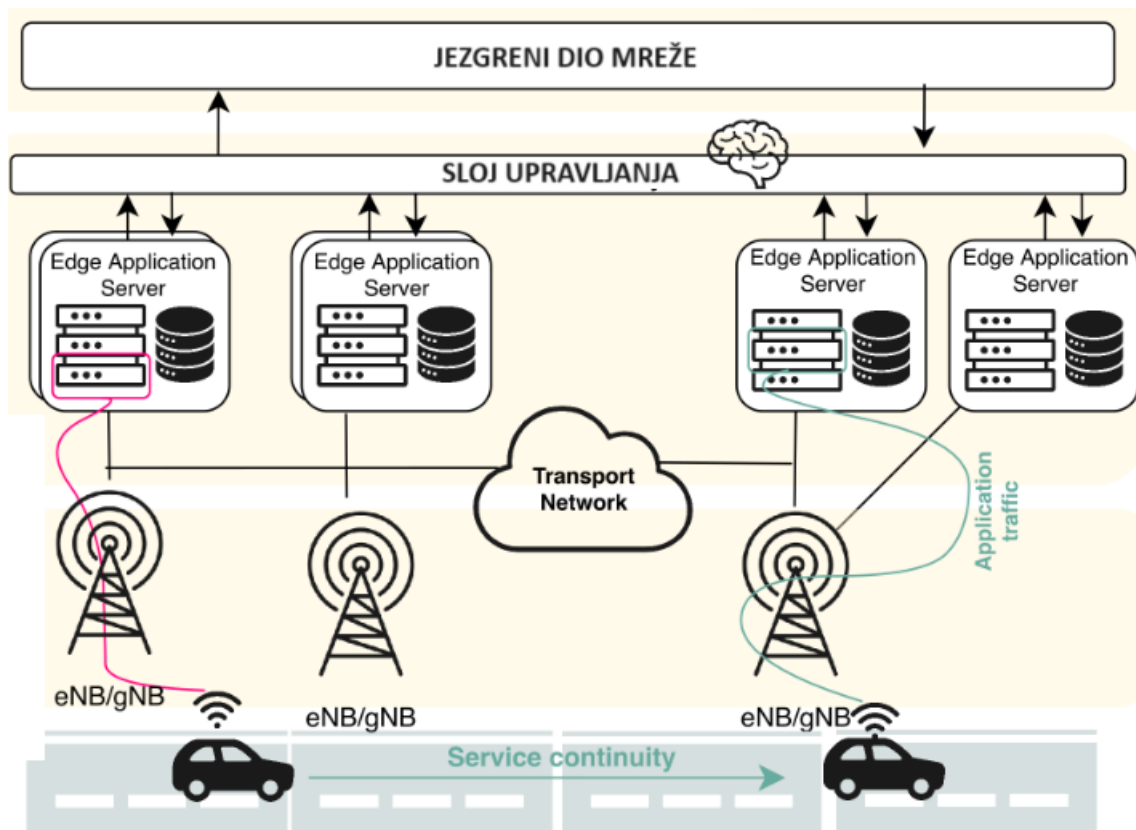
Autonomna vozila i 5G mreža zajedno čine sustav koji ima potencijal za razvoj i poboljšanje sigurnosti i efikasnosti cestovnog prometa. Glavna komponenta ovog sustava je komunikacija između senzora na vozilima i središnjeg računalnog sustava (CPU), a 5G mreža omogućuje ovu komunikaciju brzinom prijenosa podataka i niskom latencijom. Sensori, uključujući kamere, radare, LiDAR i ultrazvučne senzore, prikupljaju obilje podataka o okolini vozila, dok 5G omogućuje brzu i gotovo stvarno-vremensku razmjenu tih podataka s CPU-om vozila. Ovo omogućuje vozilima bolju percepciju okoline, što rezultira sigurnijim i preciznijim odlukama tijekom vožnje. Prednosti uključuju komunikacija uređaja prema uređaju (V2V-Vehicle-to-Vehicle) i komunikacija uređaja s infrastrukturom (V2I-Vehicle-to-Infrastructure), povećanu sigurnost, realno-vremensku analizu podataka i dijagnostiku. No, postoje izazovi, uključujući sigurnost podataka, pouzdanost mreže, regulativu i etička pitanja. S obzirom na ove aspekte, kombinacija autonomnih vozila i 5G mreže donosi značajne prednosti, ali zahtijeva pažljivo planiranje [23].

V2V komunikacija omogućuje autonomnim vozilima da međusobno razmjenjuju informacije u stvarnom vremenu. Primjerice, kada jedno autonomno vozilo primijeti naglo kočenje drugog vozila ispred sebe, ono trenutačno generira upozorenje koje se putem 5G mreže šalje drugim vozilima u blizini. Ovo upozorenje može sadržavati podatke o brzini, položaju i planiranim manevrima vozila. Ostala vozila interpretiraju ovo upozorenje i, ako je potrebno, prilagođavaju svoje akcije kako bi izbjegla sudaranje. V2V komunikacija značajno povećava sigurnost na cestama, jer omogućuje vozilima da surađuju i koordiniraju svoje akcije, čime se smanjuje rizik od nesreća. V2I komunikacija omogućuje autonomnim vozilima da komuniciraju s infrastrukturom na cestama, uključujući pametne semafore, prometne znakove i parkirališta. Na primjer, kada se autonomno vozilo približava pametnom semaforu, semafor šalje signal vozilu putem 5G mreže, obavještavajući ga o trenutnom statusu semafora i

preostalom vremenu do promjene svjetlosnog signala. Vozilo može tada prilagoditi svoju brzinu kako bi optimiziralo prolazak kroz raskrižje bez nepotrebnog zaustavljanja. Ova vrsta komunikacije poboljšava učinkovitost vožnje i smanjuje zastoje u prometu [23].

5G mreža i V2V komunikacija omogućuju vozilima da dijele informacije o stanju ceste i opasnostima u stvarnom vremenu. Primjerice, ako jedno vozilo detektira neočekivanu opasnost na cesti, poput leda ili prepreke, može odmah obavijestiti ostala vozila u blizini. To omogućuje vozilima da brže reagiraju i izbjegnu potencijalne nesreće. Osim toga, V2I komunikacija s pametnom infrastrukturom omogućuje poboljšanu regulaciju prometa, smanjenje brzine u zagušenjima i optimizaciju semafora kako bi se minimizirali zastoji i nesreće. 5G mreža osigurava brzu razmjenu senzorskih podataka središnjem računalu vozila. Senzori vozila neprestano prikupljaju podatke o okolini, uključujući informacije o drugim vozilima, pješacima, biciklistima i prometnoj signalizaciji. Ovi podaci se trenutačno analiziraju kako bi se identificirale potencijalne opasnosti i prilike. Na primjer, sustav autonomnog vozila može brzo identificirati prepreke na cesti i donijeti odluke o tome kako se sigurno kretati kroz okolinu [23].

5G omogućuje vozilima da kontinuirano šalju informacije o svom stanju i dijagnostici proizvođačima ili servisnim centrima. Ovo je ključno za održavanje vozila u optimalnom stanju. Na primjer, vozilo može detektirati probleme s kočnicama ili motorom i automatski obavijestiti servisni centar. Servisni centar može analizirati podatke i zakazati servisiranje prije nego što problem postane ozbiljniji, što pomaže u sprječavanju tehničkih kvarova na cesti i osiguranju kontinuirane sigurnosti vozila [23].



Slika 9. Autonomna vozila povezana na 5G mrežu

Izvor:[25]

Na slici 9. je prikazana komunikacija 5G mreže s autonomnim vozilom, vozilo opremljeno sensorima povezano je na 5G mrežu putem ugrađenog modema. Bazna stanica (gNodeB) uspostavlja brzu i niskolatentnu komunikaciju s vozilom, prikupljajući podatke o okolini i putu. Ti podaci se šalju prema upravljačkom sloju, koji je odgovoran za koordinaciju i upravljanje autonomnom vožnjom. Upravljački sloj analizira informacije iz senzora i putem 5G mreže šalje naredbe vozilu, uključujući promjenu brzine ili smjera vožnje. Ključne odluke o vožnji, poput izbjegavanja prepreka ili izračuna optimalnog puta, donose se u jezgrenom dijelu mreže. Jezgreni dio mreže također upravlja resursima i omogućava sigurnu razmjenu podataka s drugim vozilima i infrastrukturom na cesti. Ovaj složeni proces omogućava autonomnim vozilima brzu reakciju na prometne uvjete i osigurava sigurnu i učinkovitu vožnju.

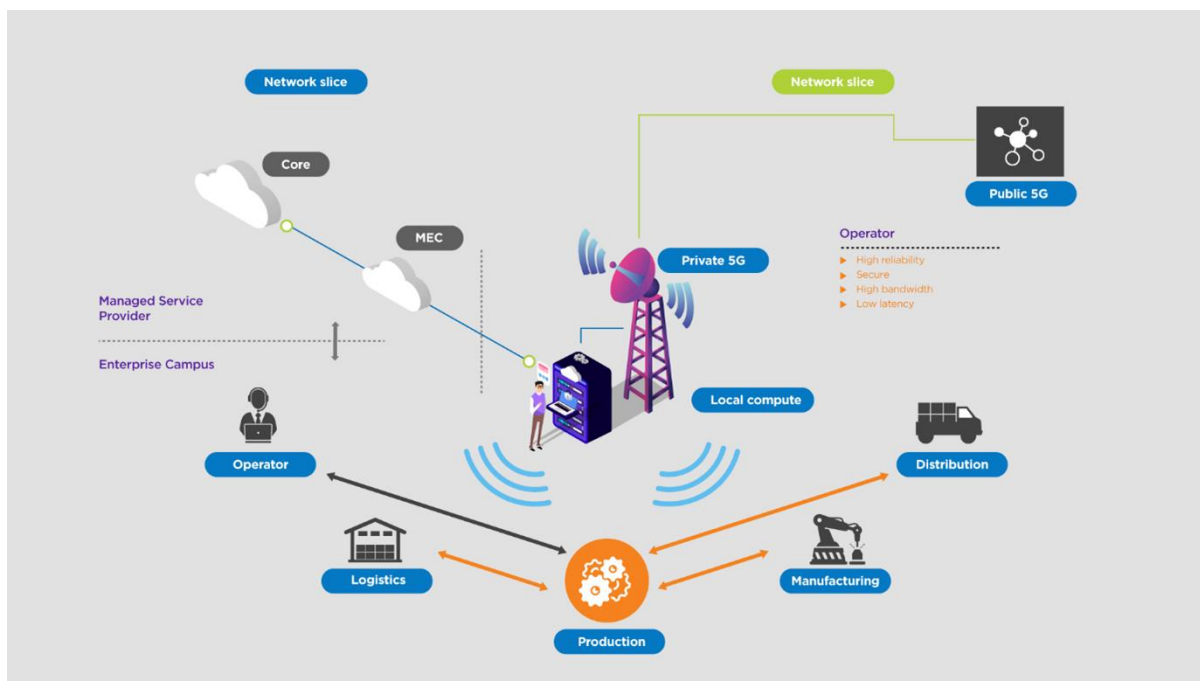
5.4. Dronovi i 5G mreža

Primjena dronova u kontekstu 5G mreže obuhvaća širok spektar korisnih aplikacija. Dronovi se koriste za brz i precizan nadzor i inspekciju infrastrukture poput dalekovoda, telekomunikacijskih tornjeva i mostova uz pomoć brze i stabilne 5G veze koja omogućuje realno-vremenski prijenos visokokvalitetnih slika i podataka. Također, dronovi se koriste za dostavu paketa i potrepština u urbanim i ruralnim područjima, a 5G mreža pruža siguran i efikasan sustav za upravljanje dostavom. U poljoprivredi, dronovi se primjenjuju za nadzor usjeva, primjenu pesticida i gnojiva te za procjenu stanja tla, a 5G omogućava brzi prijenos podataka za precizno upravljanje resursima. U industriji zabave, dronovi se koriste za spektakularno snimanje zračnih prizora u filmovima i reklamama, uz prijenos visoke rezolucije i 4K videozapisa u stvarnom vremenu putem 5G mreže. Dodatno, dronovi se primjenjuju i u geodetskim radovima za izradu karata i modela terena te u znanstvenim istraživanjima za prikupljanje podataka o okolišu i ekosustavima. Ova raznovrsna upotreba dronova u kombinaciji s brzom i pouzdanom 5G mrežom unapređuje učinkovitost i mogućnosti u različitim industrijama i sektorima [17].

5.5. Pametna industrija (Industrija 4.0 i 6.0)

Industrija 4.0 predstavlja koncept digitalne transformacije u proizvodnom sektoru. Ovaj koncept uključuje upotrebu naprednih tehnologija kao što su IoT, umjetna inteligencija, računalni sustavi u oblaku i automatizacija kako bi se stvorila pametna, povezana i visoko učinkovita proizvodnja. Industrija 4.0 stavlja naglasak na autonomiju, analizu podataka, integraciju sustava i sposobnost brze prilagodbe promjenama, prikazano na slici 10. Cilj joj je poboljšati produktivnost, kvalitetu proizvoda, smanjiti troškove i omogućiti proizvođačima da bolje zadovolje potrebe tržišta.

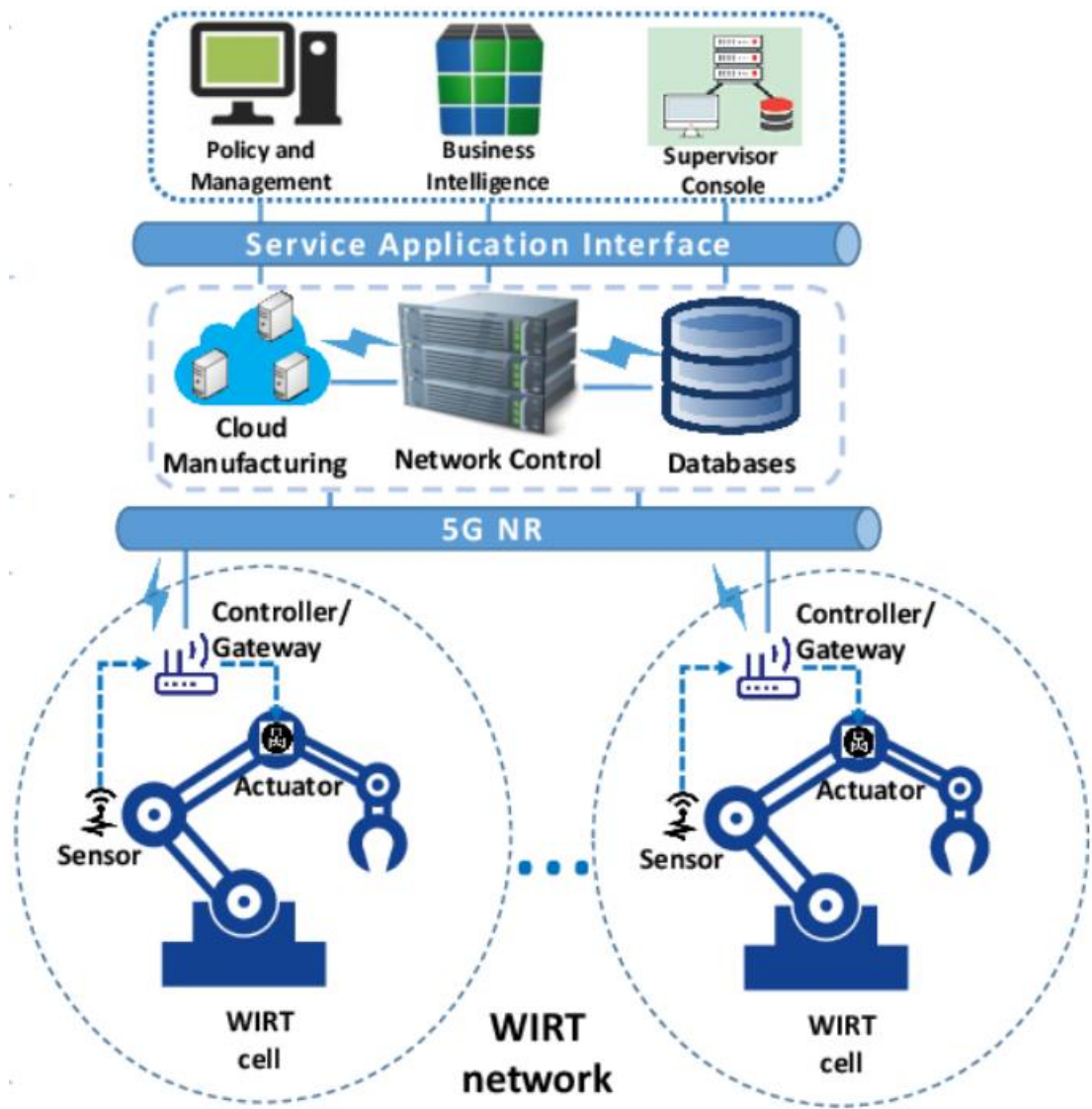
Industrija 6.0 nije široko rasprostranjen kao Industrija 4.0. Pojedini stručnjaci koriste ovu oznaku kako bi istaknuli još naprednije koncepte u industrijskoj evoluciji. Pretpostavka je da bi Industrija 6.0 obuhvatila još dublje integracije između ljudi, strojeva i tehnologije, uz napredne oblike umjetne inteligencije i robotsku automatizaciju koji bi radili u potpunosti autonomno.



Slika 10. Arhitektura povezanosti 5G mreže i industrije 4.0

Izvor:[26]

Primjenom 5G mreže razvijaju se pametne tvornice koje za svoj rad koriste inovacije vezane za IoT uređaje te se zbog toga IoT uređaji koriste za povezivanje različitih strojeva, senzora i računala kako bi se stvorio integrirani proizvodni sustav. Na primjer, senzori mogu pratiti performanse strojeva i očitavati podatke poput temperature, vibracija i potrošnje energije. Ti podaci se prikupljaju i analiziraju kako bi se predviđali kvarovi ili potrebni servisi, čime se smanjuje vrijeme nerada i povećava učinkovitost proizvodnje. Pomoću IoT senzora i analitičkih algoritama, tvrtke mogu implementirati sustave prediktivnog održavanja. To znači da se prate podaci o stanju opreme u stvarnom vremenu, a kada se primijeti bilo kakav znak potencijalnog kvara, sustav automatski obavještava nadležno osoblje i planira potrebno održavanje prije nego što dođe do kvara. To smanjuje neplanirane prekide u proizvodnji i štedi na troškovima održavanja. IoT uređaji omogućuju bolje praćenje i upravljanje inventarom i logistikom u tvornici. Senzori mogu pratiti svako kretanje robe ili materijala u stvarnom vremenu, što omogućuje bolje planiranje zaliha, smanjenje gubitaka i optimizaciju opskrbnog lanca. IoT senzori omogućuju stalno praćenje kvalitete proizvoda tijekom proizvodnje. Ako senzori otkriju odstupanja ili probleme, sustav može automatski zaustaviti proizvodnju ili prilagoditi parametre kako bi se osigurala dosljedna kvaliteta proizvoda [27].

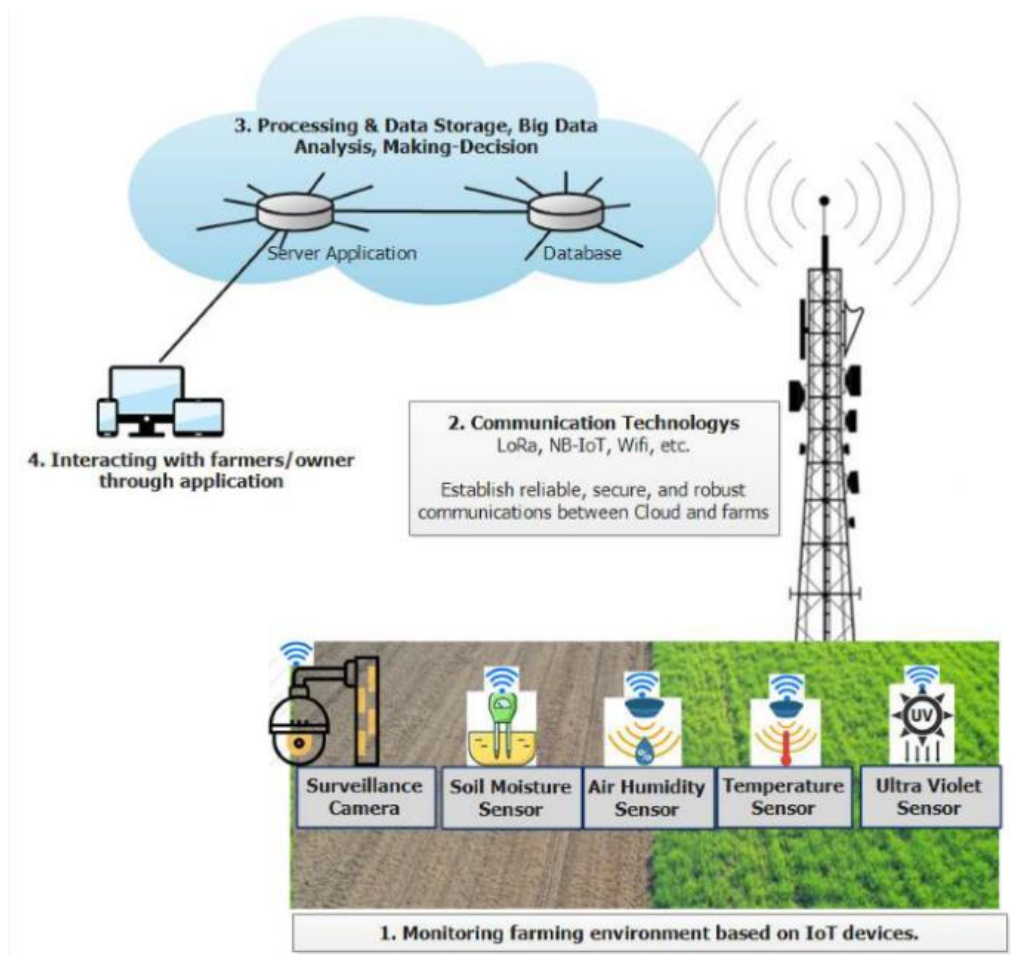


Slika 11. Povezanost pametne tvornice i 5G mreže

Izvor: [28]

Na slici 11. prikazana je povezanost uređaja unutar pametne tvornice i 5G mreže. U pametnim tvornicama povezanim na 5G mrežu, uređaji opremljeni sensorima prikupljaju raznolike podatke o proizvodnom procesu i okolini te ih brzo i pouzdano šalju preko 5G mreže do jezgrenog dijela mreže. Tu se podaci analiziraju, a na temelju njih se donose odluke, kao što su upozorenja na potencijalne kvarove ili optimizacija procesa. Nakon toga, jezgrena mreža šalje naredbe uređajima i aktuatorima kako bi izvršili odgovarajuće akcije, što može uključivati prilagodbu postavki strojeva, regulaciju temperature ili druge operacije. Ovaj kontinuirani proces omogućava optimizaciju proizvodnje uz brzu reakciju na promjene, što rezultira efikasnijim i konkurentnijim industrijskim operacijama.

Pametne farme i 5G mreža zajedno predstavljaju revoluciju u poljoprivrednoj industriji. Pametne farme koriste visokotehnološke uređaje i senzore kako bi povećale učinkovitost, produktivnost i održivost poljoprivredne proizvodnje. 5G omogućava brzo prikupljanje podataka s polja putem senzora koji mjere parametre kao što su temperatura tla, vlažnost, pH vrijednost, i druge uvjete koji utječu na rast usjeva. Traktori, kombajni i druge poljoprivredne mašine mogu biti opremljeni sensorima i kamerama koje pomažu u preciznom upravljanju poljoprivrednim aktivnostima, detaljno prikazano na slici 12. 5G omogućava brzu komunikaciju između opreme i centralnih sustava. Pametne farme koriste IoT uređaje za povezivanje različitih komponenti farme, od automatskog navodnjavanja do praćenja stanja stoke. 5G omogućava pouzdanu i brzu komunikaciju između svih IoT uređaja. Zahvaljujući 5G mreži, svi prikupljeni podaci brzo se šalju u oblak gdje se analiziraju u stvarnom vremenu.



Slika 12. Arhitektura pametne farme

Izvor:[29]

6. Zaključak

Peta generacija mobilnih mreža svojim performansama i prednostima donosi razvoj društva u kojem živimo. Svojim mogućnostima olakšava nam svakodnevni život upravo kroz sve širu i širu primjenu IoT uređaja uz pomoć kojih smo sve više povezani sa drugima oko nas i sa okolinom.

Arhitekture modernih industrijskih pogona i modernih prometnih sustava u povezanosti sa 5G mrežom čine izrazito složene i kompleksne sustave kojima je cilj i svrha pružiti što bržu, sigurniju i pouzdanu uslugu korisnicima.

5G mreža donosi nove tehnologije poput virtualne stvarnosti i proširene stvarnosti poboljšavajući način interakcije s digitalnim svijetom. Također omogućuje naprednu uporabu umjetne inteligencije za optimizaciju mrežnih resursa i personalizaciju usluga. Internet stvari omogućuju masovno povezivanje uređaja u različitim sektorima. Ova kombinacija brze povezanosti i moćnih tehnologija čini 5G mrežu važnim pokretačem digitalne inovacije.

Moderna industrijska postrojenja uz primjenu 5G mreže postaju dijelovi industrije 4.0 i 6.0 gdje je cilj da industrija bude moderniziranija koristeći napredne tehnologije i naprednije strojeve što rezultira manjim fizičkim zalaganjem zaposlenika, a bržim i točnijim proizvodnim procesima.

Primjena 5G mreže u prometu pruža bržu i sigurniju komunikaciju između vozila i infrastrukture, potičući automatiziranu vožnju i stvarajući pametnije gradove. To će rezultirati učinkovitijim prometom, većom sigurnošću i boljim iskustvom putnika.

Literatura

[1] Periša, M.: Autorizirani nastavni materijali (objavljeno na Merlinu), Arhitektura telekomuniacijske mreže, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2022.

[Pristupljeno: 3. srpanj 2023.]

[2] Šišul G, Ilić Ž. 5G.hr. Povijesni razvoj javnih mobilnih mreža; 2021. Preuzeto s:

<https://www.5g.hr/tehnologija/povijesni-razvoj-javnih-mobilnih-mreza/>

[Pristupljeno: 3. srpanj 2023.]

[3] "5G Architecture." Viavi. Preuzeto s web stranice: <https://www.viavisolutions.com/en-uk/what-5g-architecture>

[Pristupljeno: 8. srpnja 2023.]

[4] Peraković, D.: Autorizirana predavanja, Terminalni uređaji, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2022. (objavljeno na sustavu Merlin)

[Pristupljeno: 8. srpanj 2023.]

[5] Laricchia, F. (2023). "Forecast number of mobile devices worldwide from 2020 to 2025." Statista. Preuzeto s web stranice: <https://www.statista.com/statistics/245501/multiple-mobile-device-ownership-worldwide/>

[Pristupljeno: 15. srpnja 2023.]

[6] "5G NR gNodeB Base Stations." CableFree. Preuzeto s web stranice:

<https://www.cablefree.net/5g-lte/5g-nr-gnodeb-base-station/>

[Pristupljeno: 9. srpnja 2023.]

[7] Muhamed, A., Islam, M. (2016). "Massive MIMO for Fifth Generation (5G): Opportunities and Challenges." IEEE. Preuzeto s web stranice:

<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7808281>

[Pristupljeno: 9. srpnja 2023.]

[8] "Massive MIMO." 5G Americas, 2023. Preuzeto s web stranice:

<https://www.5gamericas.org/samsung-shares-massive-mimo-roadmap-in-new-whitepaper/>

[Pristupljeno: 9. srpnja 2023.]

[9] "What is 5G Beamforming, Beam Steering, and Beam Switching with Massive MIMO." Metaswitch. Preuzeto s web stranice: <https://www.metaswitch.com/knowledge-center/reference/what-is-beamforming-beam-steering-and-beam-switching-with-massive-mimo>

[Pristupljeno: 15. srpnja 2023.]

[10] "What is 5G Beamforming, Beam Steering, and Beam Switching with Massive MIMO." Metaswitch. Preuzeto s web stranice: <https://www.metaswitch.com/knowledge-center/reference/what-is-beamforming-beam-steering-and-beam-switching-with-massive-mimo>

[Pristupljeno: 15. srpnja 2023.]

[11] What is DSS (Dynamic Spectrum Sharing), ShareTechnote. Preuzeto s : https://www.sharetechnote.com/html/5G/5G_DSS.html

[Pristupljeno: 15. srpanj 2023.]

[11] "What is DSS (Dynamic Spectrum Sharing)." ShareTechnote. Preuzeto s web stranice: https://www.sharetechnote.com/html/5G/5G_DSS.html

[Pristupljeno: 15. srpnja 2023.]

[12] Hussain, A. "5G SDN and NFV." Medium. Preuzeto s web stranice: <https://medium.com/@alifyahussain/5g-sdn-and-nfv-e411dbe927b1>

[Pristupljeno: 15. srpnja 2023.]

[13] Remmert, H. "What Is 5G Network Architecture." Digi International, 2021. Preuzeto s web stranice: <https://www.digi.com/blog/post/5g-network-architecture>

[Pristupljeno: 15. srpnja 2023.]

[14] "Authentication Server Function." Telcoware. Preuzeto s web stranice: http://www.telcoware.com/eng_191127/01_product/0906_ausf.asp

[Pristupljeno: 15. srpnja 2023.]

- [15] "5G Core Network Overview." Telecompedia. Preuzeto s web stranice: <https://telecompedia.net/5g-core-network-overview/> [Pristupljeno: 10. kolovoz 2023.]
- [16] "5G Core Network." GeeksForGeeks, 2022. Preuzeto s web stranice: <https://www.geeksforgeeks.org/5g-network-architecture/>
[Pristupljeno: 5. kolovoz 2023.]
- [17] Heejung, Y., Howon, L., & Hongbeom, J. "What is 5G? Emerging 5G Mobile Services and Network Requirements." MDPI, 2017. Preuzeto s web stranice: https://www.researchgate.net/publication/320435616_What_is_5G_Emerging_5G_Mobile_Services_and_Network_Requirements
[Pristupljeno: 20. kolovoz 2023.]
- [18] "Difference between AR and VR.", 24FramesDigital, 2022. Preuzeto s web stranice: <https://www.24framesdigital.com/blog/blog.aspx?contentid=ar-vr-difference>
[Pristupljeno: 20. kolovoz 2023.]
- [19] Gillis, A. S. "Internet of Things." TechTarget.
Preuzeto s web stranice: <https://www.techtarget.com/iotagenda/definition/Internet-of-Things-IoT>
[Pristupljeno: 25. kolovoz 2023.]
- [20] Mazur, S. "An Introduction to Smart Transportation: Benefits and Examples." Digi, 2020. Preuzeto s web stranice: <https://www.digi.com/blog/post/introduction-to-smart-transportation-benefits>
[Pristupljeno: 25. kolovoz 2023.]
- [21] Din S., Paul A., Ahmad A., Ahmed S. H., Jeon G., Rawat D. "Hierarchical architecture for 5G-based software-defined intelligent transportation system." IEEE INFOCOM, 2018. Preuzeto s web stranice: <https://www.semanticscholar.org/paper/Hierarchical-architecture-for-5G-based-intelligent-Din-Paul/ab3a69cd509714958e714ca9fa3535c693c6f927>
[Pristupljeno: 25. kolovoz 2023.]

[22] Shea, S. "Smart City." TechTarget. Preuzeto s web stranice:

<https://www.techtarget.com/iotagenda/definition/smart-city>

[Pristupljeno: 27. kolovoz 2023.]

[23] Chen Yang, Peng Liang, Liming Fu, Guorui Cui, Fei Huang, Feng Teng, Yawar Abbas Bangash. "Using 5G in Smart Cities: A Systematic Mapping Study.", 2022.

[24] "Autonomous Vehicles and 5G Network." Robustel. Preuzeto s web stranice:

<https://www.robustel.com/2022/12/how-5g-autonomous-vehicles-will-benefit-from-5g-1/>

[Pristupljeno: 26. kolovoz 2023.]

[25] Marquez-Barja, J., Slamnik-Kriještorac, N. "Orchestration at the Edge Reduces Network Latency." 5Gtechnologyworld, 2022. Preuzeto s web stranice:

<https://www.5gtechnologyworld.com/orchestration-at-the-edge-reduces-network-latency/>

[Pristupljeno: 27. kolovoz 2023.]

[26] Banerji, M. "Private 5G as the Enabler of Industry 4.0." HCLTech, 2022. Preuzeto s web stranice: <https://www.hcltech.com/blogs/private-5g-enabler-industry-40?amp>

[Pristupljeno: 27. kolovoz 2023.]

[27] "Smart Factory." Avsystem, 2020. Preuzeto s web stranice:

<https://www.avsystem.com/blog/smart-factory/>

[Pristupljeno: 26. kolovoz 2023.]

[28] Berardinelli, G., Mahmood, N. H., Rodriguez, I., Mogensen, P. "Beyond 5G Wireless IRT for Industry 4.0: Design Principles and Spectrum Aspects." IEEE, 2018. Preuzeto s web stranice:

<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8644245&tag=1>

[Pristupljeno: 26. kolovoz 2023.]

[29] Quy, V. K., Hau, N. V. "IoT-Enabled Smart Agriculture: Architecture, Applications, and Challenges." MDPI, 2022. Preuzeto s web stranice: [https://www.mdpi.com/2076-](https://www.mdpi.com/2076-3417/12/7/3396)

[3417/12/7/3396](https://www.mdpi.com/2076-3417/12/7/3396)

[Pristupljeno: 26. kolovoz 2023.]

Popis kratica

IoT	(Internet of Things) Internet stvari
MIMO	(Multiple Input, Multiple Output) Višestruki ulaz, višestruki izlaz
SDN	(Software-Defined Networking) Mreža definirana softverom
NFV	(Network Function Virtualization) Virtualizacija mrežnih funkcija
UE	(User Equipment) Korisnička oprema
VR	(Virtual Reality) Virtualna stvarnost
AR	(Augmented Reality) Proširena stvarnost
RF	(Radio Frequency) Radio frekvencija
5G gNodeB	(5G Base Station) 5G bazna stanica
IMEI	(International Mobile Equipment Identity) Međunarodni identifikacijski broj mobilne opreme
mmWave	(Millimeter Waves) Milimetarski valovi
DSS	(Dynamic Spectrum Sharing) Dinamička podjela spektra
URLLC	(Ultra-Reliable Low Latency Communication) Ultra pouzdana niska latencija komunikacije
mMTC	(Massive Machine Type Communication) Masivan komunikacija strojeva i uređaja
AUSF	(Authentication Server for Services (5G)) Autentifikacijski server za usluge 5G mreže
AMF	(Access and Mobility Management Function) Upravljačka funkcija mobilnosti
DN	(Data Network) Mreža podataka
NEF	(Network Exposure Function) Entitetska funkcija mrežnog upravljanja
NRF	(Network Repository Function) Funkcija mrežnog repozitorija

NSSAAF	(Network Slice Specific Authentication and Authorization Function) Funkcija autentikacije i autorizacije specifična za mrežni rez
NSSF	(Network Slice Selection Function) Funkcija odabira mrežnog reza
PCF	(Policy Control Function) Funkcija kontrole politike
SMF	(Session Management Function) Funkcija upravljanja sesijama
UDM	(Unified Data Management) Ujedinjeno upravljanje podacima
UDR	(Unified Data Repository) Ujedinjeni repozitorij podataka
UPF	(User Plane Function) Funkcija korisničkog sloja
AF	(Application Function) Aplikacijska funkcija
SCP	(Service Communication Proxy) Komunikacijske usluge
V2V	(Vehicle-to-Vehicle Communication) Komunikacija vozilo-vozilo
V2I	(Vehicle-to-Infrastructure Communication) Komunikacija vozilo-infrastruktura
3GPP	(3rd Generation Partnership Project) Projekt partnerstva treće generacije
AI	(Artificial Intelligence) Umjetna inteligencija

Popis slika

Slika 1. Segmentacija mreže	3
Slika 2. Statistički prikaz porasta broja terminalnih uređaja	8
Slika 3. MIMO tehnologija- prikaz emitiranja signala	10
Slika 4. Oblikovanje snopa signala	12
Slika 5. Arhitektura 5G mreže	14
Slika 6. Kategorizacija scenarija mobilnih usluga 5G mreže.....	22
Slika 7. Arhitektura povezanosti 5G mreže i prometa	27
Slika 8. Arhitektura povezanosti 5G mreže i pametnog grada	28
Slika 9. Autonomna vozila povezana na 5G mrežu	31
Slika 10. Arhitektura povezanosti 5G mreže i industrije 4.0.....	33
Slika 11. Povezanost pametne tvornice i 5G mreže	34
Slika 12. Arhitektura pametne farme	35

Popis tablica

Tablica 1. Razvoj mobilnih mreža	4
Tablica 2. Razvoj baznih stanica	13
Tablica 3. Tehnički zahtjevi za 5G usluge	19
Tablica 4. Tehnički zahtjevi za 5G mrežu	20
Tablica 5. Zahtjevi za 5G usluge u 3GPP tehnologijama.....	21

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti
Vukelićeva 4, 10000 Zagreb

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOSTI


Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je _____ završni rad
(vrsta rada)

isključivo rezultat mojega 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/diplomskog rada pod naslovom _____ Arhitektura 5G mreže i mogućnosti primjene _____, u Nacionalni repozitorij završnih i diplomskih radova ZIR.

Student/ica:

U Zagrebu, 11. rujan 2023.

Ivan Havliček, 
(ime i prezime, potpis)