

**SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, STROJARSTVA I
BRODOGRADNJE**

**POSLIJEDIPLOMSKI DOKTORSKI STUDIJ
ELEKTROTEHNIKA I INFORMACIJSKA TEHNOLOGIJA**

KVALIFIKACIJSKI ISPIT

**POBOLJŠANJE ENERGETSKE
UČINKOVITOSTI MOBILNIH
KOMUNIKACIJSKIH MREŽA NAPREDNIM
UPRAVLJANJEM RESURSIMA MREŽE**

Amar Kukuruzović

Split, lipanj 2026.

Sadržaj

1.	UVOD	2
1.1	Motivacija i problem potrošnje energije radio komunikacija	2
1.2	Uloga fronthaul i midhaul segmenata mreže	3
2.	EVOLUCIJA MOBILNIH KOMUNIKACIJSKIH MREŽA	5
2.1	Kratak pregled razvoja (0G–5G)	5
2.2	5G arhitektura	7
2.2.1	O-RAN arhitektura	10
2.2.2	Put prema Nakon 5G/6G mrežama	11
3.	ENERGETSKA UČINKOVITOST MOBILNIH KOMUNIKACIJSKIH MREŽA	14
3.1	Definicija i metrike energetske učinkovitosti	14
3.2	Metrike potrošnje energije mobilnih sustava	18
4.	OPTIMIZACIJA POTROŠNJE ENERGIJE	20
4.1	Upravljanje radio resursima	20
4.2	Režim mirovanja i dinamička aktivacija resursa RAN-a	22
4.2.1	Implementacija režima mirovanja i dinamičke aktivacije resursa	24
4.3	SDN/NFV optimizacija	25
4.3.1	Utjecaj primjene SDN i NFV u 5G mobilnim mrežama na EE	28
4.4	Primjena optičkih tehnologija	29
5.	AI-POTPOMOGNUTO UPRAVLJANJE I AUTONOMIJA MREŽA	36
5.1	AI u upravljanju energijom	36
5.2	Samoorganizirane mreže	39
5.3	Integracija komunikacije i senzorskog opažanja	42
6.	ZAKLJUČAK	47
	LITERATURA	48
	POPIS OZNAKA I KRATICA	53
	SAŽETAK	56

1. UVOD

Suvremeni razvoj radio komunikacijskih mreža karakterizira kontinuirani porast zahtjeva za prijenosnim kapacitetom i pouzdanošću usluga, što rezultira povećanom složenošću mrežnih sustava te rastućom potrošnjom energije. U tom kontekstu, radio pristupni dio mreže (engl. Radio Access Network - RAN) prepoznaje se kao dominantan izvor energetske potrošnje, s udjelom od preko 80% [1], čime se dodatno naglašava potreba za unapređenjem mehanizama upravljanja mrežnim resursima. Primjena virtualiziranih i centraliziranih arhitektura, kao, što su C-RAN (engl. Centralized RAN – C-RAN) i O-RAN (engl. Open RAN – O-RAN), omogućuje višu razinu fleksibilnosti i skalabilnosti mreže, ali istovremeno uvodi dodatne energetske zahtjeve, osobito u fronthaul i midhaul segmentima. Zbog potrebe za osiguravanjem visokih brzina prijenosa i niskog kašnjenja, ovi segmenti imaju značajan utjecaj na ukupnu energetska potrošnju komunikacijskog sustava.

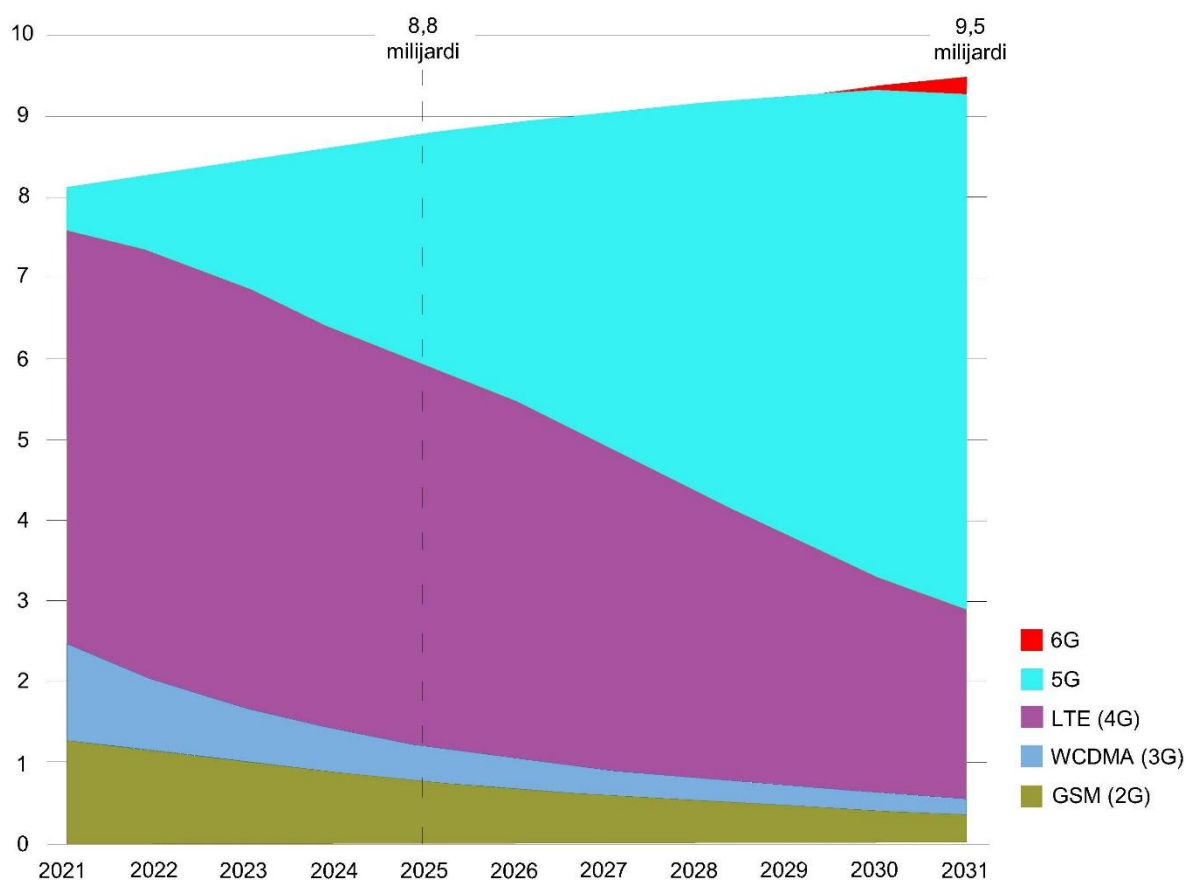
Unapređenje učinkovitosti upravljanja mrežnim resursima, koje uključuje uštede energije u vremenskoj, prostornoj, frekvencijskoj domeni i energetski učinkovito usmjeravanje bežičnog signala, te prilagodbu mrežnih funkcija i elemenata u skladu s promjenjivim prometnim uvjetima, predstavlja jedan od ključnih pristupa optimizaciji energetske učinkovitosti suvremenih mobilnih radio komunikacijskih sustava [2]. U tom kontekstu, sve veći značaj pridaje se primjeni inteligentnih i adaptivnih mehanizama upravljanja koji omogućuju kontekstno uvjetovano i pravovremeno donošenje odluka. Ovaj rad usmjeren je na sustavnu analizu mogućnosti unapređenja energetske učinkovitosti radio komunikacijskih mreža primjenom naprednih pristupa upravljanju resursima, uz poseban naglasak na suvremene mrežne arhitekture te identifikaciju ključnih izazova.

1.1 Motivacija i problem potrošnje energije radio komunikacija

Razvoj suvremenih radio komunikacijskih mreža obilježen je kontinuiranim povećanjem zahtjeva za prijenosnim kapacitetom, pouzdanošću i dostupnošću komunikacijskih usluga. Različite primjene, uključujući širokopojasne komunikacije, senzorske mreže i industrijske sustave, generiraju sve veće količine podataka, što dovodi do povećanja složenosti i opterećenja komunikacijske infrastrukture. Kao reprezentativan primjer mogu se istaknuti mobilne radio komunikacijske mreže, kod kojih se do 2031. godine očekuje široka implementacija 5G sustava, uz povećanje brzina prijenosa podataka i do tri reda veličine u odnosu na prethodne generacije, dok se istovremeno postavljaju zahtjevi za smanjenjem ukupne potrošnje energije mreže [3]. S druge strane, prema [4] broj veza Internet stvari (engl. Internet of Things – IoT) u svijetu za 2025 godinu je 19,8 milijardi, te su predviđanja da će broj ovih veza narasti na 40,6 milijardi do 2034 godine, od čega je 54% ovih veza ostvareno radio komunikacijama (mobilnim celularnim i WiFi vezama) [5]. Na Slici 1.1 [6], prikazan je trend porasta 5G korisnika za koji su neophodni preduvjeti, proširenje mrežne infrastrukture što za sobom povlači i znatno povećanu potrošnju energije, budući da po izvještaju [7], 5G bazna postaja konzumira 70% više energije od bazne postaje u kojoj je implementirana tehnologija 2G, 3G i 4G zajedno. Iz prethodno iznesenog jasno je razvidna veličina i značaj radio komunikacijskog tržišta u kojem dominiraju mobilne mreže, kao i potencijalni opseg budućih energetske zahtjeva koji će pratiti njegov daljnji razvoj.

Uvažavajući podatak da 75-90% vremena resursi bazne postaje u mobilnim mrežama, ostaju neiskorišteni [8], jasno pokazuju da postoji prostor za jako veliki napredak u pogledu smanjenja potrošnje energije u RAN dijelu komunikacija. Smanjenje potrošnje energije direktno je povezano sa operativnim rashodima (engl. Operational Expenditure – OPEX) davatelja usluga i servisa iz domene radio komunikacija, što je opet u direktnoj vezi sa cijenom

tih usluga i servisa. Potrošnja energije obično predstavlja oko 20-40% ukupnog OPEX-a mreže [9].



Slika 1.1 Broj korisnika mobilnih radio komunikacija po tehnologijama [6]

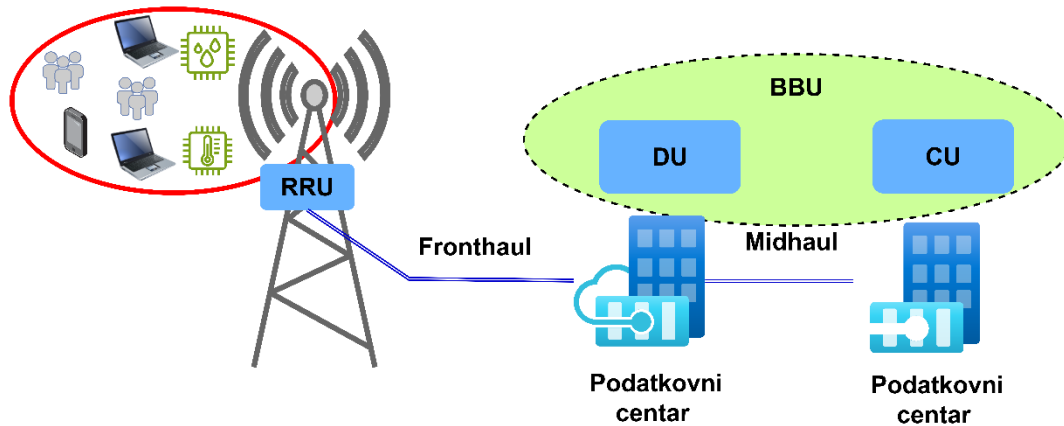
Smanjenjem OPEX-a utječe se na dostupnost usluga većem broju korisnika zbog izvjesno manje cijene. Sljedeći važan aspekt neophodnosti smanjenja potrošnje energije je karbondioksid (engl. Carbon Dioxide - CO₂) otisak. Telekomunikacijska industrija odgovorna je za oko 2% ukupnih globalnih emisija CO₂, sa predviđanjem rasta na 8% do 2030 i 14% do 2040 godine [10], [11]. Pružatelji telekomunikacijskih usluga imaju potencijal utjecati na do 15% globalnih emisija CO₂ što predstavlja značajan postotak [11].

Navedeni trendovi jasno ukazuju na potrebu za sustavnim pristupom unapređenju energetske učinkovitosti mobilnih radio komunikacijskih mreža. Poseban naglasak pritom se stavlja na optimizaciju rada radio pristupnog dijela mreže kroz učinkovitije upravljanje dostupnim resursima. U tom kontekstu, razvoj naprednih i adaptivnih mehanizama upravljanja nameće se kao ključan preduvjet za smanjenje potrošnje energije uz očuvanje zahtijevane razine performansi sustava.

1.2 Uloga fronthaul i midhaul segmenata mreže

Kao što je prethodno istaknuto, najveća potrošnja energije je u RAN dijelu 5G mreže. Ovu arhitekturu karakterizira odvajanje jedinice osnovnog pojasa (engl. Base Band Unit - BBU) i udaljene radio jedinice/glavne jedinice (engl. Remote Radio Head/Unit - RRH/U) kao dva glavna elementa 5G bazne postaje. Budući da je došlo do razdvajanja ova dva elementa, ostvaruju se pretpostavke da se BBU i RRU (RRH) mogu implementirati na različitim fizičkim lokacijama. Nadalje, u 5G RAN-u uvodi se podijeljena BBU arhitektura, gdje je funkcionalnost

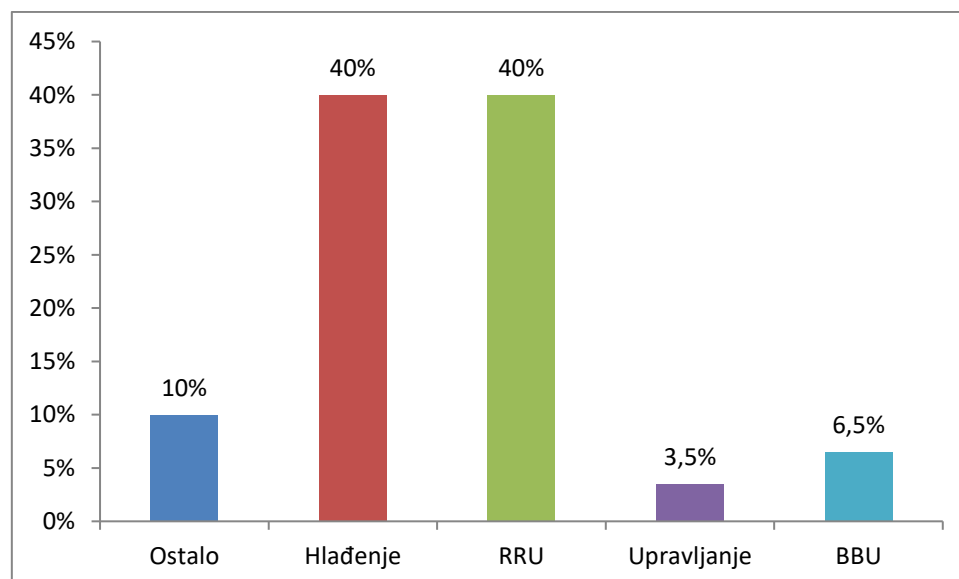
BBU-a općenito podijeljena na distribucijsku jedinicu (engl. Distributed Unit - DU) i centralnu jedinicu (engl. Central Unit - CU). Dalje, čak DU i CU ne moraju biti implementirani na istoj fizičkoj lokaciji (Slika 1.2). To znači da se BBU funkcionalnosti DU i CU mogu distribuirati i implementirati u oblaku. Dok veza poznata kao fronthaul omogućuje optičku vezu između DU i RRU (RRH), veza poznata kao midhaul je paketna optička veza koja povezuje CU i DU u 5G RAN arhitekturi.



Slika 1.2 Arhitektura 5G RAN-a [3]

Fronthaul i midhaul nisu vezani isključivo za mobilne sustave. To je arhitektonski koncept koji se pojavljuje kad god postoji razdvajanje funkcija između radijskog dijela i obrade, te samim tim su primjenjivi na svaku drugu radio komunikaciju.

Na Slici 1.3 prikazani su postotni podaci o tome kolika je potrošnja energije u pojedinim dijelovima arhitekture sa Slike 1.2.



Slika 1.3 Sveukupna potrošnja energije RAN dijela mreže [12]

Slika 1.3 jasno prikazuje na kojem segmentu RAN-a je potrebno najaviše intervenirati kako bi se ukupna potrošnja energije u konačnici smanjila.

2. EVOLUCIJA MOBILNIH KOMUNIKACIJSKIH MREŽA

Evolucija mobilnih komunikacijskih mreža karakterizirana je kontinuiranim tehnološkim napretkom u području prijenosnih tehnika, mrežnih arhitektura te strategija upravljanja resursima. Tijekom proteklih desetljeća, mobilni sustavi transformirali su se iz relativno jednostavnih i centraliziranih struktura u složene, distribuirane i virtualizirane arhitekture koje omogućuju povećanu fleksibilnost, skalabilnost i operativnu učinkovitost. Takav razvoj primarno je uvjetovan eksponencijalnim rastom zahtjeva za prijenosnim kapacitetom, smanjenjem kašnjenja i povećanjem pouzdanosti usluga, no istodobno je rezultirao i značajnim porastom složenosti sustava te pripadajućih energetske zahtjeva. U kontekstu mobilnih mreža, evolucija arhitekture, osobito unutar radio pristupnog dijela mreže, izravno utječe na način upravljanja resursima i ukupnu energetske učinkovitost sustava. Stoga je za razumijevanje suvremenih pristupa optimizaciji potrošnje energije nužno analizirati razvojne trendove mobilnih komunikacijskih mreža, s posebnim naglaskom na najnovije generacije i arhitekturne koncepte

2.1 Kratak pregled razvoja (0G–5G)

Evolucija mobilnih komunikacijskih sustava predstavlja kontinuirani tehnološki razvoj usmjeren na povećanje kapaciteta mreže, poboljšanje kvalitete usluge te omogućavanje novih komunikacijskih servisa. Ovaj razvoj može se promatrati kroz generacijski pristup, počevši od pre-celularnih sustava pa sve do suvremenih širokopojsnih mobilnih mreža. Prethodno razdoblje mobilnih komunikacija, poznato kao **0G (pre-celularna tehnologija)**, karakterizirano je analognim sustavima s ograničenim kapacitetom i bez podrške za prekapćanje (engl. handover) ili roaming funkcionalnosti. Komunikacija se odvijala putem jednostavnih radio telefonskih sustava, često u *half-duplex* režimu, što je značajno ograničavalo efikasnost i kvalitetu usluge. Također, ovi sustavi nisu koristili koncept ćelija, što je dodatno ograničavalo skalabilnost mreže. Ključni tehnološki iskorak ostvaren je uvođenjem ćelijskog koncepta i ponovne upotrebe frekvencija, čime je omogućeno značajno povećanje kapaciteta mreže. Podjelom geografskog područja na ćelije i ponovnom upotrebom frekvencijskog spektra u dovoljno udaljenim ćelijama postavljeni su temelji modernih mobilnih mreža [2].

Prva generacija (1G) mobilnih mreža pojavljuje se početkom 1980-ih i temelji se na analognoj tehnologiji. Ovi sustavi su bili dizajnirani isključivo za prijenos govora koristeći frekvencijsku modulaciju i višestruki pristup s frekvencijskom podjelom (engl. Frequency Division Multiple Access – FDMA). Tipični predstavnici 1G sustava uključuju sisteme AMPS (engl. Advanced Mobile Phone System), NMT (engl. Nordic Mobile Telephone) i TACS (engl. Total Access Communication System). Iako su omogućili mobilnu komunikaciju na široj razini, 1G sustavi su imali niz nedostataka, uključujući ograničen kapacitet, lošu sigurnost i neefikasno korištenje spektra.

Uvođenjem **druge generacije (2G)** dolazi do prijelaza s analognih na digitalne komunikacije, čime se postiže značajno poboljšanje u kvaliteti prijenosa i efikasnosti spektra, a najznačajniji standard je GSM (engl. Global System for Mobile Communications). Digitalizacija omogućava dodatne usluge poput usluga kratkih poruka (engl. Short Message Service – SMS), enkripcije i pouzdanijeg upravljanja signalizacijom. GSM sustav, kao dominantna tehnologija druge generacije, razvijen je s ciljem uspostavljanja jedinstvenog digitalnog standarda mobilne komunikacije. Radi u više frekvencijskih pojaseva (900 MHz, 1800 MHz i 1900 MHz) te koristi kombinaciju FDMA i višestrukog pristupa s vremenskom podjelom (engl. Time Division Multiple Access - TDMA) pristupa, gdje se svaki frekvencijski kanal dijeli na vremenske odsječke, omogućavajući istovremenu komunikaciju više korisnika. Standardni GSM kanal širine 200 kHz sadrži osam vremenskih odsječaka, pri čemu ukupna

brzina prijenosa doseže približno 270 kbps, raspodijeljena između korisnika. Dodatno, GSM uvodi ključne funkcionalnosti poput kartice za identifikaciju korisnika (engl. Subscriber Identity Module - SIM), međunarodnog roaminga i sigurnosnih mehanizama, čime mobilne mreže postaju globalno interoperabilne. Kasnije nadogradnje poput GPRS-a (engl. General Packet Radio Service) i EDGE-a (engl. Enhanced Data rates for GSM Evolution) omogućuju paketni prijenos podataka i predstavljaju prijelaz prema podatkovno orijentiranim mrežama (tzv. 2.5G i 2.75G), čime se dodatno povećavaju brzine prijenosa i omogućava pristup uslugama internetskog protokola (engl. Internet Protocol – IP).

Daljnji razvoj vodi prema **trećoj generaciji (3G)**, koja uvodi paketno komutirane tehnologije i omogućava širokopojasni prijenos podataka. 3G mobilne mreže temelje se na standardima poput UMTS-a (engl. Universal Mobile Telecommunications System) i CDMA2000 (engl. Code Division Multiple Access 2000), koji koriste temeljene tehnike višestrukog pristupa s kodnom podjelom (engl. Code Division Multiple Access – CDMA), odnosno širokopojasni CDMA (engl. Wideband CDMA – WCDMA) i CDMA, pri čemu omogućavaju istovremeni prijenos govora i podataka uz znatno veće brzine. Ova generacija omogućava mobilni pristup internetu, video pozive i multimedijske usluge, čime mobilne komunikacije prelaze iz osnovnih komunikacijskih servisa u platformu za širok spektar digitalnih aplikacija. Uvođenjem 3G sustava dolazi i do značajnog proširenja frekvencijskog spektra i unapređenja mrežne infrastrukture, što omogućava efikasnije upravljanje prometom i veću mrežnu kapacitivnost. Ovaj prijelaz označava početak integracije mobilnih mreža s IP tehnologijama, čime se postavljaju temelji za daljnji razvoj prema potpuno IP-baziranim mrežama. U Tablici 2.1 prikazana je usporedba prve, druge i treće generacije mobilnih sustava po pitanju tehnika pristupa, glavnih poboljšanja u odnosu na prethodne generacije i primjenu.

Tablica 2.1. Usporedba 1G, 2G, 3G i 4G [13]

Generacija	Tehnike višestrukog pristupa	Poboljšanja	Kašnjenje	Tipična primjena
1G	Analogna	Glasovni pozivi	Visoko	Glasovni pozivi
2G	TDMA, FDMA	Glasovni pozivi i osnovni prijenos podataka	Srednje	Osnovni podatkovna razmjena, poruke
3G	WCDMA, CDMA	Više brzine podatkovnog prijenosa i povećanje kapaciteta	Niže	Video pozivi, mobilni pristup internetu
4G	OFDMA	Značajno povećanje mrežnih kapaciteta	Nisko	Brzi mobilni internet, streaming HD videa
5G	OFDMA, NOMA	Daljnje proširenje mrežnog kapaciteta u odnosu na 4G	Ultra nisko	Ultrabrzi mobilni internet, IoT

Unatoč značajnim unapređenjima koje su donijele 3G mreže, rastući zahtjevi za većim brzinama prijenosa podataka, povećanim mrežnim kapacitetom, većim korisničkim protokom te smanjenim kašnjenjem, uz potrebu za efikasnijim iskorištavanjem radio spektra i većom fleksibilnošću mreže, ukazali su na ograničenja postojećih rješenja. U tom kontekstu razvijena je **četvrta generacija mobilnih mreža (4G)**, koja predstavlja značajan tehnološki iskorak u odnosu na prethodne generacije. 4G mreže omogućavaju višestruko veće brzine prijenosa podataka, koje mogu doseći više od 300 Mbps u downlink-u i oko 50 Mbps u uplink-u, što predstavlja značajno poboljšanje u odnosu na performanse ostvarive u UMTS sustavima. Nadalje, značajno je smanjeno vrijeme prijenosa podataka, čime se postiže brža i efikasnija razmjena informacija, što je posebno važno za aplikacije osjetljive na kašnjenje. Osim toga, 4G mreže uvode napredne mehanizme upravljanja kvalitetom usluge (engl. Quality of Service

- QoS), koji omogućavaju preciznu kontrolu tokova korisničkih podataka i njihovu prilagodbu različitim zahtjevima aplikacija i modelima naplate [14]. Ovakav pristup dodatno doprinosi optimizaciji mrežnih resursa i unapređenju ukupnog korisničkog iskustva, čime 4G mreže postavljaju temelj za razvoj suvremenih mobilnih širokopojsnih komunikacijskih sustava. LTE (Long Term Evolution) je standard 4G mobilnih mreža razvijen od strane 3GPP-a (engl. 3rd Generation Partnership Project), koji obuhvaća radijsku pristupnu mrežu i jezgrenu mrežnu arhitekturu optimiziranu za visokobrzinski paketni prijenos podataka, a tehnika višestrukog pristupa koja se koristi je ortogonalni frekvencijski podijeljeni višestruki pristup (engl. Orthogonal Frequency Division Multiple Access - OFDMA).

Daljnja evolucija mobilnih komunikacijskih sustava rezultirala je razvojem **pete generacije mobilnih mreža (5G)**, koja predstavlja novu globalnu bežičnu komunikacijsku tehnologiju s ciljem zadovoljenja rastućih zahtjeva za povezivanjem velikog broja uređaja i pružanjem naprednih komunikacijskih usluga. Razvoj 5G mreža potaknut je ograničenjima 4G sustava, posebno u kontekstu očekivanog masovnog rasta IoT uređaja, pri čemu se procjenjuje da postojeće mreže neće moći podržati traženu razinu povezanosti. U tom smislu, 5G donosi tri ključne prednosti, koje se ogledaju u značajnom smanjenju kašnjenja, povećanju brzine prijenosa podataka te mogućnosti povezivanja velikog broja uređaja unutar iste mreže. Osim toga, 5G sustavi definirani su unutar 3GPP okvira kao cjeloviti komunikacijski sustavi koji obuhvaćaju pristupnu mrežu, jezgrenu mrežu i korisničku opremu, pri čemu se uvode različiti modeli implementacije, uključujući samostalni (engl. Standalone – SA) i nesamostalni (engl. Non-Standalone – NSA) način rada. NSA pristup omogućava korištenje postojeće 4G infrastrukture uz nadogradnju radijskog dijela mreže, dok SA pristup podrazumijeva potpunu implementaciju 5G mreže s novom jezgrenom i pristupnom arhitekturom. Dodatno, 5G mreže uvode različite kategorije komunikacijskih usluga specifične određenoj vrsti prometa.

Organizacija koja se bavi standardizacijom mobilnih komunikacije je standardizacijska organizacija 3GPP. U Tablici 2.2 prikazani su glavni standardi vezani za 2G-5G koje je izdala ova organizacija.

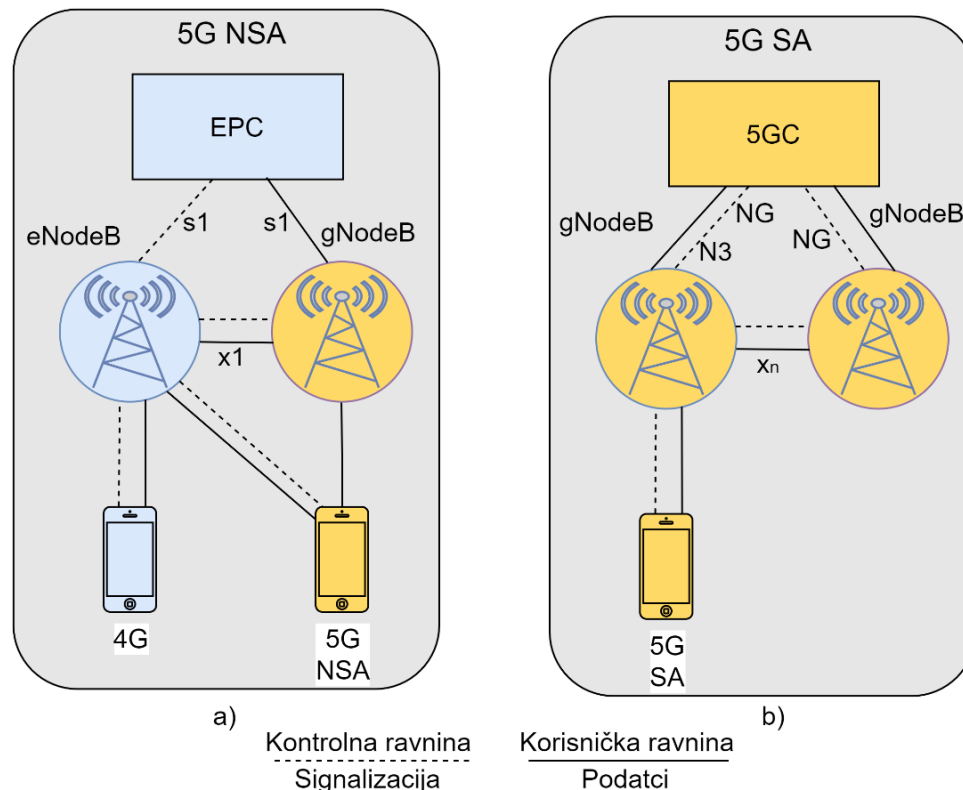
Tablica 2.2. 3GPP standardi za, 2G, 3G, 4G i 5G, te brzine prijenosa podataka [15], [13]

Generacija mobilnih mreža	3GPP Standard (Release)	Brzine prijenosa podataka
2G	Release 96 Release 97 za GPRS Release 98 za EDGE	Do 384 Kbps
3G	Release 99 za UMTS	Do 2-10 Mbps
4G	Release 9	Do 100 Mbps
5G	Release 15 za Fazu 1 Release 16 za Fazu 2	Do 10 Gbps

2.2 5G arhitektura

Prema specifikacijama definiranim u okviru 3GPP Release 15, početna implementacija 5G sustava temelji se na arhitekturi koja obuhvaća 5G jezgrenu mrežu (engl. 5G Core - 5GC) te novi radijski pristup putem 5G (engl. New Radio - NR) sučelja. Ovakva arhitektura predviđena je za globalnu primjenu kroz širok frekvencijski spektar, koji obuhvaća područja ispod 6 GHz (0,45 GHz – 6 GHz), kao i milimetarske valove u rasponu od 24,2 GHz do 52,6 GHz [16]. Kako je prethodno istaknuto, u NSA arhitekturi, 5G radio pristupna mreža,

u literaturi nazvana i kao Čvor B sljedeće generacije (engl. next Generation Node B - gNodeB) oslanja se na postojeću 4G evoluiranu paketnu jezgrenu mrežu (engl. Evolved Packet Core - EPC), pri čemu Evoluirani čvor B (engl. Evolved Node B – eNodeB) zadržava kontrolnu funkciju, dok se 5G koristi prvenstveno za prijenos podataka. Ovakav pristup omogućava bržu i ekonomičniju implementaciju 5G tehnologije uz korištenje postojeće infrastrukture. Kod SA arhitektura uz potpunu implementaciju 5G jezgrene mreže, gNodeB direktno komunicira s jezgrenim mrežnim funkcijama omogućavajući napredne funkcionalnosti poput ultra-niskog kašnjenja i veće fleksibilnosti upravljanja mrežnim resursima. Na Slici 2.1 prikazana je arhitektura NSA i SA 5G mreže.

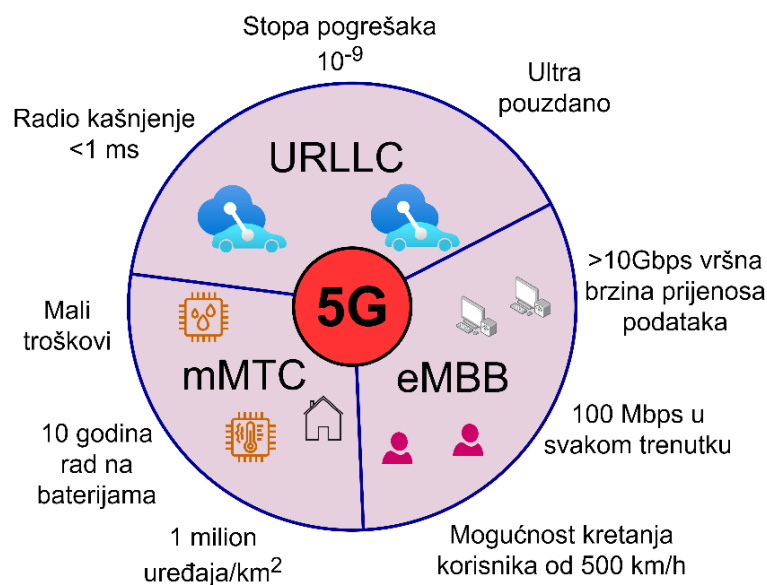


Slika 2.1 a) NSA i b) SA arhitektura 5G NR mreže [17]

eNodeB predstavlja baznu postaju u LTE mrežama koja obavlja ključne funkcije radio pristupa, uključujući upravljanje radio resursima, obradu radio frekvencijskih i paketnih signala, upravljanje mobilnošću te sigurnosne mehanizme poput autentifikacije i enkripcije. U svom radu koristi tehnologije višestrukog ulaza višestrukog izlaza (engl. Multiple Input Multiple Output - MIMO) i OFDMA, koje omogućavaju efikasnu alokaciju resursa i optimiziran prijenos podataka. Također podržava QoS, kontrolu integriteta i mehanizme prekapčanja. Strukturno se sastoji od radio jedinice i bazno pojasne jedinice, zaduženih za prijenos signala i upravljanje mrežnim funkcijama. gNodeB predstavlja baznu postaju u 5G mrežama odgovornu za upravljanje radio komunikacijom s korisničkom opremom, alokaciju resursa, mobilnost i uspostavu veza, uz implementaciju sigurnosnih i QoS mehanizama. Arhitekturno je podijeljen na centralnu jedinicu, distribuiranu jedinicu i radio jedinicu (Slika 1.2), pri čemu podržava napredne tehnologije poput masivni MIMO (engl. Massive MIMO – mMIMO) i oblikovanja snopa (engl. beamforming). Ovakva podjela omogućava veću fleksibilnost, skalabilnost i smanjenje kašnjenja u odnosu na LTE sustave [18].

Osim uvođenja novog radijskog sučelja, 5G (SA) mreže karakterizira i implementacija niza ključnih tehnologija koje omogućavaju veću fleksibilnost i prilagodljivost mrežnih sustava. Jedna od najvažnijih među njima je mrežno rezanje (engl. Network Slicing – NS), koje omogućava istovremenu implementaciju više 5G logičkih mreža, pri čemu je svaka od njih optimizirana za određeni skup usluga ili korisnika. Na taj način moguće je, primjerice, unutar iste fizičke infrastrukture podržati standardne korisnike mrežnog operatora, korisnike virtualnih operatora ili specifične usluge poput stroj-stroj (engl. Machine-to-Machine - M2M) komunikacije. Dodatno, primjena virtualizacije mrežnih funkcija (engl. Network Function Virtualization – NFV) omogućava da mrežne funkcije međusobno komuniciraju putem zajedničkog sučelja, pri čemu njihova fizička lokacija više nije striktno definirana. Ovakav pristup doprinosi većoj fleksibilnosti u implementaciji mreže te pojednostavljuje održavanje sustava, budući da je moguće dinamički uspostaviti privremene mrežne funkcije prema potrebi. Još jedan značajan koncept predstavlja i rubno računarstvo (engl. edge computing), kojim se računalni resursi približavaju krajnjim korisnicima. Ovakav pristup posebno je važan za aplikacije koje zahtijevaju vrlo kratka vremena odziva, poput virtualne stvarnosti, industrijskih sustava ili autonomne vožnje. Smanjenje kašnjenja podataka postiže se uvođenjem lokalnih instanci serverskih resursa u neposrednoj blizini korisnika, čime se omogućava brža obrada podataka i efikasnija komunikacija unutar mreže [19]. Rubno računarstvo je jako bitno prilikom implementacija različitih pozicioniranja i implementiranja DU i CU u RAN dijelu mreže.

eMBB (engl. enhanced Mobile Broadband), mMTC (engl. massive Machine Type Communications) i URLLC (engl. Ultra Reliable Low Latency Communications) predstavljaju tri temeljne kategorije usluga definirane od strane Međunarodne telekomunikacijske unije (engl. International Telecommunication Union – ITU) u okviru 5G mreža. eMBB usmjeren je na osiguravanje visokih brzina prijenosa i velikog kapaciteta mreže, čime omogućuje podršku zahtjevnim multimedijским aplikacijama, poput 8K video streaminga. mMTC odnosi se na povezivanje velikog broja uređaja niske potrošnje, što je ključno za implementaciju IoT rješenja u scenarijima kao što su pametni gradovi. S druge strane, URLLC omogućuje komunikaciju s izuzetno niskim kašnjenjem podataka i visokom pouzdanošću, što je neophodno za aplikacije kritične za misiju, poput autonomnih vozila. Slika 2.2 prikazuje prethodno spomenute kategorije usluga s odgovarajućim ključnim pokazateljima učinkovitosti.

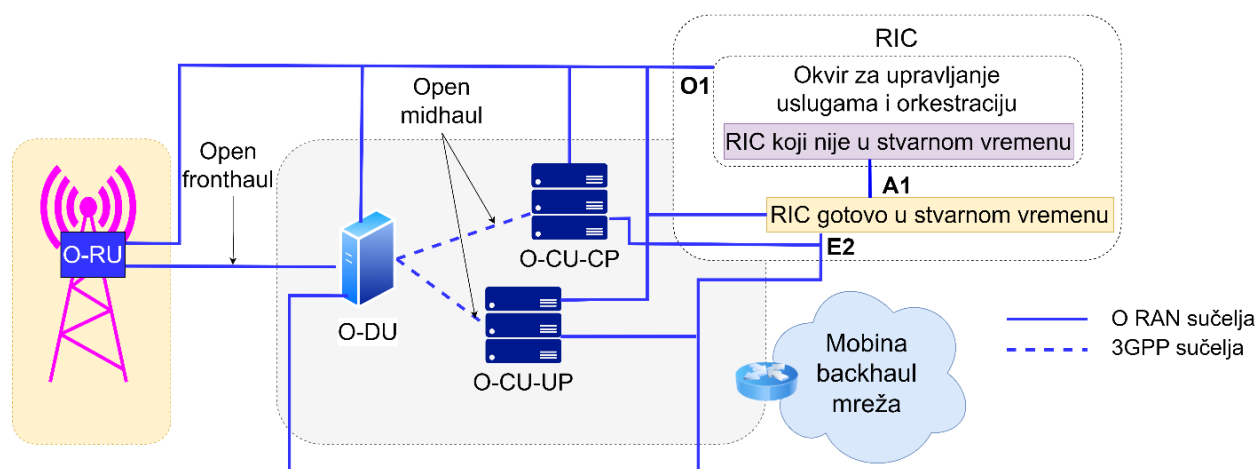


Slika 2.2 Ilustracija upotrebe 5G mreže [20]

2.2.1 O-RAN arhitektura

Arhitektura otvorene radio pristupne mreže predstavlja sljedeći evolucijski korak u razvoju RAN-a mobilnih mreža. O-RAN se odnosi na otvoreni arhitekturni koncept za radio pristupni dio mobilnih mreža, s ciljem razdvajanja sklopovskih (hardverskih) i programskih (softverskih) komponenti unutar RAN segmenta mreže, kako bi se omogućila interoperabilnost između opreme različitih proizvođača. Ovaj pristup zagovara otvorena i standardizirana sučelja između mrežnih elemenata, uz regulatorno usmjeravanje od strane O-RAN Alliance institucije, koja promovira takva sučelja. O-RAN pristup dobio je posebnu važnost u kontekstu 5G mreža, gdje operatori, između ostalog, nastoje iskoristiti koncepte temeljene na umjetnoj inteligenciji (engl. Artificial Intelligence - AI) i strojnom učenju (engl. Machine Learning - ML), za unapređenje i optimizaciju rada mobilnih mreža. U skladu s tom vizijom, temeljni principi O-RAN-a su: razdvajanje mreže koja uključuje inteligentno, podatkovno vođeno upravljanje mrežom omogućeno putem RAN inteligentnog kontrolera (engl. RAN Intelligent Controller - RIC), virtualizacija mreže te korištenje otvorenih sučelja unutar mreže [21].

Arhitektura O-RAN-a s različitim podatkovnim i signalizacijskim sučeljima (O-RAN i 3GPP) prikazana je na Slici 2.3. Otvorena distribuirana jedinica (engl. Open Distributed Unit - O-DU) predstavlja komponentu zaduženu za distribuiranu ili gotovo u stvarnom vremenu obradu unutar O-RAN arhitekture. Ona je odgovorna za izvršavanje određenih protokolnih slojeva i obradu funkcija otvorenog radijskog sučelja (engl. Open Radio Unit - O-RU). U usporedbi sa zadacima koje obavlja otvorena centralna jedinica (engl. Open Central Unit - O-CU), ove funkcije su bliže samom upravljanju radijskim sučeljem. Kao što je prikazano na Slici 2.3, O-CU je dodatno podijeljen na upravljačku ravninu (engl. O-CU Control Plane - O-CU-CP) i korisničku ravninu (engl. O-CU User Plane - O-CU-UP). Ova podjela slijedi princip razdvajanja upravljačke i korisničke ravnine, čime se omogućava neovisno skaliranje i optimizacija signalizacijskog i podatkovnog prometa. Takav dizajn omogućava mobilnim operatorima prilagodbu resursa stvarnim potrebama, pri čemu upravljačka ravnina upravlja signalizacijom i koordinacijom, dok korisnička ravnina osigurava visoko propusni prijenos korisničkih podataka. Dodatno, O-RAN inteligentni kontroler predstavlja komponentu koja uvodi „inteligenciju” u RAN (Slika 2.3). Ovaj element ima ključnu ulogu u implementaciji strategija za uštedu energije u RAN dijelu mreže, budući da sadrži definirane politike za optimizaciju energetske učinkovitosti mreže [22].



Slika 2.3 Arhitektura O-RAN [21]

Ključna sučelja za učinkovitu integraciju umjetne inteligencije u O-RAN infrastrukturu s ciljem poboljšanja energetske učinkovitosti RAN-a su A1, O1 i E2 sučelja prikazana na Slici 2.3. **E2 sučelje** ima temeljnu ulogu u omogućavanju RIC-u upravljanje radio resursima i različitim funkcionalnostima O-CU i O-DU jedinica, kao i prikupljanje metrika energetske učinkovitosti iz RAN-a. Ove metrike mogu se prenositi periodično ili na temelju događaja, pri čemu moraju biti zasnovane na stvarnim podacima. E2 sučelje definirano je putem dva osnovna protokola: prvi je E2 aplikacijski protokol (engl. E2 Application Protocol - E2AP), koji upravlja komunikacijom između RIC-a i E2 čvorova u kontekstu primjene politika za unapređenje energetske učinkovitosti mreže. Drugi je Model usluge E2 (engl. E2 Service Model - E2SM), koji specificira konkretne funkcionalnosti, poput izvještavanja o metrikama energetske učinkovitosti i upravljanja parametrima RAN-a, s ciljem poboljšanja energetske učinkovitosti mreže. E2 sučelje koristi Protokol za upravljanje tokom (engl. Stream Control Transmission Protocol - SCTP) za prijenos informacija te podržava različite vrste interakcija, uključujući izvještavanje, umetanje, upravljanje i provođenje politika, čime doprinosi kontinuiranom unapređenju energetske učinkovitosti mreže. Ove funkcionalnosti omogućavaju implementaciju naprednih mehanizama upravljanja i analize unutar O-RAN ekosustava, čime se dodatno unapređuje optimizacija ukupne potrošnje energije u mreži. **O1 sučelje** povezuje sloj upravljanja i orkestracije s RAN elementima te omogućava upravljanje životnim ciklusom mrežnih komponenti, uključujući konfiguraciju, nadzor performansi i održavanje sustava. Također podržava funkcije poput upravljanja greškama, ažuriranja softvera i implementacije ML modela, s ciljem optimizacije energetske učinkovitosti mreže. **A1 sučelje** povezuje RIC koji nije u stvarnom vremenu sa RIC kontrolerom gotovo u stvarnom vremenu i omogućava prijenos politika za optimizaciju rada mreže, uključujući politike i pravila koji se odnose na optimiziranje energetske učinkovitosti mrežnih komponenti. Pri tome RIC koji nije u stvarnom vremenu definira ciljeve i strategije, dok RIC gotovo u stvarnom vremenu provodi te politike unutar RAN-a, uz razmjenu dodatnih informacija za unapređenje performansi mreže.

2.2.2 Put prema Nakon 5G/6G mrežama

Razvoj 5G mreža predstavlja značajan iskorak u odnosu na prethodne generacije, no njegova ograničenja u kontekstu sve složenijih zahtjeva novih aplikacija i usluga ukazuju na potrebu daljnje evolucije prema Nakon 5G (engl. Beyond 5G – B5G) i 6G sustavima. Ova evolucija dodatno je uvjetovana širim društvenim, gospodarskim, regulatornim i tehnološkim trendovima koji imaju za cilj da budu ostvareni u 2030. godini i nadalje, a koji zahtijevaju znatno naprednije mrežne mogućnosti. U tom smislu buduće mreže nadilaze tradicionalnu ulogu komunikacijske infrastrukture te se razvijaju u inteligentne, distribuirane platforme koje integriraju komunikacijske i računalne funkcije. Poseban naglasak stavlja se na podršku masovnoj povezivosti, ali i na dublju digitalizaciju realnog svijeta kroz funkcionalnosti poput lokalizacije, senzorskog opažanja (engl. sensing), digitalnih blizanaca i otvorenih platformi, uz široku primjenu umjetne inteligencije. Slijedom navedenog, arhitektura budućih mreža mora biti osmišljena tako da omogući inteligentne, fleksibilne, održive, sigurne i programabilne sustave, uz istodobnu podršku naprednim radijskim tehnologijama i funkcijama lokalizacije i opažanja. Tranzicija prema 6G mrežama ne promatra se kao naglo odbacivanje postojećih sustava, nego kao arhitekturna transformacija koja treba uzeti u obzir iskustva stečena tijekom uvođenja 5G sustava.

U dokumentima [23], [24], arhitektura B5G/6G mreža prikazuje se kao s kraja na kraj (engl. End-to-End – E2E), funkcionalno razložena i snažno oslonjena na izvorno prilagođen oblaku (engl. cloud-native) principu, softverizaciju, otvorena sučelja i programabilnost. U europskoj perspektivi 6G mrežne arhitekture naglašava se da nova arhitektura mora uzeti u obzir nove dionike mobilnog ekosustava, njihove zahtjeve u svim mrežnim domenama te

potrebu za funkcionalnim i E2E pogledom na sustav. Kao važni arhitekturni principi navode se izlaganje mrežnih sposobnosti prema aplikacijama i upravljanju, puna automatizacija uz AI/ML, prilagodljivost različitim topologijama, skalabilnost, otpornost, u oblaku servisno utemeljena sučelja, odvajanje odgovornosti među mrežnim funkcijama i opće pojednostavljenje arhitekture u odnosu na prethodne generacije. Dodatno, o E2E arhitekturi ističe se da infrastruktura B5G mora optimalno pružati potrebne mrežne i računalne funkcije, bez da korisnik bude svjestan složenosti same infrastrukture, zagušenja komunikacijskih pojaseva ili sigurnosnih mehanizama. U tom se okviru navode i konkretni arhitekturni smjerovi, kao što su digitalni blizanci realizirani za i pomoću B5G, optimalna suradnja mrežnih funkcija i računalnih resursa, korisničko orijentirane mreže, na namjeri temeljene (engl. intent-based) autonomne mreže te zadatkovno orijentirana (engl. task-oriented) 6G arhitektura izvorno temeljena na umjetnoj inteligenciji (engl. 6G native-AI architecture). Time arhitektura B5G/6G dobiva obilježja distribuirane, računalno pojačane i korisnički prilagodljive mreže, u kojoj su komunikacijski i računalni resursi usko povezani [23], [24].

Ključni podražavatelji budućih B5G/6G mreža obuhvaćaju skup međusobno povezanih arhitekturnih i tehnoloških koncepata koji omogućuju transformaciju prema inteligentnim i fleksibilnim sustavima. U tom kontekstu, 6G se promatra kao inteligentna mreža s izvorno integriranim AI/ML mehanizmima za automatizaciju, optimizaciju i upravljanje resursima putem zatvorenih upravljačkih petlji kroz različite mrežne domene. Istodobno, fleksibilnost se ostvaruje kroz programabilnost, otvorena programska sučelja (API), cloud-native i višeoblačne (engl. multi-cloud) pristupe te dinamičko raspoređivanje funkcija i resursa, dok održivost, sigurnost i privatnost predstavljaju temeljna arhitekturna načela. Dodatno, svestrani RAN, lokalizacija i opažanje (engl. sensing), kao i napredno upravljanje i orkestracija, čine važan dio ukupnog okvira budućih generacija mobilnih mreža. U tom smislu, posebna se pažnja posvećuje primjeni AI/ML tehnika za samo-konfiguraciju, samoorganizaciju i samo-izlječenje mreže, kao i integraciji rubnog i kvantnog računarstva radi povećanja računalnih kapaciteta. Nadalje, postoji velika potreba za AI-utemeljenim mrežnim rezanjem i inteligentnim upravljačko-orkestracijskim okvirom koji omogućuje upravljanje fizičkim i virtualnim mrežnim funkcijama, uz proširenje virtualizacije i na korisničku opremu. Vitalizirano mrežno rezanje identificira se kao temelj 6G arhitekture, pri čemu se infrastruktura organizira kroz slojeve inteligentnog cloud rezanja, RAN rezanja i aplikacijskog rezanja, omogućujući izolaciju, orkestraciju i fleksibilnu alokaciju mrežnih resursa, čime se potvrđuje ključna uloga primjene virtualizacije, inteligentnih oblaka i orkestracije u budućim mrežama [16], [24], [25].

5G i 6G mreže predstavljaju uzastopne faze evolucije mobilnih komunikacija, pri čemu 5G uvodi napredne koncepte poput virtualizacije, softverski definiranih mreža i cloud-native arhitekture s ciljem povećanja brzine, smanjenja kašnjenja podataka i podrške za raznolike usluge, dok 6G ide korak dalje ka potpuno inteligentnom ekosistemu, u kojem mreža posjeduje sposobnost učenja, adaptacije i autonomnog upravljanja. Iako 5G već koristi umjetnu inteligenciju za optimizaciju performansi, analizu prometa i unapređenje sigurnosti, njena uloga je uglavnom podržavajuća i često centralizirana, dok se u budućim 6G mrežama očekuje izvorna i sveprisutna integracija AI-a kroz sve slojeve mreže, omogućavajući autonomno donošenje odluka, prediktivno upravljanje resursima i samostalnu optimizaciju sistema. U tom kontekstu, AI se može definirati kao skup metoda i algoritama koji omogućavaju sistemima da uče iz podataka, donose odluke i prilagođavaju se promjenama bez direktne ljudske intervencije, čime postaje ključni pokretač transformacije mobilnih mreža. Dok 5G tehnologija poboljšava postojeće komunikacijske kapacitete i uvodi fleksibilniju infrastrukturu, 6G tehnologija teži prema ostvarivanju ultra-niskih kašnjenja podataka, ekstremno visokih brzina prijenosa podataka i integraciji komunikacije sa percepcijom i inteligencijom okruženja, čime prelazi iz modela “povezane mreže” u model “inteligentne mreže” koja aktivno učestvuje u

optimizaciji i upravljanju digitalnim i fizičkim svijetom [20]. Tablica 2.3 pruža detaljnu usporedbu 5G i 6G tehnologija, ističući ključne razlike i glavne napretke.

Tablica 2.3. Usporedni sažetak 5G i 6G [20]

Kriterij	5G	6G
Brzina prenosa podataka	10	100 Gbps - 1Tbps
Kašnjenje	1ms (URLLC)	< 0.1ms
Frekvencije	6GHz, 30-100GHz	100-1000GHz
AI integracija	Podržana	Izvorno ugrađena AI
Broj uređaja	1 milion/km ²	10 miliona uređaja/km ²
Energetska učinkovitost	Niska	Ultra niska, ekološki osmišljena potrošnja energije

Energetska učinkovitost postaje jedan od ključnih izazova u razvoju 6G sustava. U tom kontekstu, 6G mreže predviđaju integraciju naprednih energetski osviještenih tehnologija, uključujući zelene mreže, prikupljanje energije i primjenu koncepta komunikacije temeljene na povratnom raspršenju (engl. backscatter) bežičnog signala. Zelene mreže usmjerene su na smanjenje ukupne potrošnje energije kroz optimizaciju mrežne infrastrukture, protokola i uređaja, uz primjenu mehanizama poput gašenja nedovoljno iskorištenih resursa, dijeljenja virtualiziranih resursa i inteligentnog upravljanja mrežom, pri čemu se poseban naglasak stavlja na primjenu AI/ML tehnika za optimizaciju u stvarnom vremenu. Tehnologija prikupljanja energije omogućava razvoj održivih i autonomnih IoT sustava koji koriste energiju iz okoline, iako se suočava s izazovima poput varijabilnosti izvora energije i ograničenih kapaciteta konverzije i pohrane. S druge strane, komunikacija temeljene na povratnom raspršenju (backscatter komunikacija) omogućava prijenos podataka refleksijom radio frekvencijskog (engl. Radio Frequency – RF) signala bez potrebe za vlastitim izvorom energije. Time se značajno smanjuje potrošnja energije i omogućava primjena u uređajima vrlo male snage, iako su prisutna ograničenja u dometu prijenosa podataka, brzini prijenosa i kvaliteti usluge. Unatoč navedenim izazovima, daljnji razvoj ovih tehnologija, uključujući njihovu integraciju s naprednim komunikacijskim i računalnim paradigmama, predstavlja ključni korak prema realizaciji energetski učinkovitih i održivih 6G mreža [26].

3. ENERGETSKA UČINKOVITOST MOBILNIH KOMUNIKACIJSKIH MREŽA

Energetska učinkovitost predstavlja jedan od ključnih izazova u razvoju suvremenih mobilnih komunikacijskih mreža, prvenstveno zbog stalnog rasta količine prometa i broja povezanih uređaja. Smanjenje potrošnje energije postaje nužno ne samo s ekonomskog aspekta, već i zbog sve većeg utjecaja telekomunikacijskog sektora na okoliš. U ovom poglavlju razmatraju se osnovni pojmovi, metrike i čimbenici koji utječu na energetska učinkovitost mobilnih mreža.

3.1 Definicija i metrike energetske učinkovitosti

Različite standardizacijske organizacije, poput Europski telekomunikacijski standardizacijski institut (engl. European Telecommunications Standards Institute - ETSI), Međunarodna telekomunikacijska unija – Telekomunikacijski standardizacijski sektor (engl. International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector - ITU-T) i 3GPP, kroz svoje standarde i preporuke definirale su ključne pokazatelje energetske učinkovitosti (engl. Energy Efficiency Key Performance Indicators – EE KPI) u mobilnim mrežama. Ovi pokazatelji omogućuju operatorima uvid u energetska učinkovitost (engl. Energy Efficiency – EE) mreže te predstavljaju važan alat u fazama planiranja, implementacije i operativnog upravljanja mobilnim mrežama. Jedan od standardiziranih pokazatelja je metrika energetske učinkovitosti prijenosa podataka (bit/J), koja uzima u obzir dva temeljna parametra mreže, odnosno potrošnju energije i količinu prenesenih podataka. Kako je navedeno u standardu [27], energetska učinkovitost prijenosa podataka u mobilnoj mreži definira se kao omjer ukupno prenesenog volumena podataka (engl. Data Volume - DV) i ukupne potrošnje energije mreže (engl. Energy Consumed - EC), pri čemu se oba pokazatelja određuju istodobnim mjerenjem.

$$EE = \frac{DV}{EC} \quad \left(\frac{\text{bit}}{\text{J}} \right) \quad (3.1)$$

Na Slici 3.1 prikazana je EE kroz godine, sa projekcijama do 2031. godine, gdje je EE izračunata na osnovu jednadžbe (3.1), s jedinicom mjere Mbit/Wh zbog jednostavnosti prikaza.



Slika 3.1 Prosječna energetska učinkovitost mobilnih mreža

Za potrebe grafikona sa Slike 3.1, kao referentni podatak potrošnje energije po godinama odabrana je srednja vrijednost potrošnje energije za 2023 i 2024 godinu. Po izvještajima globalne organizacije za mobilne sustave, GSMA, potrošnja mobilnih operatera u 2023 godini je bila 320 TWh, dok je u 2024 godini iznosila 290 TWh [28], [29]. Podaci o količinama prenesenih podataka preuzeti su iz Ericsson Mobility Report [6]. U ovom izvještaju predstavljeni su podaci o prosječno prenesenom prometu po mjesecima, a radi se o exabitima. U Tablici 3.1 prikazani su podaci prosječno prenesenom prometu po godinama, proizašli iz prethodno spomenutog izvora.

Tablica 3.1. Količina prenesenih podataka po godinama [6]

Godina	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031
Količina podataka (Exabit)	960	1320	1680	1980	2280	2760	3240	3720	4200	4920	5640

Iz jednadžbe (3.1) proizlazi da sustavi koji ostvaruju veću potrošnju energije ne moraju nužno imati nižu energetska učinkovitost, već naprotiv, mogu postići višu vrijednost EE u odnosu na sustave s manjom potrošnjom, pod uvjetom da je ostvareni volumen prenesenih podataka proporcionalno veći. Nadalje, navedeni izraz (3.1) pruža jasan uvid u smjer optimizacije energetske učinkovitosti, koji se odnosi na povećanje omjera između prijenosnog kapaciteta i utrošene energije. Ipak, pri analizi i optimizaciji potrebno je uzeti u obzir da potrošnja energije predstavlja ograničavajući i posebno značajan resurs, čije smanjenje ostaje ključni cilj u dizajnu i upravljanju mobilnim komunikacijskim mrežama.

U [30] definiran je dodatni ključni pokazatelj učinkovitosti, odnosno **energetska učinkovitost pokrivenosti mobilne mreže** (engl. EE Mobile Network coverage - $EE_{MN,CoA}$), koja se određuje kao omjer površine pokrivena promatranom mobilnom mrežom ($CoA_{des_{MN}}$) i potrošene energije tijekom vremenskog razdoblja u kojem se provodi procjena učinkovitosti (najčešće period od godine dana).

$$EE_{MN,CoA} = \frac{CoA_{des_{MN}}}{EC_{MN}} \left(\frac{m^2}{J} \right) \quad (3.2)$$

EC_{mn} predstavlja godišnju potrošnju energije, dok $CoA_{des_{MN}}$ označava ostvarenu pokrivenost analizirane mreže.

Uz već definirane metrike energetske učinkovitosti temeljene na količini prenesenih podataka i pokrivenosti mreže, u literaturi se uvode i metrike koje u obzir uzimaju zahtjeve kvalitete usluge, posebno u pogledu kašnjenja. U tom kontekstu, značajnu ulogu imaju metrike koje povezuju energetska učinkovitost s kašnjenjem podataka, budući da je u suvremenim mobilnim mrežama potrebno istovremeno zadovoljiti zahtjeve za niskim kašnjenjem i smanjenom potrošnjom energije. Jedna od takvih metrika je **Metrika EE temeljena na kašnjenju**, a definira se kao obrnuti omjer krajnjeg kašnjenja korisničke ravnine ($T_{e2e,MN}$) i potrošene energije mobilne mreže (EC_{MN}) [30], čime se omogućava kvantitativna procjena učinkovitosti sustava uzimajući u obzir i vremensku i energetska komponentu performansi. Jednadžba (3.3) predstavlja metriku temeljenu na kašnjenju:

$$EE_{MN,CoA} = \frac{1}{T_{e2e,MN} * EC_{MN}} \left(\frac{s^{-1}}{J} \right) \quad (3.3)$$

Ukoliko mobilna mreža omogućava realizaciju mrežnog rezanja, onda se u tom slučaju može računati metrika **energetske učinkovitosti pojedinog NS-a** (EE_{ns}) na način:

$$EE_{ns} = \frac{\text{Performanse NS } (P_{ns})}{\text{Konzumirana energija NS } (EC_{ns})} \quad (3.4)$$

Gdje je:

1. $P_{ns} = DV_{ns}$ za eMBB tip NS-a
2. $P_{ns} = \frac{1}{T_{eze,ns}}$ za uRLLC tip NS-a
3. $P_{ns} = N_{mMTC,ns}$ za mMTC tip NS-a, ($N_{mMTC,ns}$ - broj korisnika) [30].

Dokumentom [31] odvojeno se definira i **energetska učinkovitost 5G jezgrene mreže** (EE_{5GC}) kao omjer korisnog izlaza i ukupne potrošnje energije, pri čemu se korisni izlaz može definirati kroz različite metrike performansi:

$$EE_{5GC} = \frac{\text{Korisni izlaz 5GC} (UsefulOutput_{5GC})}{\text{Konzumirana energija 5GC} (EC_{5GC})} \quad (3.5)$$

gdje korisni izlaz može biti, na primjer količina prenesenih podataka, broj obrađenih sesija, broj korisnika koje mreža opslužuje, signalizacijski promet, tj. sve ono što smatramo i postavimo da je korisni rad mreže. Konzumirana energija podrazumijeva ukupnu energiju koju troši 5G jezgra mreže, što uključuje servere, mrežne funkcije, oblak infrastrukturu. Energetska učinkovitost 5G jezgrene mreže temeljena na korisničkoj ravnini definira se kao omjer ukupnog volumena prenesenih podataka u uzlaznom i silaznom smjeru na N3 sučelju i ukupne potrošnje energije 5GC. Pri tome se u obzir uzima stvarni korisnički promet, pri čemu se u slučaju redundantnog prijenosa podaci evidentiraju samo jednom, kako bi se osigurala točnost mjerenja energetske učinkovitosti. N3 sučelje je referentna točka koja povezuje RAN s funkcijom korisničke ravnine (engl. User Plane Function - UPF) u 5GC. Isključivo je odgovorno za prijenos stvarnog korisničkog prometa podataka (pregledavanje weba, streaming videa i podaci aplikacija) između korisničkog uređaja i jezgrene mreže. U skladu sa prethodno rečenim, korisni izlaz bi bio:

$$UsefulOutput_{5GC,DV} = \sum_{UPF} (UL \text{ podaci} + DL \text{ podaci}) \times 8 \quad (3.6)$$

Gdje je UPF mrežna funkcija u 5G mreži zaduženu za obradu i prosljeđivanje korisničkog prometa. Faktor 8 u jednadžbi (3.6) uvodi se radi konverzije volumena podataka iz bajtova u bitove, budući da su UL (engl. Uplink) i DL (engl. Downlink) podaci na UPF-u, dobiveni mrežnim brojačima poput onih koje koristi 3GPP/ETSI, izraženi u bajtima, dok se predmetna metrika energetske učinkovitosti standardno izražava u jedinici bit/J [31].

Energetska učinkovitost temeljena na dostupnosti mreže definira se kao pokazatelj koji povezuje performanse dostupnosti mrežnih resursa s njihovom potrošnjom energije. U tom kontekstu, metrika energetske učinkovitosti ćelije ($EE_{Cell,AvailAvgTimeCU}$) izražava se kao omjer prosječne dostupnosti ćelije ($CellAvailAvgTimeCU$) i prosječne potrošnje energije po ćeliji u gNB-u ($EC_{per cell of gNB}$) tijekom istog promatranog vremenskog razdoblja, pri čemu je dostupnost ćelije definirana odgovarajućim KPI-jem, a potrošnja energije dobiva se raspodjelom ukupne potrošnje gNB-a na broj aktivnih ćelija.

$$EE_{Cell,AvailAvgTimeCU} = \frac{CellAvailAvgTimeCU}{EC_{per cell of gNB}} \quad (3.7)$$

Ova metrika, izražena u jedinici sec/J, omogućava procjenu koliko dugo je ćelija dostupna korisnicima u odnosu na utrošenu energiju, čime se uvodi dimenzija pouzdanosti u analizu energetske učinkovitosti. Posebno je značajna u scenarijima gdje je kontinuirana dostupnost usluge ključna, budući da omogućava istovremeno vrednovanje performansi i potrošnje energije na razini pojedinačne ćelije [31].

Energetska učinkovitost evaluirana iz perspektive kvalitete mreže definira se kao skup pokazatelja koji povezuju performanse prijenosa podataka s potrošnjom energije na razini podmreže (engl. subnetwork), pri čemu podmreža predstavlja skup više baznih postaja (gNB-ova) koji se promatraju kao jedinstvena funkcionalna cjelina. U tom kontekstu, metrike $EE_{SNw,DLUeThroughput}$ i $EE_{SNw,ULUeThroughput}$ izražavaju energetska učinkovitost podmreže na temelju ostvarene brzine prijenosa podataka prema korisniku u silaznom (DL) i uzlaznom (UL) smjeru. Ove metrike definirane su kao omjer ukupne DL, odnosno UL propusnosti korisničke opreme u RAN-u, agregirane preko svih gNB-ova unutar promatrane podmreže, ($DLUeThroughput_{SNw}$, odnosno $ULUeThroughput_{SNw}$) i prosječne potrošnje energije po gNB-u ($EC_{per\ gNB\ of\ subnetwork}$) tijekom istog vremenskog razdoblja. Energetska učinkovitost mjerena iz perspektive kvaliteta mreže u DL i UL je predstavljena sljedećim jednadžbama:

$$EE_{SNw,DLUeThroughput} = \frac{DLUeThroughput_{SNw}}{EC_{per\ gNB\ of\ subnetwork}} \quad (3.8)$$

$$EE_{SNw,ULUeThroughput} = \frac{ULUeThroughput_{SNw}}{EC_{per\ gNB\ of\ subnetwork}} \quad (3.9)$$

Prosječna potrošnja energije ($EC_{per\ gNB\ of\ subnetwork}$) određuje se kao srednja vrijednost ukupne potrošnje svih baznih postaja koje čine podmrežu, čime se omogućava usporedivost između podmreža različitih veličina i kapaciteta. Izražene u jedinici kbit/(s·J), ove metrike omogućavaju kvantitativnu procjenu koliko učinkovito mreža koristi energiju za ostvarenje željene kvalitete usluge, integrirajući performanse i potrošnju energije na razini šireg mrežnog segmenta [31].

Za transportne sustave, posebice konvergentnu paketno-optičku opremu, koristi se metrika **Omjer energetske učinkovitosti telekomunikacija** (engl. **Telecommunications Energy Efficiency Ratio - TEER**) definirana kao [32]:

$$TEER_{CERT} = \frac{D_{TEER}}{P_{TEER-CERT}} = \frac{\sum D_i}{(P_{CERT-0} + P_{CERT-50} + P_{CERT-100})/3} \quad (3.10)$$

Gdje je:

- D_{TEER} predstavlja ukupnu brzinu prijenosa podataka (bit/s), odnosno sumu brzina na svim sučeljima D_i (bit/s)
- D_i brzina prijenosa podataka (bit/s) na sučelju i
- $P_{CERT-0} + P_{CERT-50} + P_{CERT-100}$ predstavljaju izmjerenu potrošnju snage (W) pri 0%, 50% i 100% opterećenja
- $P_{TEER-CERT}$ predstavlja prosječnu potrošnju snage uređaja (W).

U praktičnoj implementaciji, za transportnu optičku opremu ova metrika se može pojednostaviti u oblik:

$$TEER_{CERT} = \frac{\sum D_i}{(P_{CERT-0} + P_{CERT-100})/2} = \frac{\text{maksimalna propusnost (throughput)}}{\text{prosječna potrošnja energije}} \quad (3.11)$$

Ovo omogućava procjenu energetske učinkovitosti transportne mreže na temelju odnosa između maksimalnog kapaciteta prijenosa i prosječne potrošnje energije.

Mjerenje energetske učinkovitosti transportne mreže temelji se na definiranju maksimalne propusnosti i prosječne potrošnje energije. Maksimalna propusnost (engl. *throughput*) konvergentne paketno optičke opreme I definira se kao:

$$Throughput = \sqrt{\frac{A^2+B^2}{2}} \quad (3.12)$$

Gdje je:

- A , maksimalni *throughput* paketnih funkcija (Gbps)
- B , maksimalni *throughput* funkcija vremenskog multipleksiranja (engl. Time-Division Multiplexing – TDM) (brzina porta x broj portova x broj odsječaka) (Gbps)

Prosječna potrošnja energije paketno optičke opreme I definira se kao:

$$P_{avg} = \frac{P_{idle}+P_{max}}{2} \quad (3.13)$$

Gdje:

- P_{idle} predstavlja potrošnju energije u stanju bez prometa (minimalna konfiguracija) (W),
- P_{max} predstavlja potrošnju energije pri maksimalnom opterećenju (maksimalna konfiguracija) (W)

Na temelju navedenog, metrika energetske učinkovitosti paketno optičke opreme I može se izraziti kao:

$$EER = \frac{\sqrt{\frac{A^2+B^2}{2}}}{\frac{P_{idle}+P_{max}}{2}} \quad (3.14)$$

što predstavlja odnos između maksimalnog prijenosnog kapaciteta sustava i prosječne potrošnje energije [32].

3.2 Metrike potrošnje energije mobilnih sustava

Potrošnja energije određene mrežne funkcije (EC_{NF}) definira se kao ukupna količina energije koju troši određena mrežna funkcija unutar 5G sustava. Budući da se suvremene mrežne funkcije implementiraju kao kombinacija fizičkih (engl. Physical Network Function - PNF) i virtualiziranih komponenti (engl. Virtualized Network Function - VNF), ukupna potrošnja energije određuje se zbrajanjem potrošnje svih tih sastavnih dijelova. Pri tome se potrošnja energije fizičkih mrežnih funkcija ($EC_{PNF,measured}$) može izravno izmjeriti, dok se potrošnja energije virtualiziranih funkcija najčešće procjenjuje ($EC_{VNF,estimated}$), budući da se one izvršavaju na dijeljenim računalnim resursima [31].

$$EC_{NF} = \sum_{PNF} EC_{PNF,measured} + \sum_{VNF} EC_{VNF,estimated} \quad (3.15)$$

Procjena potrošnje energije virtualiziranih mrežnih funkcija temelji se na njihovim osnovnim komponentama, odnosno virtualiziranim funkcijskim elementima (engl. Virtualized Network Function Components - VNFC), koji koriste određene računalne resurse unutar (engl. Network Functions Virtualization Infrastructure – NFVI) mrežne infrastrukture. Budući da nije moguće

izravno izmjeriti potrošnju energije pojedinačnog VNFC-a, ona se procjenjuje proporcionalno korištenju resursa na kojem se izvršava. U tom smislu, potrošnja energije dodjeljuje se pojedinoj komponenti na temelju njenog udjela u ukupnom korištenju resursa, pri čemu se kao kriteriji mogu koristiti prosječno korištenje procesora, memorije, diskovnog prostora ili ulazno-izlaznog prometa. Na primjer, ako određena virtualna komponenta koristi veći udio procesorskog vremena u odnosu na ostale komponente na istom poslužitelju, proporcionalno joj se dodjeljuje i veći dio ukupne potrošnje energije tog poslužitelja. Na taj način omogućava se realistična procjena energetske potrošnje u virtualiziranom okruženju, gdje više mrežnih funkcija dijeli istu fizičku infrastrukturu. Ovakav pristup posebno je važan u kontekstu softveriziranih i cloud-native mreža, budući da omogućava detaljnu analizu i optimizaciju energetske učinkovitosti na razini pojedinačnih mrežnih funkcija.

Energetska potrošnja 5G jezgrene mreže (EC_{5GC}) definira se kao ukupna količina energije koju troše sve mrežne funkcije koje čine jezgri dio 5G sustava. Ova metrika predstavlja agregirani pokazatelj potrošnje energije na razini jezgre mreže, pri čemu se ukupna potrošnja dobiva zbrajanjem pojedinačnih potrošnji svih mrežnih funkcija (EC_{NF}), uključujući i PNF i VNF komponente.

$$EC_{5GC} = \sum_{NF} EC_{NF} \quad (3.16)$$

Ovim se omogućava sveobuhvatna procjena energetske potrošnje jezgrene mreže, uzimajući u obzir njenu distribuiranu i softveriziranu arhitekturu. Formalno, ova metrika može se izraziti kao suma energetske doprinosa svih mrežnih funkcija koje čine 5G jezgru, čime se naglašava modularna struktura sustava u kojoj svaka funkcija doprinosi ukupnoj potrošnji energije. Definiranje ove metrike na razini podmreže (engl. subnetwork) dodatno omogućava analizu potrošnje energije unutar određenog segmenta mreže, što je posebno korisno u kontekstu virtualiziranih i logički razdvojenih mrežnih okruženja. Ovakav pristup omogućava detaljnije praćenje i optimizaciju energetske učinkovitosti, budući da se potrošnja može analizirati i optimizirati na razini pojedinačnih mrežnih funkcija, ali i na razini cijele jezgrene infrastrukture [31].

Energetska potrošnja NG-RAN-a (EC_{NG-RAN}) definira se kao ukupna količina energije koju troši radio pristupni dio 5G mreže. Ova metrika dobiva se zbrajanjem potrošnje energije svih baznih postaja (gNB-ova) koje čine promatrani segment NG-RAN-a, čime se omogućava agregirana procjena energetske potrošnje na razini podmreže.

$$EC_{NG-RAN} = \sum_{gNB} EC_{gNB} \quad (3.17)$$

Budući da NG-RAN predstavlja dominantan dio ukupne potrošnje energije u mobilnim mrežama, ova metrika ima ključnu ulogu u analizi i optimizaciji energetske učinkovitosti. Na razini pojedinačne bazne postaje, energetska potrošnja gNB-a (EC_{gNB}) definira se kao suma potrošnje energije svih mrežnih funkcija koje čine tu baznu postaju, uključujući funkcionalne komponente poput centralne (CU), distribuirane (DU) i radijske jedinice (RU), koje mogu biti implementirane kao fizičke ili virtualizirane funkcije [31].

$$EC_{gNB} = \sum_{NF} EC_{NF} \quad (3.18)$$

Time se naglašava modularna i distribuirana priroda moderne RAN arhitekture, u kojoj svaka funkcionalna komponenta doprinosi ukupnoj potrošnji energije. Ovakav hijerarhijski pristup, gdje se potrošnja energije analizira od razine mrežnih funkcija, preko gNB-a, pa sve do NG-RAN-a kao cjeline, omogućava detaljno razumijevanje energetske tokova u mreži te identificiranje potencijalnih područja za optimizaciju i povećanje energetske učinkovitosti.

4. OPTIMIZACIJA POTROŠNJE ENERGIJE

Uzimajući u obzir prethodno definirane metrike energetske učinkovitosti, jasno je da kontinuirani rast količine prenesenih podataka i broja povezanih uređaja neposredno dovodi do povećanja ukupne potrošnje energije u mobilnim mrežama, čime optimizacija postaje nužan preduvjet za održivo funkcioniranje sustava. Analiza pokazatelja energetske učinkovitosti ukazuje na potrebu za sustavnim pristupom optimizaciji, koji obuhvaća sve ključne segmente mreže, uključujući radio pristupni dio, transportnu mrežu te jezgrenu mrežu. U tom kontekstu, optimizacija potrošnje energije ne temelji se na jedinstvenom rješenju, već na integriranom pristupu koji uključuje primjenu naprednih radio tehnika, prilagodbu mrežne arhitekture te korištenje koncepta softverizacije, poput softverski definirani mreža (engl. Software Defined Network – SDN) i NFV paradigmi, s ciljem dinamičkog upravljanja resursima i povećanja ukupne energetske učinkovitosti sustava.

4.1 Upravljanje radio resursima

Upravljanje radio resursima (engl. Radio Resource Management – RRM) predstavlja skup funkcija i mehanizama u radio pristupnoj mreži koji omogućavaju efikasno korištenje ograničenih radio resursa s ciljem osiguravanja optimalnih performansi mreže. U tom kontekstu, RRM obuhvaća niz međusobno povezanih funkcionalnosti, uključujući dodjelu radio resursa u frekvencijskoj, vremenskoj i prostornoj domeni, kontrolu odašiljane snage bežičnog signala, raspoređivanje korisnika (engl. scheduling), upravljanje interferencijom između ćelija, upravljanje mobilnošću korisnika, raspodjelu opterećenja između mrežnih elemenata te kontrolu pristupa mreži u skladu s raspoloživim resursima i zahtjevima kvalitete usluge. RRM obuhvaća više međusobno povezanih funkcionalnosti koje djeluju na različitim vremenskim skalama, u rasponu od vremenskih intervala kraćih od milisekunde do višesatnih razdoblja, pri čemu je odluke potrebno donositi u vrlo kratkom vremenu uz istodobno uzimanje u obzir velikog broja parametara i dinamičkih stanja mreže [33]. U kontekstu energetske učinkovitosti, RRM ima bitnu ulogu jer omogućava dinamičko prilagođavanje korištenja resursa stvarnim prometnim uvjetima, čime se izbjegava nepotrebna aktivacija mrežnih elemenata i smanjuje ukupna potrošnja energije.

Kontrola snage bežičnog signala usmjerena je na optimizaciju razine odašiljane snage s ciljem postizanja ravnoteže između kvalitete usluge i potrošnje energije. U 5G mrežama, povećani zahtjevi za kapacitetom, zajedno s primjenom tehnologija poput Massive MIMO i mmWave komunikacija, dovode do značajnog rasta ukupne potrošnje energije, osobito u radio frekvencijskim komponentama i pojačalima snage, čime se dodatno naglašava važnost učinkovitog upravljanja odašiljanjem snage. U tom kontekstu, optimizacija odašiljane snage ima izravan utjecaj na energetske učinkovitost sustava, koja se definira kao omjer prenesene količine podataka i ukupno utrošene energije, pri čemu se prilagodbom razine snage može značajno unaprijediti taj odnos [34]. Dodatno, primjena naprednih tehnika, poput usmjerenog (fokusiranog) odašiljanja bežičnog signala (engl. beamforming), omogućuje usmjeravanje signala prema korisniku, čime se smanjuje razina interferencije i potreba za višim prijenosnim snagama, što rezultira daljnjim poboljšanjem energetske učinkovitosti [35]. Kontrola snage odašiljanog bežičnog signala temelji se na dinamičkom prilagođavanju prijenosne snage baznih postaja i korisničke opreme s ciljem održavanja odgovarajuće razine odnosa signal-interferencija–šum (engl. Signal to Interference plus Noise Ratio - SINR), pri čemu previsoka snaga povećava interferenciju, dok preniska snaga uzrokuje degradaciju kvalitete prijema. Sukladno tome, primjenom odgovarajućih algoritama kontinuirano se postiže kompromis između tih suprotstavljenih zahtjeva, čime se omogućava stabilan rad mreže uz smanjenje interferencije i poboljšanje ukupnih performansi sustava [36].

U scenarijima s intenzivnom ponovnom upotrebom frekvencijskog spektra, performanse mreže značajno su ograničene interferencijom između korisnika.

U tom kontekstu, **upravljanje interferencijom** (engl. interference management) usko je povezano s optimizacijom prijenosne snage, budući da visoke razine transmisijske snage povećavaju međukorisničku interferenciju i degradiraju performanse sustava. Istodobno, optimizacija snage ima ključnu ulogu u smanjenju ukupne potrošnje energije, što dodatno naglašava potrebu za zajedničkim razmatranjem interferencije i energetske učinkovitosti. Energetski učinkoviti pristupi temelje se na maksimizaciji odnosa između ostvarenog protoka podataka i utrošene energije, pri čemu konzervativnije strategije alokacije snage u interferencijski ograničenim scenarijima doprinose smanjenju interferencije i poboljšanju performansi sustava. Konzervativne strategije alokacije snage odnose se na pristupe u kojima se prijenosna snaga prilagođava na način da se izbjegava nepotrebno visoka snaga odašiljanja (transmisije), uzimajući u obzir utjecaj interferencije i potrošnje energije, pri čemu se optimalna razina snage određuje s ciljem maksimizacije energetske učinkovitosti, a ne isključivo kapaciteta sustava [37].

Raspoređivanje resursa (engl. resource scheduling) mreže predstavlja funkciju upravljanja radio resursima u 5G i budućim mrežama, pri čemu se odluke o dodjeli resursa donose u sloju kontrole pristupa medijima u svakom vremenskom intervalu transmisije. U tom procesu fizički resursni blokovi dodjeljuju se korisnicima na temelju više kriterija, uključujući stanje kanala, zahtjeve kvalitete usluge, indikator kvalitete kanala i razinu interferencije, s ciljem maksimizacije ukupnog protoka i spektralne učinkovitosti [38]. U kontekstu 5G i 6G mreža, raspoređivanje dodatno dobiva na značaju zbog potrebe za podrškom heterogenih usluga poput eMBB, URLLC i mMTC, gdje učinkovite strategije raspoređivanja omogućavaju optimalno iskorištavanje spektra, smanjenje kašnjenja i osiguranje QoS zahtjeva u dinamičnim mrežnim uvjetima. S aspekta energetske učinkovitosti, učinkoviti algoritmi raspoređivanja doprinose smanjenju nepotrebne potrošnje energije kroz bolje iskorištavanje dostupnih resursa, smanjenje kašnjenja i interferencije, te prilagodbu raspodjele resursa stvarnim potrebama korisnika i mrežnog opterećenja. U kontekstu održivosti i sve većih energetske zahtjeva, energetski svjesni pristupi raspoređivanju postaju nužni za postizanje ravnoteže između visokih performansi i ograničenja potrošnje energije. Takvi pristupi uključuju dinamičko upravljanje resursima i prilagodbu alokacije u skladu s promjenjivim uvjetima u mreži, čime se omogućava istovremeno zadovoljenje QoS zahtjeva i smanjenje ukupne potrošnje energije [39]. Na taj način raspoređivanje predstavlja ne samo mehanizam raspodjele resursa, već i jedan od temeljnih alata za ostvarivanje energetski učinkovitog i održivog rada 5G i budućih mobilnih mreža.

Upravljanje mobilnošću (engl. mobility management) u suvremenim bežičnim mrežama predstavlja složen i neophodan proces koji omogućava kontinuiranu povezanost korisničke opreme tokom njenog kretanja kroz mrežu, pri čemu se poseban naglasak stavlja na realizaciju procedura prekapčanja bez prekida komunikacije [40]. Uslijed rasta broja korisnika, pametnih uređaja i aplikacija koje zahtijevaju visoke brzine prijenosa podataka, mobilnost postaje jedan od osnovnih zahtjeva mreže, dok se istovremeno povećava kompleksnost njenog upravljanja [41]. Posebno u 5G i budućim mrežama, gdje se koriste ultra-guste heterogene mreže, česte promjene ćelija mogu negativno utjecati na QoS i kvalitetu iskustva korisnika, što zahtijeva efikasne i prilagodljive mehanizme upravljanja mobilnošću [40]. Osnovni mehanizam upravljanja mobilnošću predstavlja prekapčanje korisničkog uređaja, koji se definira kao proces prelaska korisničke opreme sa jedne bazne postaje (ćelije) na drugu u skladu s njenim kretanjem, uz očuvanje aktivne komunikacije [41]. U 5G mrežama, ovaj proces uključuje više faza, kao što su mjerenje parametara (npr. primljena snaga referentnog signala, kvaliteta primljenog referentnog signala i SINR), donošenje odluke o prekapčanju na osnovu mrežnih uvjeta i politika, priprema ciljane ćelije, izvršenje prekapčanja i potvrda uspješnog

prekapčanja. Odluka o prekapčanju zavisi od različitih faktora, uključujući jačinu i kvalitetu signala, opterećenje ćelije, obrasce kretanja korisnika i zahtjeve kvaliteta usluge, pri čemu neadekvatne odluke mogu dovesti do problema poput prekida veze, povećanog kašnjenja ili učestalih i nepotrebnih prekapčanja [40]. Dodatno, smanjenje veličine ćelija i povećanje njihove gustoće dovodi do većeg broja događaja prekapčanja, što dodatno povećava kompleksnost upravljanja mobilnošću i zahtijeva optimizaciju mehanizama prekapčanja kako bi se osigurala pouzdana i neprekidna komunikacija [41].

U heterogenim mobilnim mrežama, **uravnoteženje opterećenja** (engl. load balancing) predstavlja mehanizam raspodjele korisničke opreme između različitih ćelija (baznih postaja) s ciljem poboljšanja iskorištenja mrežnih resursa i ukupnih performansi sustava. U takvim mrežama, gdje koegzistiraju makro i male ćelije, uravnoteženje opterećenja se često realizira kroz preusmjeravanje korisnika sa preopterećenih makro ćelija na manje opterećene ćelije nižih slojeva, čime se postiže efikasnija distribucija prometa i povećava kapacitet mreže. Implementacija ovih mehanizama uveliko se oslanja na adaptivne tehnike prekapčanja, pri čemu se parametri poput histereze i faktora proširenje raspona ćelija (engl. Cell Range Expansion - CRE) dinamički podešavaju u zavisnosti od trenutnog opterećenja ćelija, što omogućava fleksibilnije upravljanje mobilnošću korisnika. Dodatno, u okviru 3GPP standardizacije, uravnoteženje opterećenja je formaliziran kroz koncept uravnoteženje mobilnog opterećenja (engl. Mobility Load Balancing - MLB), gdje bazne postaje razmjenjuju informacije o opterećenju putem X2 sučelja (engl. interface) i autonomno donose odluke o preusmjeravanju korisnika prema susjednim ćelijama s većim raspoloživim kapacitetom. Primjena ovih pristupa doprinosi poboljšanju ključnih performansnih pokazatelja mreže, kao što su povećanje ukupnog protoka i pravednija raspodjela resursa među korisnicima, uz istovremeno povećanje broja događaja prekapčanja kao neizbježnog kompromisa u procesu optimizacije [42].

Još jedan od načina upravljanja radio resursima predstavlja primjena inteligentnih reflektirajućih površina (engl. Intelligent Reflecting Surfaces – IRS), koje omogućavaju aktivno oblikovanje radio okruženja u cilju poboljšanja performansi bežičnih komunikacijskih sustava. IRS se definira kao planarna meta-površina sastavljena od velikog broja pasivnih reflektirajućih elemenata, pri čemu svaki element može nezavisno inducirati kontroliranu promjenu amplitude i/ili faze upadnog signala, čime se omogućava fleksibilna rekonfiguracija propagacijskog kanala između predajnika i prijemnika. Na taj način, za razliku od tradicionalnih pristupa koji se prilagođavaju postojećem kanalu, IRS omogućava transformaciju inherentno stohastičkog i nepredvidivog bežičnog okruženja u kontrolirano propagacijsko okruženje, čime se ublažavaju efekti fadinga i interferencije. Osim toga, IRS tehnologija omogućava poboljšanje najbitnijih performansi sustava, uključujući povećanje brzine prijenosa podataka, pouzdanosti i energetske učinkovitosti, kroz koordinirano upravljanje reflektiranim signalima između predajnika i prijemnika. Važna prednost IRS-a ogleda se u činjenici da reflektirajući elementi djeluju pasivno, bez potrebe za aktivnim RF primopredajnim krugovima (engl. RF chains), što rezultira znatno nižom potrošnjom energije i manjom složenošću implementacije u odnosu na konvencionalna aktivna rješenja. Također, IRS može biti integriran kao pomoćna komponenta u postojeće mreže, pri čemu simultano reflektirani i direktni signal doprinose poboljšanju ukupne kvalitete prijema, što omogućava značajno unapređenje performansi komunikacijskog sustava [43].

4.2 Režim mirovanja i dinamička aktivacija resursa RAN-a

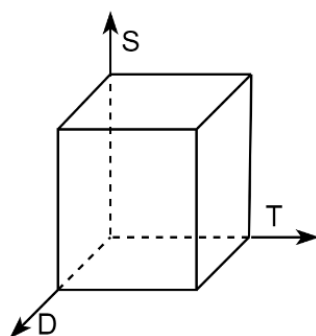
Energetska učinkovitost radio pristupnih mreža temelji se na principu prilagodbe rada mrežnih resursa stvarnim potrebama prometa, pri čemu se naglasak stavlja na dinamičko upravljanje aktivnošću pojedinih komponenti sustava. U tom kontekstu, ključni koncept

predstavlja **dinamičko skaliranje** (engl. dynamic scaling), odnosno sposobnost mreže da prilagođava svoju potrošnju energije u skladu s promjenama u prometnom opterećenju, čime se omogućava efikasnije korištenje raspoloživih resursa. Ovakav pristup podrazumijeva da mrežni elementi, bez obzira da li je RAN u pitanju, ne rade konstantno u maksimalnom (vršnom) radnom režimu, već da se njihova aktivnost i potrošnja energije skaliraju ovisno o trenutnim zahtjevima za prijenos podataka. Osim toga, značajan aspekt energetske učinkovitog dizajna predstavlja i mogućnost **privremenog isključivanja** ili smanjenja aktivnosti određenih dijelova sustava, poznata kao sposobnost spavanja (engl. sleep) ili gašenja (engl. shutdown). Ovaj princip omogućava da se u periodima niskog ili nikakvog opterećenja pojedine funkcionalne cjeline bazne postaje deaktiviraju ili prebace u režim smanjene potrošnje energije, čime se izbjegava nepotrebna potrošnja. Pri tome je posebno važno osigurati da takve operacije ne naruše zahtijevani nivo kvalitete usluge, što implicira potrebu za pažljivim balansiranjem između uštede energije i mrežnih performansi. U Tablici 4.1 data je kategorizacija komponenti 5G bazne postaje kao kandidata za rad u režimu mirovanja.

Tablica 4.1 Komponente 5G bazne postaje za rad u režimu mirovanja [3]

Makro režim mirovanja	Mikro režim mirovanja
Udaljena radio postaja/jedinica (RRH/U)	Frekvencijski blokovi
Aktivni element antene (AAE)	Podnosioci
Pojačalo snage (PA)	Bežični kanali
Jedinica osnovnog pojasa (BBU)	OFDM simboli
Potpuna bazna postaja	

Ušteda energije zahvaljujući mogućnostima gašenja ovisi o tri dimenzije, kao što je prikazano na Slici 4.1. Te tri dimenzije su S (scenarij gašenja), T (trajanje gašenja) i D (dubina gašenja).



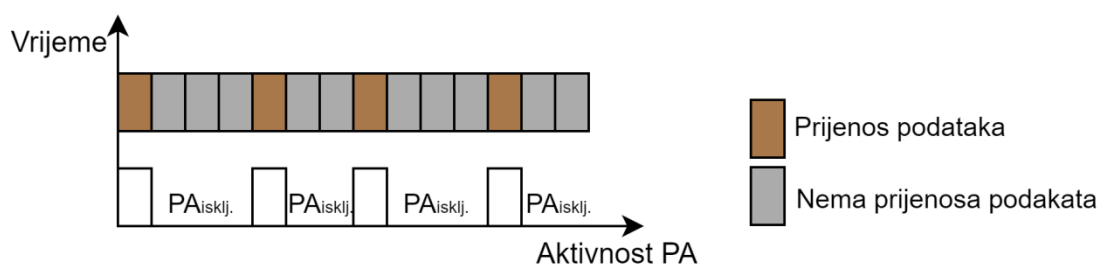
Slika 4.1 Tri dimenzije mogućnosti gašenja [2]

Poboljšanje scenarija gašenja, trajanja gašenja i dubine gašenja (Slika 4.1) dovodi do poboljšanja ukupne mogućnosti uštede energije. Dodatno, dokument [2] naglašava da energetske učinkovito upravljanje resursima mora uzeti u obzir **kompromis između performansi sustava i potrošnje energije**, budući da agresivno smanjenje aktivnih resursa može dovesti do degradacije kvalitete usluge. Stoga se implementacija ovih principa zasniva na adaptivnim mehanizmima koji omogućavaju donošenje odluka u realnom vremenu, uzimajući u obzir trenutne uvjete u mreži.

4.2.1 Implementacija režima mirovanja i dinamičke aktivacije resursa

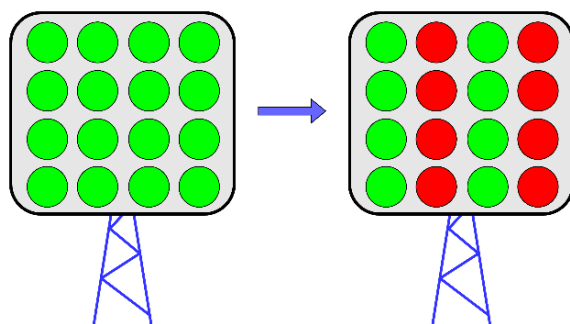
Praktična realizacija prethodno navedenih principa ostvaruje se kroz primjenu različitih tehnologija uštede energije koje djeluju u više domena rada RAN sustava, uključujući vremensku, prostornu, frekvencijsku i uštedu energije u samoj energetskej domeni. Ove tehnologije omogućavaju konkretne mehanizme za implementaciju sleep mode režima i dinamičke aktivacije resursa, čime se postiže značajno smanjenje potrošnje energije u 5G mrežama.

U **vremenskoj domeni**, ušteda energije postiže se iskorištavanjem perioda neaktivnosti u prijenosu podataka, tokom kojih se pojedine komponente sustava mogu privremeno isključiti ili prebaciti u stanje niske potrošnje. Ovakav pristup omogućava da se energetskej zahtjevniji dijelovi sustava aktiviraju samo kada je to nužno za prijenos signala, dok se u intervalima bez prometa smanjuje njihova potrošnja. Time se direktno realizira princip dinamičkog skaliranja potrošnje energije u odnosu na prometno opterećenje. U tom kontekstu, vremenska domena omogućava iskorištavanje pojedinačnih simbola, vremenskih odsječaka ili podokvira u kojima se ne prenosi korisnička informacija za ostvarenje dodatnih energetskej ušteda. Jedan od karakterističnih primjera ovakvog pristupa predstavlja simbolna ušteda energije, poznata kao diskontinuirani prijenos (engl. Discontinuous Transmission – DTX) ćelije [44], gdje se pojačalo snage (engl. Power Amplifier - PA) isključuje u simbolima u kojima nema prijenosa podataka, što je ilustrirano na Slici 4.2.



Slika 4.2 Ilustracija uštede energije u vremenskoj domeni [44]

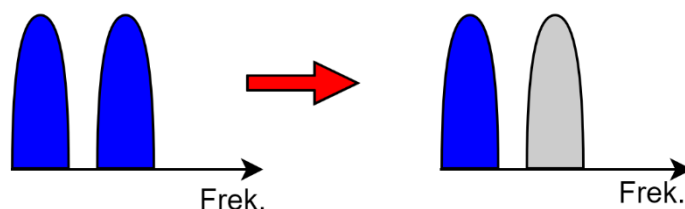
U **prostornoj domeni**, kako je to ilustrirano na Slici 4.3, implementacija uštede energije ostvaruje se prilagodbom broja aktivnih antena i RF primopredajnih krugova (lanaca), pri čemu se u uvjetima smanjenog opterećenja može reducirati broj aktivnih elemenata bez značajnog utjecaja na performanse sustava.



Slika 4.3 Ilustracija uštede energije u prostornoj domeni [44]

Ovakav pristup je posebno značajan u sustavima s velikim brojem antena, gdje deaktivacija dijela antenskih elemenata može rezultirati značajnim energetskej uštedama.

Ilustracijom sa Slike 4.4, vidi se da slično prethodnom, u **frekvencijskoj domeni** moguće je dinamički upravljati korištenjem raspoloživog spektra, uključujući smanjenje širine pojasa ili deaktivaciju određenih frekvencijskih nosilaca kada nisu potrebni. Ovakva prilagodba omogućava dodatno smanjenje potrošnje energije, posebno u scenarijima sa varijabilnim prometnim opterećenjem.



Slika 4.4 Ilustracija uštede energije u frekvencijskoj domeni, gašenje nosilaca [44]

U **domeni snage**, energetska optimizacija postiže se prilagodbom izlazne snage predajnika u skladu sa zahtjevima mreže i uvjetima propagacije. Time se omogućava efikasniji rad sustava uz minimiziranje nepotrebne potrošnje energije, posebno u situacijama kada visoka prijenosna snaga nije potrebna.

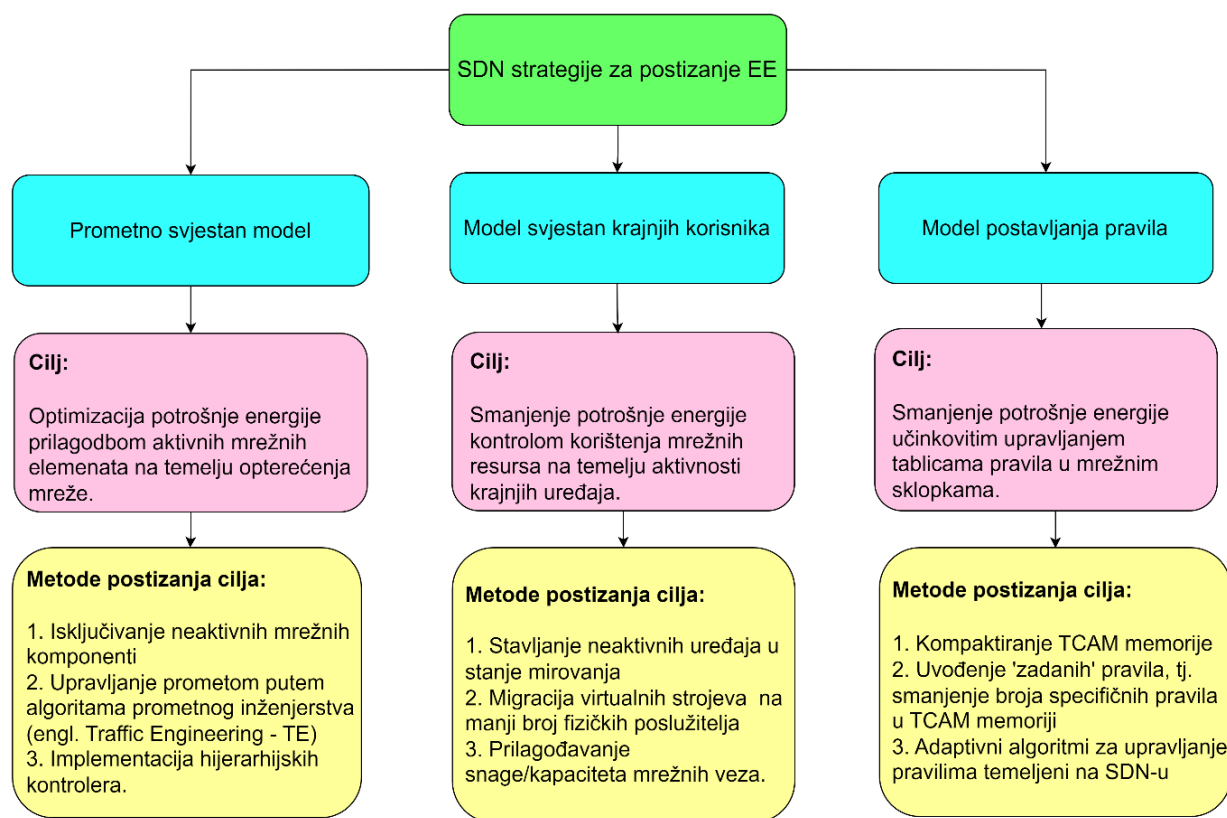
Integracijom navedenih pristupa ostvaruje se koncept dinamičke aktivacije resursa, gdje mrežni elementi kontinuirano prilagođavaju svoj rad u skladu s promjenama u prometnom opterećenju. Ovakav pristup omogućava postizanje značajnih energetske uštede, uz istovremeno očuvanje potrebnog nivoa mrežnih performansi, pod uvjetom da se implementacija vrši uz odgovarajuće mehanizme upravljanja i kontrolu kompromisa između energetske učinkovitosti i kvalitete usluge.

4.3 SDN/NFV optimizacija

SDN i NFV predstavljaju međusobno povezane tehnologije koje se zajednički koriste s ciljem povećanja fleksibilnosti, agilnosti i učinkovitosti mrežnih sustava. Dok se SDN primarno fokusira na upravljanje i kontrolu mrežnog prometa kroz programski upravljive mehanizme usmjeravanja, NFV omogućava virtualizaciju mrežnih funkcija, čime se različite mrežne usluge mogu implementirati kao softverske instance unutar širokog spektra slojeva ISO/OSI (engl. International Organization for Standardization/ Open Systems Interconnection -ISO/OSI) modela, od drugog do sedmog sloja. Na taj način, NFV obuhvaća virtualizaciju različitih mrežnih funkcija, uključujući sustav domenskih imena (engl. Domain Name System – DNS), firewall, load balancing i aplikacijske servise, dok se SDN dominantno implementira na drugom i trećem sloju, gdje omogućava centralizirano upravljanje mrežnim prometom. Iako se ove tehnologije mogu primjenjivati nezavisno, njihova integrirana primjena ostvaruje sinergijski učinak, pri čemu SDN omogućava upravljanje tokovima podataka i rutama, dok NFV osigurava virtualizaciju i instanciranje mrežnih elemenata, kao što su virtualni preklopnici i usmjerivači. Za postizanje koordiniranog rada ovih tehnologija neophodna je orkestracija, koja se realizira kroz razmjenu informacija između SDN kontrolera i NFV orkestratora, čime se omogućava upravljanje resursima, kontrolom i operacijama unutar virtualizirane mrežne arhitekture. Dodatno, primjena SDN-a omogućava optimizaciju performansi mreže kroz napredne algoritme usmjeravanja i upravljanja prometom, kao i adaptivno reagiranje na sigurnosne izazove, dok NFV doprinosi bržem uvođenju novih usluga, smanjenju operativnih troškova i povećanju inovativnosti. U kombinaciji sa konceptom mrežnog rezanja, ove tehnologije omogućavaju uspostavu više virtualnih mreža unutar jedinstvene fizičke infrastrukture, pri čemu se resursi mogu dinamički raspodjeljivati u skladu

sa zahtjevima različitih servisa, što dodatno unapređuje između ostalog energetske učinkovitost suvremenih mreža.

Primjena SDN tehnologije doprinosi poboljšanju energetske učinkovitosti mobilnih mreža prvenstveno kroz centralizirano upravljanje mrežom, koje se ostvaruje razdvajanjem upravljačke i podatkovne ravnine. U takvoj arhitekturi, odluke o upravljanju mrežnim prometom donose se na razini SDN kontrolera, dok mrežni elementi izvršavaju isključivo obradu korisničkih podataka, čime se eliminira potreba za lokalnom obradom upravljačkih informacija u svakom mrežnom elementu. Posljedično, smanjenje obrade upravljačkih podataka direktno dovodi do smanjenja energetske potrošnje pojedinačnih mrežnih elemenata, čak i bez primjene dodatnih mehanizama uštede energije, što implicira da sam koncept SDN-a inherentno doprinosi povećanju energetske učinkovitosti mobilne mreže. Međutim, ovakav inicijalni doprinos nije dovoljan za ostvarenje zahtjeva energetske učinkovitosti u 5G i B5G mrežama, zbog čega su razvijeni dodatni softverski pristupi optimizaciji potrošnje energije koji se implementiraju na razini SDN kontrolera [45], [46]. U tom kontekstu, identificirane su tri osnovne strategije, prikazane na Slici 4.5, koje omogućavaju daljnje smanjenje potrošnje energije.

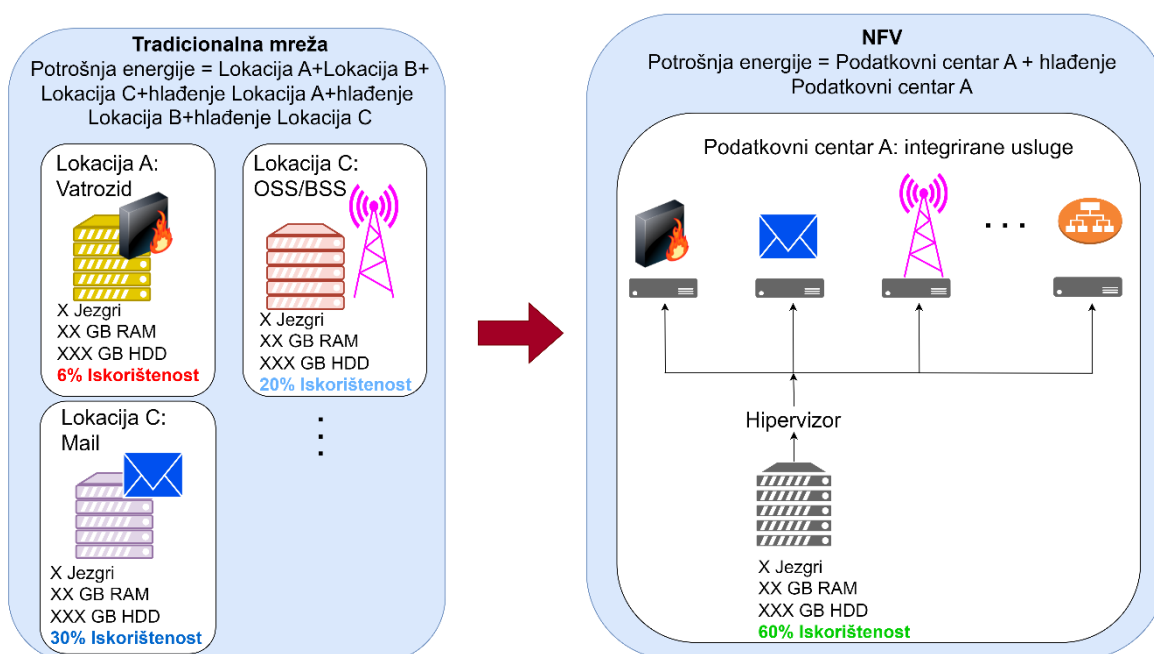


Slika 4.5 SDN strategije za postizanje poboljšane energetske učinkovitosti mobilne mreže [45], [46]

Prva strategija, prometno svjestan model (engl. traffic-aware model), temelji se na prilagodbi aktivnosti mrežnih elemenata u skladu s prometnim opterećenjem, uključujući deaktivaciju neaktivnih komponenti, primjenu algoritama za upravljanje prometom i korištenje hijerarhijskih kontrolera. **Druga strategija**, model svjestan krajnjih korisnika (engl. end-host-aware model), fokusira se na optimizaciju resursa na temelju aktivnosti krajnjih uređaja, kroz primjenu mehanizama poput prebacivanja neaktivnih uređaja u režim mirovanja, migracije virtualnih strojeva na manji broj fizičkih servera te dinamičkog prilagođavanja kapaciteta

mrežnih veza. **Treća strategija**, model postavljanja pravila (engl. rule placement model), usmjerena je na optimizaciju upravljanja pravilima u mrežnim preklopnicima, kroz tehnike poput kompakcije ternarno sadržajno adresabilne memorije (engl. Ternary Content-Addressable Memory – TCAM), uvođenja generičkih pravila i primjene adaptivnih algoritama zasnovanih na SDN principima. Sve navedene strategije, oslanjajući se na centraliziranu kontrolu i programibilnost koju omogućava SDN paradigma, doprinose ukupnom smanjenju potrošnje energije u mrežnoj infrastrukturi.

U odnosu na prethodno opisane mogućnosti centraliziranog upravljanja i optimizacije mrežnih resursa koje omogućava SDN paradigma, dodatno unapređenje energetske učinkovitosti mobilnih mreža ostvaruje se primjenom virtualizacije mrežnih funkcija. Za razliku od tradicionalnog pristupa, u kojem se mrežne funkcije izvršavaju na namjenskom hardveru unutar pojedinačnih mrežnih elemenata, NFV omogućava implementaciju tih funkcija na standardiziranim serverskim platformama u podatkovnim centrima. Kao što je prikazano na Slici 4.6, više mrežnih funkcija može se izvršavati na jednoj hardverskoj jedinici, čime se postiže zajedničko korištenje resursa i smanjuje potreba za višestrukim, energetski neovisnim uređajima, što direktno doprinosi smanjenju ukupne potrošnje energije.

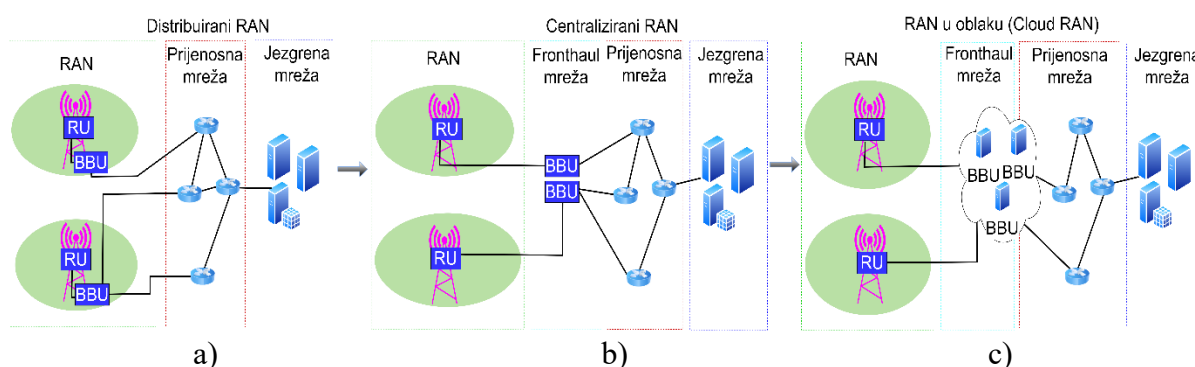


Slika 4.6 Tradicionalna mreža u odnosu na koncept NFV-a u kontekstu energetske učinkovitosti [22]

Dodatno, zajednička optimizacija iskorištenja serverskih resursa i upravljanje temperaturom unutar podatkovnih centara omogućavaju daljnje smanjenje energetske potrošnje. U NFV okruženju, virtualne mrežne funkcije povezane su putem virtualnih veza koje zahtijevaju manje energije u odnosu na tradicionalne fizičke konekcije, što dodatno doprinosi energetskej učinkovitosti. Također, istraživanja pokazuju da implementacija NFV koncepta u 5G arhitekturi može rezultirati smanjenjem potrošnje energije od približno 30% [47]. U tom kontekstu, NFV upravljanje i orkestracija ima ključnu ulogu u automatizaciji upravljanja resursima, omogućavajući dinamičko skaliranje mrežnih funkcija u skladu s trenutnim zahtjevima mreže. To može uključivati aktivaciju i deaktivaciju virtualnih funkcija, njihovu migraciju na energetski učinkovitije čvorove, kao i primjenu naprednih algoritama zasnovanih na umjetnoj inteligenciji i strojnom učenju za predviđanje opterećenja i optimizaciju korištenja resursa.

4.3.1 Utjecaj primjene SDN i NFV u 5G mobilnim mrežama na EE

Dodatno unapređenje energetske učinkovitosti mobilnih mreža ostvaruje se integriranom primjenom SDN i NFV tehnologija, pri čemu iste posebno značajnu ulogu imaju u razvoju 5G radio pristupnih mreža. U tom kontekstu, evolucija RAN arhitekture, prikazana na Slici 4.7, vodi od distribuiranog prema centraliziranom i konačno do RAN u oblaku (engl. Cloud RAN) pristupa realizacije mreže, pri čemu se BBU funkcije obrade virtualiziraju i premještaju u podatkovne centre, dok se RU zadržavaju na lokacijama baznih postaja. Ovakva centralizacija i virtualizacija omogućava smanjenje broja BBU jedinica i efikasniju raspodjelu resursa, što direktno rezultira smanjenjem potrošnje energije baznih postaja, koje predstavljaju najveće pojedinačne potrošače energije u mobilnim mrežama. Dodatno, premještanjem BBU funkcija u podatkovne centre eliminira se potreba za pojedinačnim rashladnim sustavima na lokacijama baznih postaja, dok se troškovi hlađenja dijele sa drugim servisima u podatkovnim centrima, čime se postiže efikasnije upravljanje energetskim resursima.



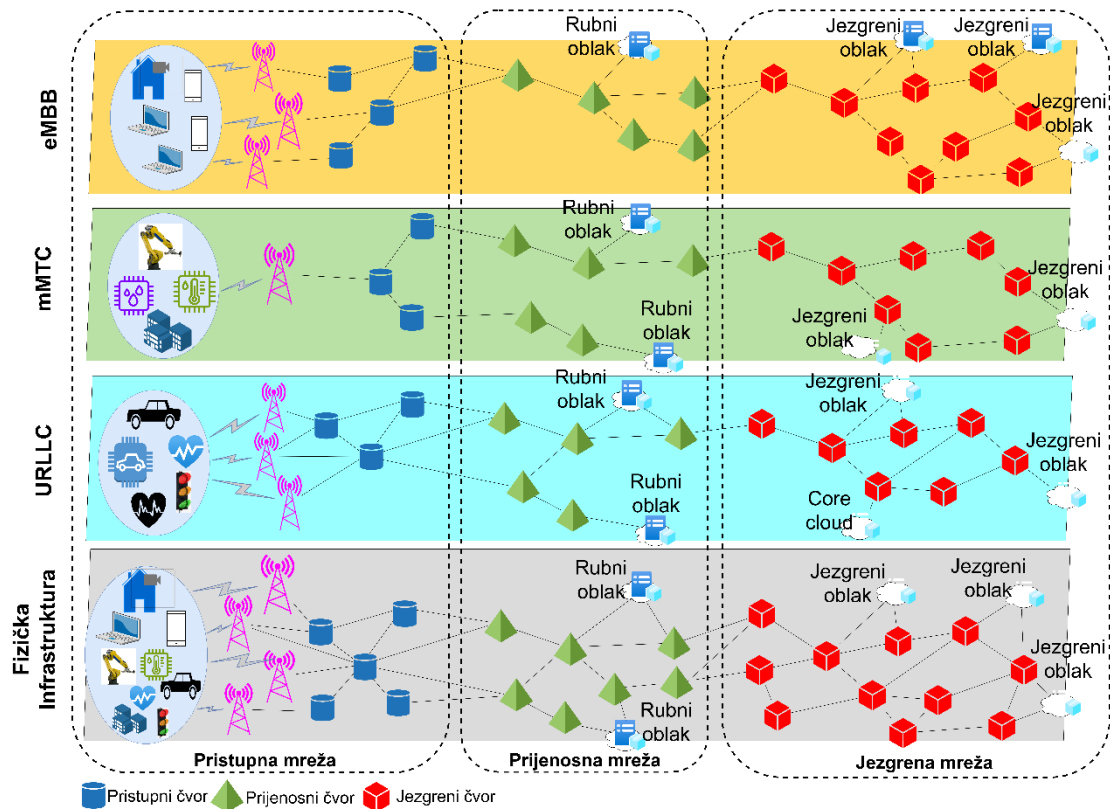
Slika 4.7 Evolucija RAN arhitekture: (a) distribuirani RAN, (b) centralizirani RAN i (c) Cloud RAN [48]

U okviru Cloud RAN arhitekture zasnovane na SDN i NFV tehnologijama, omogućena je implementacija naprednih algoritama za upravljanje radio resursima, koji omogućavaju energetske učinkovito raspoređivanje mrežnih resursa kroz dinamičku aktivaciju i deaktivaciju virtualiziranih BBU jedinica u skladu s varijacijama prometnog opterećenja (Slika 4.7). Ovakav pristup dodatno doprinosi smanjenju potrošnje energije kroz prilagodbu aktivnosti mrežnih funkcija stvarnim potrebama mreže.

Nadalje, primjena tehnologije dinamičkog skaliranja napona i frekvencije (engl. Dynamic Voltage and Frequency Scaling – DVFS) omogućava optimizaciju potrošnje energije procesorskih resursa koji izvršavaju virtualizirane mrežne funkcije, pri čemu se napon i frekvencija prilagođavaju trenutnom opterećenju, uz očuvanje prihvatljivih performansi sustava [49]. NFV infrastruktura, uz podršku NFV upravljanja i orkestracije sustava, omogućava kontinuirano praćenje potrošnje energije i dinamičku alokaciju mrežnih funkcija, uključujući njihovu migraciju na energetske efikasnije čvorove, kao i aktivaciju ili deaktivaciju resursa u skladu s trenutnim uvjetima u mreži. Takav pristup omogućava optimizaciju potrošnje energije kroz prilagodbu korištenja računalnih resursa i raspodjelu opterećenja, uz očuvanje zahtijevane kvalitete usluge [50]. Dodatno, korištenje obnovljivih izvora energije u podatkovnim centrima doprinosi daljnjem poboljšanju ukupne energetske učinkovitosti sustava.

Još jedna od primjena SDN i NFV tehnologija koja svoj stvarni značaj i puni potencijal, ostvaruje ne samo u pogledu energetske učinkovitosti, je i kroz implementaciju koncepta mrežnog rezanja, koji predstavlja primjer njihove zajedničke i koordinirane primjene na razini cjelokupne 5G mreže. Kao što je prikazano na Slici 4.8, NS omogućava uspostavu logički

odvojenih virtualnih mreža unutar iste fizičke infrastrukture, pri čemu svaka mrežna instanca posjeduje vlastite s kraja na kraj komunikacijske puteve i može funkcionirati kao nezavisna mreža. Ovakav pristup omogućava precizno prilagođavanje mrežnih resursa specifičnim zahtjevima pojedinih servisa ili slučajeva upotrebe, čime se izbjegava neracionalno korištenje resursa i posljedično povećava energetska učinkovitost sustava. Dodatno, NS-ovi se mogu ponuditi kao usluga različitim korisnicima ili operatorima, čime se omogućava fleksibilnije i efikasnije korištenje postojeće infrastrukture. S aspekta energetske učinkovitosti, u slučaju kada se više NS-ova implementira na istoj zemljopisnoj lokaciji, oni mrežni rezovi bez aktivnih korisnika mogu se privremeno deaktivirati, odnosno njihovi pripadajući mrežni elementi prebaciti u stanje mirovanja, čime se ostvaruje smanjenje potrošnje energije bez utjecaja na rad preostalih aktivnih dijelova mreže.



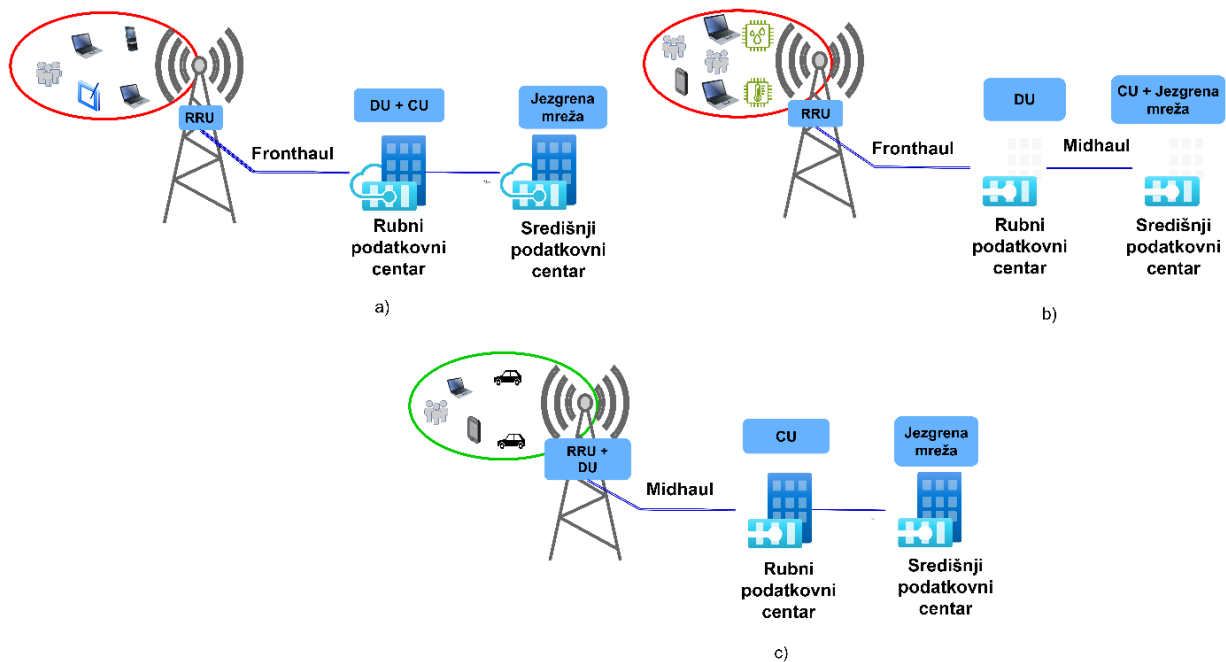
Slika 4.8 Arhitektura mrežnog rezanja [51]

Ovaj koncept se može proširiti na scenarije s većim brojem NS-ova, gdje se kroz kombinaciju SDN i NFV mehanizama za raspoređivanje resursa omogućava dinamičko prebacivanje pojedinih rezova u režime niske potrošnje energije u periodima bez korisničke aktivnosti. Time se postiže efikasnije upravljanje mrežnim resursima i značajno smanjenje ukupne potrošnje energije u mobilnoj mreži.

4.4 Primjena optičkih tehnologija

Primjena optičkih tehnologija u 5G i budućim 6G mrežama posebno je značajna u kontekstu prednjih (engl. fronthaul) i središnjih (engl. midhaul) segmenata mobilne mreže, jer razvoj naprednih RAN arhitektura zahtijeva transportnu infrastrukturu sposobnu podržati visoke kapacitete, nisko kašnjenje, pouzdanost i fleksibilno povezivanje distribuiranih mrežnih funkcija. U tradicionalnoj RAN arhitekturi BBU i RU su locirani na lokaciji bazne postaje, dok

centralizirani RAN uvodi njihovo razdvajanje, pri čemu se BBU centralizira, a RRH/RU ostaje na lokaciji ćelije, uz uspostavu fronthaul veze između njih. Daljnja evolucija arhitekture podrazumijevala je razdvajanje BBU funkcija na distribuiranu jedinicu i centraliziranu jedinicu, pri čemu se veza između RU i DU definira kao fronthaul, između DU i CU kao midhaul, a između CU i jezgrene mreže kao backhaul (Slika 4.9). Ovakva arhitekturna podjela omogućava centralizaciju i virtualizaciju mreže i mrežnih funkcija, ali istovremeno povećava zahtjeve prema transportnoj mreži, budući da fronthaul i midhaul moraju osigurati prijenos velikih količina podataka između fizički razdvojenih funkcija uz stroge zahtjeve u pogledu kašnjenja i pouzdanosti. U tom kontekstu, optički mreža (engl. x-haul) se u literaturi prepoznaje kao ključni element 5G/6G ekosistema, zahvaljujući svojoj sposobnosti da podrži visoke brzine prijenosa, nisko kašnjenje, skalabilnost i visoku pouzdanost, što je čini pogodnim za mreže s velikim brojem malih ćelija i zahtjevnim aplikacijama, što je karakteristično upravo za 5G mreže. Posebno se ističe da nove aplikacije, poput proširene stvarnosti, holografskih komunikacija i autonomnih sistema, dodatno povećavaju zahtjeve za kapacitetom i kašnjenjem, čime optička transportna infrastruktura postaje sastavni dio modernog ekosustava mobilnih mreža, pri čemu optički fronthaul predstavlja ne samo prijenosni medij već i temeljnu infrastrukturu koja omogućava implementaciju centraliziranog RAN-a, virtualiziranog RAN-a i O-RAN arhitekture kroz podršku centralizaciji funkcija, dijeljenju resursa i povezivanju distribuiranih mrežnih elemenata [52]. Na Slici 4.9 prikazana je arhitektura 5G RAN mreže i jezgrenih elemenata u zavisnosti koji tip usluge sa Slike 4.8 je prisutan u RAN dijelu mreže.



Slika 4.9 Arhitekture 5G RAN-a za: a) eMBB, b) mMTC i c) URLLC [3]

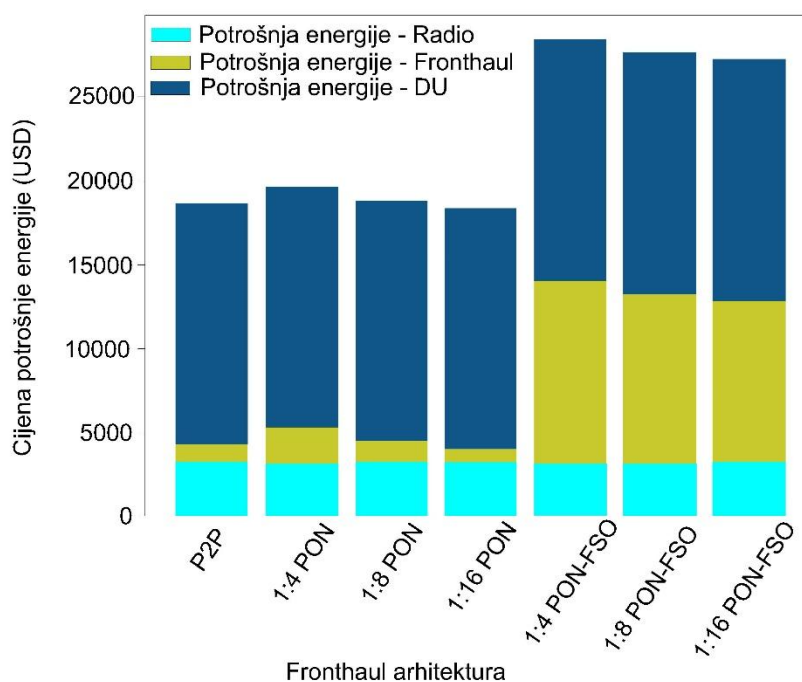
Na prethodnoj slici prikazano je kako se, ovisno o tipu mrežne arhitekture, funkcionalne komponente distribuirane i centralizirane jedinice (DU i CU), odnosno dijelovi BBU-a, postupno premještaju bliže korisnicima, s ciljem očuvanja zadovoljavajuće razine kvalitete usluge i zahtijevanih parametara za zastupljeni tip prometa.

Jedna od osnovnih optičkih tehnologija za fronthaul je direktna optička veza tipa od točke do točke (engl. Point-to-Point - P2P), koja omogućava zasebnu vezu između RU i DU/BBU lokacije. P2P optički fronthaul se ističe kao rješenje pogodno za scenarije s visokim kapacitetom i niskim kašnjenjem, ali njegova implementacija zahtijeva značajna ulaganja,

posebno u gusto raspoređenim mrežama s velikim brojem RU lokacija. Zbog toga se u istraživanjima razmatraju i arhitekture od točke do više točaka (engl. Point-to-Multipoint - PMP), odnosno pasivne optičke mreže (engl. Passive Optical Network - PON). PMP mreže omogućavaju dijeljenje optičke infrastrukture između više krajnjih tačaka i time mogu smanjiti troškove implementacije u odnosu na P2P pristup. Pasivne optičke mreže predstavljaju posebno važan smjer razvoja za fronthaul i midhaul segmente mreže jer omogućavaju ekonomičnije korištenje optičke infrastrukture i smanjenje potrebe za velikim brojem izravnih optičkih vlakana. U dostupnim analizama se PON, uključujući varijante kao što su WDM-PON (engl. Wavelength Division Multiplexing-PON) i TWDM-PON (engl. Time and Wavelength Division Multiplexing-PON), navodi kao relevantno rješenje za 5G i buduće mreže, jer omogućava povezivanje više radio jedinica preko zajedničke optičke distribucijske infrastrukture [53].

Pored optičkog vlakna, kao važna alternativa za određene scenarije navodi se optika kroz slobodni prostor (engl. Free Space Optics - FSO), tj. optički prijenos kroz slobodni prostor pomoću laserskih veza. FSO se u nekim istraživanjima navodi kao rješenje koje može biti primjenjivo kada P2P ili PON optičke veze nisu dostupne zbog ekonomskih, geografskih ili fizičkih ograničenja, pri čemu nudi visok kapacitet i veću fleksibilnost implementacije. Ipak, FSO ima ograničenja u pogledu pouzdanosti u nepovoljnim vremenskim uvjetima, pa se u literaturi ističe potreba za novim metodama usmjeravanja i modulacije optičkog signala, kao i hibridnim pristupima kako bi se ublažila osjetljivost FSO sistema na atmosferske uvjete. Također, hibridna PON-FSO arhitektura se nudi kao atraktivno rješenje s aspekta troškovne učinkovitosti, ali ne i kao energetska najpovoljnija opcija u usporedbi s P2P ili PON arhitekturama, posebno u većim područjima s većim brojem RU elemenata i tokom dužih perioda rada [53].

Energetski aspekt optičkih fronthaul rješenja posebno je važan za energetska učinkovitost mobilnih mreža. U radu, [53] koji uspoređuje P2P, PON i PON-FSO arhitekture pokazano je da PON arhitekture u analiziranom scenariju zahtijevaju 10,27%, 6,4% i 4,3% ukupne mrežne potrošnje energije za dijeljene omjere 1:4, 1:8 i 1:16, dok PON-FSO arhitekture za iste dijeljene omjere zahtijevaju 38%, 36,15% i 35,2% ukupne potrošnje energije, što je prikazano na Slici 4.10.



Slika 4.10 Raspodjela ukupnih troškova potrošnje energije u odnosu na optičku arhitekturu fronthaul-a jedne godine rada za 34 RU-a [53]

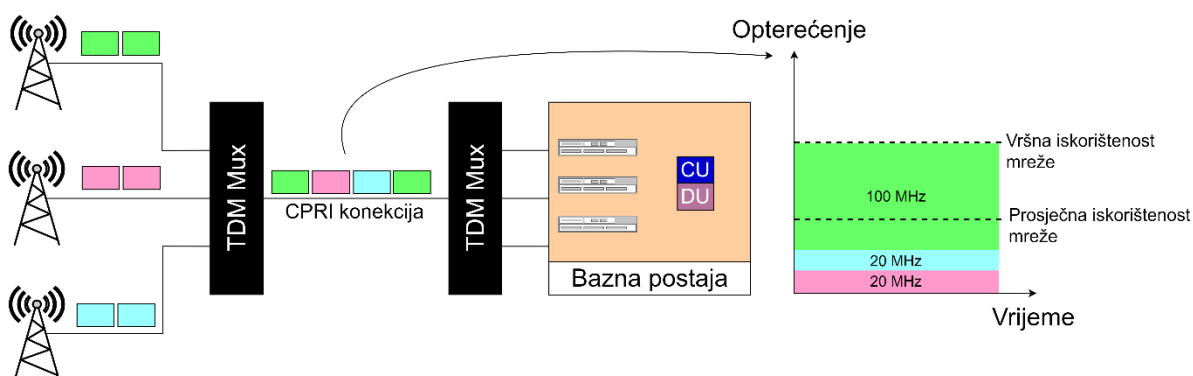
Prikazani rezultati također ističu da DU ima najveći doprinos potrošnji energije u svim proučavanim arhitekturama, što ukazuje da optimizacija fronthaul segmenta mora biti povezana i s optimizacijom lokacije, broja i načina rada DU-ova. Rezultati također pokazuju da fronthaul baziran na optici, odnosno P2P ili PON, troši manje energije od PON-FSO arhitektura, dok se PON-FSO ističe kao troškovno privlačno rješenje, ali uz potencijalno veću energetska potrošnju. Iz toga proizlazi da izbor optičke tehnologije ne smije biti zasnovan samo na kapacitetu i trošku izgradnje, već mora uključiti i dugoročnu potrošnju energije, mogućnosti korištenja obnovljivih izvora i scenarije selektivnog uključivanja ili isključivanja RU i fronthaul veza u zavisnosti od prometa [53]. U cilju detaljne analize optičkih i hibridnih rješenja za fronthaul i midhaul segmente, Tablica 4.2 prikazuje usporedbu P2P, PON i FSO tehnologija na osnovu relevantnih istraživanja i standarda.

U kontekstu fronthaul/midhaul arhitekture treba spomenuti i radio prijenos preko optike (engl. Radio-over-Fiber - RoF), jer omogućava prijenos radio signala preko optičkog vlakna i može podržati napredne koordinacijske funkcionalnosti. U radu [52] koji analizira primjenu optičkih x-haul mreža, navodi se primjer 60 GHz RoF fronthaul veze s CoMP (engl. Coordinated Multi-Point) funkcionalnošću, gdje je signal transportiran preko 10 km standardnog optičkog vlakna prije detekcije u RRH, a rezultati su pokazali poboljšanje od 1,3 dB u odnosu na FEC (engl. Forward Error Correction) granicu, kada se primijeni CoMP. CoMP predstavlja mehanizam koordiniranog prijenosa i/ili prijema signala iz više mrežnih tačaka prema istom korisniku, s ciljem poboljšanja kvalitete signala, povećanja kapaciteta i smanjenja interferencije. Time se pokazuje da optički fronthaul ne služi samo za pasivni prijenos podataka, već može biti povezan s naprednim RAN funkcijama koje poboljšavaju performanse korisnika, posebno za ćelije u rubnim područjima.

Tablica 4.2 Usporedba P2P, PON i FSO [52],[54],[55],[56],[57]

Karakteristika	P2P	PON	FSO
Topologija	Dodijeljena veza (1:1)	Dijeljena infrastruktura (1:N)	Bežična optička LOS veza
Kapacitet	Vrlo visok	Visok, dijeljen	Visok, ali varijabilan
Kašnjenje	Vrlo niska	Niska–umjerena	Niska
Pouzdanost	Vrlo visoka	Visoka	Osjetljiva na vremenske uslove
Skalabilnost	Ograničena	Vrlo dobra	Umjerena
CAPEX	Visok	Niži	Nizak–umjeren
OPEX	Umjeren	Nizak	Umjeren
Energetska učinkovitost	Visoka	Vrlo visoka (pasivni elementi)	Varijabilna
Infrastruktura	Zahtijeva vlakna	Dijeljena optika	Nema vlakana
Fleksibilnost	Niska	Umjerena	Visoka
Otpornost na smetnje	Visoka	Visoka	Niska (magla, kiša)
Primjena (urbana)	Dobra, ali skupa	Vrlo pogodna	Ograničena
Primjena (ruralna)	Ograničena	Dobra	Vrlo pogodna
Prednosti	Stabilnost, performanse	Efikasnost, dijeljenje	Brza implementacija
Ograničenja	Trošak, skalabilnost	Dijeljenje kapaciteta	Vremenski uticaji

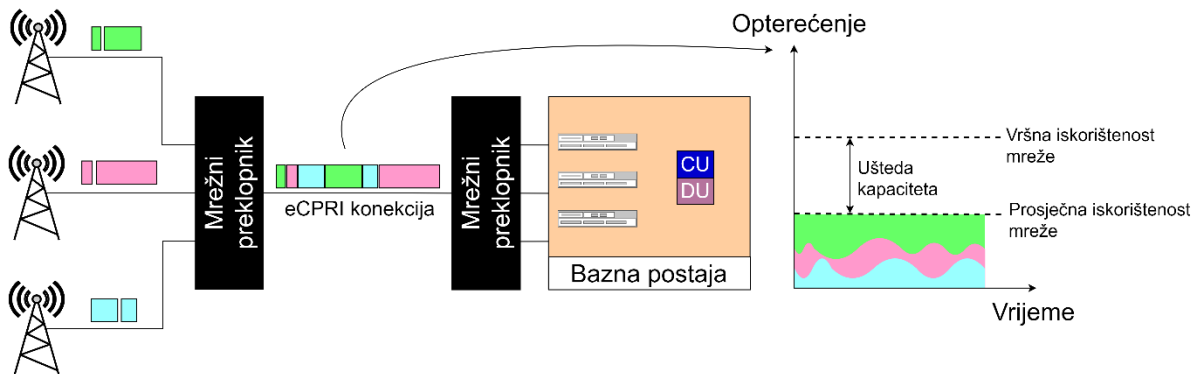
U kontekstu razvoja 5G RAN arhitektura, zajedničko javno radio sučelje (engl. Common Public Radio Interface - CPRI) i napredni CPRI (engl. enhanced CPRI - eCPRI) predstavljaju fronthaul interfejs i protokole za povezivanje RU i BBU, ali se razlikuju prema načinu prijenosa podataka, zahtjevima za kapacitetom i pogodnosti primjene u suvremenim 5G implementacijama. U C-RAN arhitekturi radio signali koje primaju RU jedinice digitaliziraju se i prenose preko fronthaul mreže prema udaljenom BBU, gdje se izvodi obrada signala. Takav pristup smanjuje složenost baznih postaja i omogućava dijeljenje kapaciteta obrade između više elemenata mreže, ali istovremeno postavlja stroge zahtjeve u pogledu kašnjenja, fluktuacija signala (engl. jitter) i propusnosti fronthaul segmenta. CPRI je dugo korišten kao dominantno RU–BBU sučelje, pri čemu se zasniva na prijenosu vremenski domenskih uzoraka nosioca po anteni poznatih kao IQ (engl. In-phase in-Quadrature) uzorci, kroz TDM strukturu konstantne brzine. Zbog toga svaki nosilac signala pojedine antene zauzima fiksne resurse nezavisno od stvarne količine korisničkih podataka u ćeliji, kako je to prikazano na Slici 4.11.



Slika 4.11 CPRI prijenos [58]

Slika 4.11 prikazuje princip rada CPRI fronthaul arhitekture zasnovane na TDM multipleksiranju, gdje više radijskih jedinica kontinuirano šalje IQ podatke u vremenskoj domeni prema centraliziranoj baznoj postaji koristeći fiksno alocirane prijenosne resurse. Kao što je istaknuto, svaki radijski tok zauzima unaprijed definiran dio kapaciteta bez obzira na stvarno prometno opterećenje, što je vizualno predstavljeno stalno prisutnim obojenim segmentima koji prolaze kroz TDM multipleksere. Takav pristup implicira da CPRI prijenos ne razlikuje periode visokog i niskog korisničkog prometa, nego mreža mora biti dimenzionirana prema maksimalno mogućem opterećenju, odnosno prema vršnoj iskorištenosti mreže. Također na Slici 4.11, dodatno je ilustriran jedan od ključnih problema klasičnog CPRI pristupa. Iako pojedini tokovi nositelja (npr. 20 MHz i 100 MHz) tijekom vremena ostvaruju različite nivoe stvarnog opterećenja, TDM bazirani prijenos rezervira puni kapacitet za svaki tok neovisno o trenutnoj količini korisničkih podataka. Posljedica toga je velika razlika između prosječne i vršne iskorištenosti mreže, pri čemu značajan dio transportnih resursa ostaje neiskorišten tijekom većeg dijela vremena. Takva statička alokacija kapaciteta dovodi do niske efikasnosti iskorištenja fronthaul mreže, povećanih zahtjeva za optičkim linkovima i viših troškova implementacije. Takav princip je bio prikladan za ranije generacije mobilnih mreža, ali u 5G okruženju, posebno uz masivni MIMO, veći broj antenskih elemenata i nosioce veće pojasne širine zastupljen u NR 5G mrežama, CPRI dovodi do naglog rasta zahtjeva za fronthaul kapacitetom, pri čemu upotreba CPRI-ja za aktivni antenski sustav (engl. Active Antenna System – AAS) radio jedinice može zahtijevati više od 100 Gbit/s, što je nepraktično za point-to-point optičke veze i predstavlja značajan izazov za fronthaul mreže. Zbog toga se uvodi eCPRI kao paketno orijentirana evolucija CPRI-ja, dizajnirana za Ethernet i IP mreže, pri čemu eCPRI umjesto vremenski domenskih antenskih uzoraka prenosi paketske podatke između radijske jedinice i 5G RAN računarskih čvorova, čime se povećavaju

efikasnost brzine prijenosa i skalabilnost čvorova. Za razliku od CPRI pristupa, koji zahtijeva dimenzioniranje prema vršnom opterećenju, eCPRI omogućava korištenje paketne Ethernet/IP fronthaul mreže i statističko multipleksiranje, tako da se planiranje fronthaul kapaciteta može zasnivati na prosječnom iskorištenju mreže uz odgovarajuću rezervu (Slika 4.12), a ne isključivo na maksimalnom zbiru svih pojedinačnih vršnih protoka prometa [58].



Slika 4.12 eCPRI prijenos [58]

Slika 4.12, prikazuje arhitekturu eCPRI fronthaul sustava zasnovanog na paketnom prijenosu podataka preko mrežnih preklopnika, pri čemu se u ovom slučaju, promet iz više radijskih jedinica agregira prema centraliziranoj baznoj postaji u kojoj su DU i CU funkcionalnosti. Za razliku od klasičnog CPRI pristupa zasnovanog na TDM multipleksiranju i fiksno rezerviranom kapacitetu, eCPRI transportuje samo stvarni korisnički promet, što je na Slici 4.12 predstavljeno promjenjivom veličinom obojenih paketa unutar eCPRI konekcije. Kod eCPRI sustava dio obrade fizičkog sloja premješta se iz centralizirane jedinice prema radijskoj jedinici, zbog čega se preko fronthaul veze više ne prenose sirovi IQ uzorci za svaku fizičku antenu, nego prethodno obrađeni podaci koji predstavljaju stvarne korisničke slojeve u frekvencijskoj domeni. Time potrebna brzina prijenosa više ne zavisi direktno o ukupnom broju antena, već o broju aktivnih korisnika i stvarnom prometnom opterećenju mreže. Takav pristup omogućava značajno smanjenje fronthaul bitne brzine i efikasnije iskorištenje transportnih resursa u odnosu na tradicionalni CPRI pristup. Desni dio Slike 4.12, dodatno ilustrira jednu od najvažnijih prednosti eCPRI arhitekture, odnosno mogućnost statističkog multipleksiranja prometa. Budući da različite radijske stanice u pravilu ne ostvaruju vršno opterećenje u istom vremenskom trenutku, agregirani promet postaje znatno manji od prostog zbroja pojedinačnih maksimalnih brzina svih stanica. To omogućava da se transportna mreža dimenzionira prema prosječnoj iskorištenosti mreže, uz određenu sigurnosnu marginu, umjesto prema teorijskom vršnom opterećenju. Na slici je ta razlika prikazana kao „ušteda kapaciteta” između prosječne i vršne iskorištenosti mreže. Time se značajno smanjuju zahtjevi prema transportnoj infrastrukturi, povećava efikasnost iskorištenja mrežnih resursa i smanjuju operativni troškovi implementacije 5G mreža. Osim smanjenja potrebnog kapaciteta, paketna priroda eCPRI-ja omogućava fleksibilniju integraciju sa suvremenim Ethernet/IP mrežama i cloud-RAN arhitekturama, čime se pojednostavljuje skaliranje mreže i implementacija virtualiziranih funkcionalnosti.

U okviru funkcionalnih splitova, izbor nivoa podjele između radio jedinice i BBU obrade direktno određuje prometni obrazac, zahtjeve za kašnjenjem i potreban fronthaul kapacitet. Niži funkcionalni split pojednostavljuje RRH, ali povećava fronthaul brzinu, zahtjeve za ultra niskim kašnjenjem i ograničenja udaljenosti, dok premještanje dijela obrade prema radio jedinici može smanjiti nepotrebn overhead i relaksirati zahtjeve za propusnošću. Konkretno, funkcionalni Split E u eCPRI specifikaciji ekvivalentan je CPRI funkcionalnom splitu, jer podrazumijeva kvantizaciju i digitalizaciju spušenog radio talasa u vremenskoj

domeni, dok se kod sljedećih eCPRI splitova dio obrade, poput uklanjanja cikličkog prefiksa, FFT obrade, uklanjanja zaštitnih podnosioca i demapiranja resursnih blokova, može izvršiti ranije, čime se uklanja značajan dio overheada, a fronthaul brzina postaje zavisna od iskorištenja radio resursnih blokova, odnosno od opterećenja ćelije [59]. Zbog prelaska na paketni fronthaul, eCPRI je posebno značajan za 5G i buduće mreže jer omogućava fleksibilnije CRAN i DRAN implementacije, efikasnije korištenje RAN računarskih resursa, lakše operacije i održavanje kroz Ethernet/IP ekosistem, bolju skalabilnost i mogućnost kombiniranja različitih scenarija implementacije, funkcionalnih splitova i potencijalno drugih servisa unutar iste paketne mreže.

Za istaknuti je značajno smanjenje potrošnje energije od čak 75%, koje je jedan europski telekomunikacijski operater ostvario prelaskom na potpuno optičku infrastrukturu [9], te se u kontekstu mobilnih mreža može zaključiti da je postupna eliminacija bakrenih dijelova komunikacijskih veza nužna kroz sve segmente sustava, uključujući RAN, transportnu i jezgrenu mrežu, pri čemu se posebna važnost pridaje modernizaciji transportnog sloja te povezivanju RAN i core funkcija putem energetski učinkovitih optičkih tehnologija, čime se omogućava cjelovito smanjenje potrošnje energije i povećanje ukupne energetske učinkovitosti mreže.

5. AI-POTPOMOGNUTO UPRAVLJANJE I AUTONOMIJA MREŽA

Razvojem 5G i budućih 6G mreža, sve veći naglasak stavlja se na primjenu inteligentnih i autonomnih mehanizama upravljanja, koji omogućavaju dinamičku optimizaciju mrežnih resursa i poboljšanje ukupnih performansi sistema. Posebno se ističe uloga umjetne inteligencije i strojnog učenja u upravljanju energijom, kao i koncepti integracije komunikacije i senzorskih funkcionalnosti te autonomnih mreža koje samostalno prilagođavaju svoj rad u realnom vremenu. U nastavku poglavlja razmatraju se prethodno pobrojani pristupi koji omogućavaju ovakvu transformaciju mreža prema inteligentnim i samoupravljujućim sistemima.

5.1 AI u upravljanju energijom

U suvremenim 5G i budućim mobilnim komunikacijskim sustavima, umjetna inteligencija (engl. Artificial Intelligence - AI) predstavlja alat za unapređenje energetske učinkovitosti kroz inteligentno upravljanje mrežnim resursima i adaptivno prilagođavanje potrošnje energije. Tradicionalni pristupi upravljanju energijom, koji se temelje na statičkim ili generaliziranim pravilima, pokazali su se nedovoljno učinkovitim u složenim i dinamičkim mrežnim okruženjima, posebno zbog varijabilnosti mrežnog prometa u mobilnoj mreži i različitih uvjeta na pojedinim lokacijama. U tom kontekstu, AI omogućava razvoj preciznijih strategija uštede energije koje se temelje na analizi stvarnog prometa, ponašanja korisnika i specifičnih karakteristika mrežnih čvorova, čime se značajno poboljšava ukupna učinkovitost sustava. Tablica 5.1 pruža detaljnu usporedbu između glavnih kategorija prošlih strategija i modernih rješenja temeljenih na umjetnoj inteligenciji u pogledu energetske učinkovitosti, ističući njihove ciljeve, tehnike, skalabilnost i ograničenja.

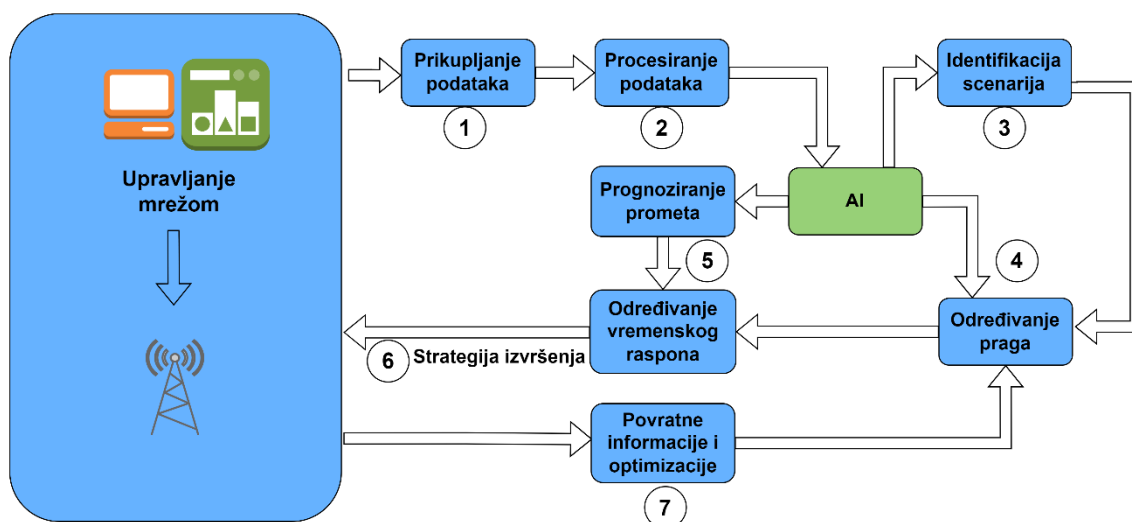
Tablica 5.1 Kvalitativna usporedba tradicionalnih i AI EE strategija u 5G mrežama [60]

Kategorija	Dosadašnje strategije (prije AI / konvencionalni pristupi)	Suvremene strategije (AI-temeljeni / 5G pristupi)
Kontrola snage i raspodjela resursa	Statičke ili heurističke sheme raspodjele snage temeljene na stanju kanala ili zahtjevima korisnika. Ograničeno na lokalnu optimizaciju i kratkoročne ciljeve.	Adaptivno upravljanje temeljeno na umjetnoj inteligenciji korištenjem metoda dubokog učenja. Prediktivna raspodjela snage zasnovana na prognozi prometa.
Hardverska rješenja	Poboljšanje energetske učinkovitosti kroz komponente niske potrošnje, pojačala snage i optimizaciju sklopova. Tehnike poput uspavljivanja MIMO antena, efikasnih RRU i optimizacije sustava hlađenja.	Softverski definirano i AI potpomognuto upravljanje hardverom. Inteligentna aktivacija baznopojsnih jedinica, dinamička virtualizacija hardvera i prediktivno održavanje uz korištenje digitalnih blizanaca radi smanjenja potrošnje u mirovanju.
Upravljanje i planiranje mreže (uključivanje/isključivanje)	Statička ili pragovima definirana aktivacija/deaktivacija baznih postaja. Periodični režimi mirovanja djelovan ili cijelih baznih postaja i upravljanje na temelju prometa. Ograničeno uvažavanje prostorno-vremenskih obrazaca potražnje.	Primjena potpomognutog ili dubokog učenja (engl. reinforcement learning - RL i deep learning - RL) za dinamičko upravljanje uključenjem/isključenjem baznih postaja; proaktivna predikcija prometa. Autonomni kontroleri koji omogućuju optimizaciju u stvarnom vremenu.
Orkestracija i mrežno rezanje (slicing)	Ručna raspodjela resursa i statičko rezanje mreže.	Orkestracija i rezanje mreže temeljeni na AI-u. Energetski svjesna raspodjela resursa po segmentima i koordinacija između RAN, transportnog i rubnog sloja.
Rubna inteligencija i migracija zadataka	Centralizirana obrada u oblaku uz ograničenu prilagodbu potrošnje energije.	Suradnja rubnog i cloud okruženja te inteligentna migracija opterećenja. AI temeljeno preusmjeravanje zadataka i federativna koordinacija za energetski učinkovitu obradu i pohranu.
Skalabilnost i prilagodljivost	Ograničena skalabilnost zbog centraliziranog upravljanja i statičkih konfiguracija.	Visoka skalabilnost omogućena distribuiranim učenjem, koordinacijom više agenata i samoprilagodljivim mehanizmima orkestracije.
Potencijal uštede energije	Umjeren (10–25% smanjenja ukupne potrošnje energije).	Značajan (30–60% smanjenja u AI potpomognutim hibridnim sustavima).
Ograničenja	Reaktivno donošenje odluka, nedostatak kontekstualne svjesnosti, poteškoće u upravljanju heterogenim 5G uslugama.	Veći računalni troškovi, izazovi interpretabilnosti modela te nedostatak standardizacije za interoperabilne AI sustave.

Posebno važna funkcionalnost AI-a ogleda se u mogućnosti predikcije opterećenja baznih postaja na osnovu povijesnih i kontekstualnih podataka, što omogućava proaktivno upravljanje mrežnim resursima i optimizaciju potrošnje energije kroz dinamičko uključivanje i isključivanje pojedinih mrežnih elemenata. AI omogućava automatizirano podešavanje parametara i donošenje odluka u realnom vremenu, pri čemu se postiže optimalna ravnoteža između potrošnje energije i ključnih pokazatelja performansi mreže, čime se izbjegava degradacija kvalitete usluge [61]. Inteligentni sustav za uštedu energije temeljen na umjetnoj inteligenciji obuhvaća niz osnovnih funkcionalnosti koje omogućuju prilagodljivo i učinkovito upravljanje potrošnjom energije u mreži. Prije svega, provodi se:

- **Automatsko prepoznavanje scenarija rada** na temelju analize povijesnih obrazaca korisničkog prometa, pri čemu se razlikuju različita okruženja poput poslovnih zona, stambenih područja ili prometnih koridora, što omogućuje odabir odgovarajućih početnih strategija uštede energije.
- **Predviđanje opterećenja mreže** temelji se na modeliranju vremenskih nizova koristeći podatke kao što su iskorištenost resursnih blokova, broj aktivnih korisnika, ukupni promet te utjecaj posebnih dana, blagdana i ponašanja korisnika, čime se omogućuje pravovremeno aktiviranje mehanizama uštede energije.
- **Koordinirano upravljanje između više ćelija**, pri čemu se uzima u obzir pokrivenost i opterećenje susjednih ćelija kako bi se osigurala dostupnost resursa prilikom eventualnog gašenja pojedine ćelije i preusmjeravanja korisnika. U tu svrhu koriste se operativni parametri poput identifikatora lokacije, geografskih koordinata, visine i orijentacije antene, kao i određeni mjerni podaci, na temelju kojih se procjenjuje kvaliteta pokrivenosti i međusobni odnosi između ćelija.
- **Kontinuirana iteracija i optimizacija parametara u stvarnom vremenu**, pri čemu se pragovi radnih parametara prilagođavaju na temelju performansi mreže, za razliku od tradicionalnih statičkih pristupa koji zanemaruju specifičnosti pojedinih lokacija i rezultiraju konzervativnim, ali manje učinkovitim strategijama uštede energije [62].

Pregled općeg postupka primjene inteligentnih strategija uštede energije zasnovanih na umjetnoj inteligenciji u RAN mreži prikazan je na Slici 5.1.



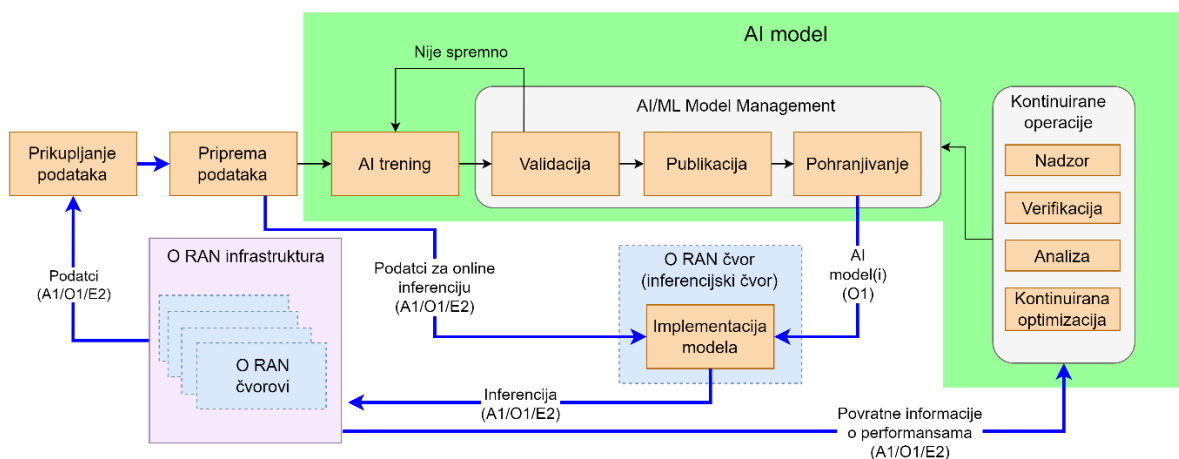
Slika 5.1 AI procedure za smanjenje potrošnje energije u RAN-u [62]

Ovaj postupak sastoji se od više međusobno povezanih faza koje omogućavaju optimizaciju energetske učinkovitosti mobilne mreže. U početnoj fazi vrši se prikupljanje relevantnih

podataka o performansama baznih postaja putem kontrolnih mehanizama (Slika 5.1), nakon čega slijedi njihova obrada kroz filtriranje i prilagodbu u format pogodan za daljnju analizu. Tako pripremljeni podaci koriste se kao ulaz u AI sustav, koji na osnovu njih razvija odgovarajuće algoritme i generira operativne scenarije s ciljem smanjenja potrošnje energije. U ovoj fazi definiraju se i ključni pokazatelji energetske učinkovitosti te pripadajući pragovi koji se trebaju zadovoljiti (Slika 5.1). U narednim koracima, na temelju povijesnih podataka, umjetna inteligencija predviđa vrstu i intenzitet mrežnog prometa u određenom vremenskom periodu te određuje odgovarajuće tehnike uštede energije i vrijeme njihove primjene. U šestom koraku, odabrana strategija, koja može biti zasnovana na vremenskoj, prostornoj ili frekvencijskoj optimizaciji, ili njihovoj kombinaciji, se implementira. Nakon implementacije, u završnoj fazi provodi se kontinuirano praćenje performansi mrežnih segmenata kako bi se utvrdilo da li su postignuti zadani ciljevi energetske učinkovitosti. Cjelokupan proces realizira se kao zatvorena petlja upravljanja, koja omogućava stalno prilagođavanje KPI parametara i pragova u skladu s promjenama u mreži, čime se osigurava dugoročna optimizacija potrošnje energije [62].

5.1.1 Proces rada AI u O-RAN-u

U okviru O-RAN arhitekture, RIC koji nije u stvarnom vremenu preuzima ulogu centralnog orkestratora za energetske učinkovito upravljanje mrežnim resursima zasnovano na umjetnoj inteligenciji, pri čemu nadzire cjelokupan životni ciklus AI procesa usmjerenih na smanjenje potrošnje energije u mreži. Cjelokupan tok obrade AI modela prikazan je na Slici 5.2, a započinje prikupljanjem relevantnih podataka putem standardiziranih sučelja A1, O1 i E2. Ovi podaci, koji uključuju informacije o broju korisnika po baznoj postaji, iskorištenosti resursa (kanala, podnosioca i resursnih blokova), opterećenju mreže te parametrima kvalitete signala, agregiraju se u centralizirane repozitorije i koriste za daljnju obradu. U narednoj fazi provodi se priprema podataka kroz procese normalizacije, skaliranja, restrukturiranja i kompresije, kako bi se osigurala kompatibilnost s ulaznim zahtjevima AI modela namijenjenih optimizaciji energetske učinkovitosti.



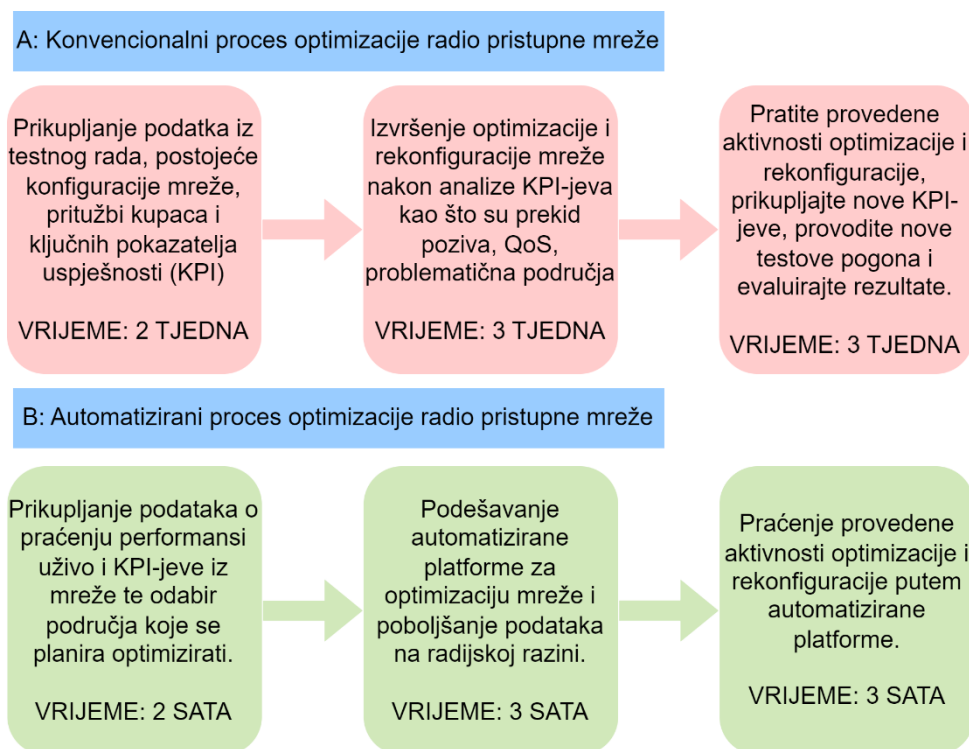
Slika 5.2 AI tijekom rada u O-RAN arhitekturi [21]

Nakon pripreme podataka slijedi offline treniranje modela, čime se osigurava da se u operativno okruženje implementiraju samo provjereni modeli i visokih performansi (Slika 5.2). Proces validacije uključuje testiranje modela na različitim skupovima podataka i u različitim mrežnim uvjetima, uključujući promjene u prometu, gustoći korisnika i raspodjeli frekvencijskih resursa. Modeli koji zadovolje definirane kriterije pohranjuju se u AI katalog i

pripremaju za implementaciju, dok se neadekvatni modeli dodatno optimiziraju i ponovno treniraju. Implementacija modela može se realizirati u obliku kontejnerskih aplikacija ili samostalnih izvršnih datoteka, koje se pokreću na mrežnim čvorovima unutar O-RAN arhitekture, gdje kontinuirano izvršavaju zadatke poput klasifikacije, predikcije ili generiranja politika energetske učinkovitosti. Rezultati rada AI modela direktno utječu na ponašanje RAN komponenti putem A1, E2 i O1 sučelja, uz poštivanje vremenskih ograničenja, posebno u scenarijima gotovo stvarnog vremena. Nakon implementacije, modeli su podložni kontinuiranom nadzoru, verifikaciji i analizi performansi, pri čemu zatvorena upravljačka petlja omogućava pravovremenu prilagodbu ili zamjenu modela koji ne ostvaruju očekivane rezultate, bez narušavanja kvalitete usluge [21]. Ovakav pristup omogućava inteligentno upravljanje mrežnim resursima, gdje se na temelju predikcije prometa i adaptivnih politika mogu deaktivirati nedovoljno iskorišteni mrežni elementi, redistribuirati korisničko opterećenje i dinamički prilagoditi radijski parametri, čime se postiže smanjenje ukupne potrošnje energije uz očuvanje zadane razine kvalitete usluge.

5.2 Samoorganizirane mreže

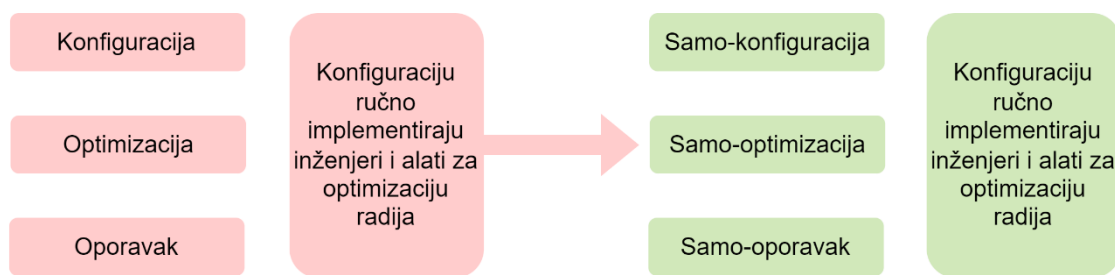
Samoorganizirane mreže (engl. Self-organizing networks - SON) predstavljaju koncept autonomnog upravljanja mobilnim mrežama, pri čemu mrežni elementi samostalno konfiguriraju, optimiziraju i održavaju svoj rad bez potrebe za centraliziranom kontrolom ili ručnim intervencijama. Na Slici 5.3 je prikazano vrijeme trajanja optimizacijskih procesa bez i sa SON mrežama.



Slika 5.3 Usporedba tradicionalne i automatska optimizacija [63]

Ovaj pristup temelji se na distribuiranom donošenju odluka, gdje pojedini čvorovi koriste lokalne informacije i mjerenja kako bi dinamički prilagodili parametre rada, uključujući raspodjelu radio resursa, upravljanje interferencijom i optimizaciju pokrivenosti. Ključni pokretači implementacije SON-a u postojećim i budućim mobilnim mrežama proizlaze

prvenstveno iz rastuće kompleksnosti mrežnih arhitektura i zahtjeva za njihovim učinkovitijim upravljanjem. U B5G okruženju, gdje različite generacije mreža (2G/3G/4G/5G) koegzistiraju i međusobno djeluju, procesi planiranja, podešavanja i upravljanja mrežnim parametrima postaju izrazito složeni, što onemogućava njihovo efikasno provođenje bez automatiziranih SON funkcija koje djeluju u stvarnom vremenu i oslanjaju se na povratne informacije iz mreže. Nadalje, potreba za podrškom standardiziranih karakteristika prometa u okviru 5G scenarija uporabe, poput eMBB, URLLC i mMTC, zahtijeva integraciju odgovarajućih mehanizama unutar SON sustava kako bi se ostvarili ciljevi poput niskog kašnjenja i visoke pouzdanosti. Dodatno, razvoj inteligentnih mreža temelji se na primjeni umjetne inteligencije i strojnog učenja, pri čemu napredni algoritmi strojnog učenja predstavljaju temelj za realizaciju distribuiranih i učinkovitih SON rješenja, za razliku od jednostavnih automatizacijskih pristupa koji nisu adekvatni za kompleksna okruženja. Daljnji razvoj SON platformi usko je povezan s integracijom naprednih tehnologija kao što su Cloud RAN, mmWave komunikacije, kognitivni radio, rezanje mreže, dijeljenje spektra, NFV/SDN, automatizirani backhaul te masivni MIMO, čime se omogućava postizanje maksimalnih performansi i potpuna realizacija koncepta inteligentnih mreža nove generacije. Prema klasifikaciji definiranoj u okviru 3GPP i NGMN organizacija, primjene SON koncepta strukturirane su u tri temeljne kategorije koje ujedno predstavljaju osnovne stupove automatizacije mobilnih mreža, kako je to prikazano na Slici 5.4.



Slika 5.4 Zamjena ručnih operacija sa SON-om [63]

Prva kategorija odnosi se na **samo-optimizaciju** (engl. self-optimization), koja obuhvaća kontinuirano prilagođavanje mrežnih parametara s ciljem poboljšanja performansi, kvalitete usluge i energetske učinkovitosti. Druga kategorija, **samo-konfiguracija** (engl. self-configuration), odnosi se na automatizirano inicijalno postavljanje i integraciju novih mrežnih elemenata, čime se smanjuje potreba za ručnom intervencijom i ubrzava proces implementacije mreže. Treća kategorija, **samo-oporavak** (engl. self-healing), podrazumijeva mehanizme za automatsko detektiranje, dijagnosticiranje i otklanjanje kvarova, čime se osigurava stabilnost i pouzdanost rada mreže. Ove tri funkcionalne cjeline zajedno omogućavaju realizaciju autonomnih mrežnih sustava sposobnih za samostalno upravljanje i optimizaciju u dinamičnim operativnim uvjetima [63].

S operativnog aspekta, SON omogućava implementaciju distribuiranih algoritama za upravljanje radio resursima, gdje bazne postaje autonomno optimiziraju vlastite performanse uz istovremeno uvažavanje utjecaja na susjedne ćelije, što je posebno važno u kontekstu upravljanja interferencijom i raspodjelom snage. Takvi algoritmi često koriste pristupe temeljene na teoriji igara ili metodama strojnog učenja kako bi se postigla ravnoteža između spektralne i energetske učinkovitosti, pri čemu se u optimizacijski proces uvodi i trošak potrošnje energije, čime se izbjegava nepotrebno korištenje maksimalne odašiljačke snage bežičnog signala. U kontekstu energetske učinkovitosti, SON predstavlja izuzetno važan pristup jer omogućava dinamičko prilagođavanje mrežnih resursa stvarnim potrebama sustava, čime se izbjegava nepotrebna potrošnja energije u uvjetima smanjenog opterećenja. Kroz

autonomnu optimizaciju parametara kao što su prijenosna snaga, raspodjela resursnih blokova i pokrivenost ćelija, moguće je smanjiti interferenciju i poboljšati ukupnu energetska učinkovitost mreže, uz istovremeno očuvanje kvalitete usluge [64].

Arhitektura SON sustava može se na visokoj razini podijeliti na tri osnovna pristupa: **centralizirani**, **distribuirani** i **hibridni** SON. U centraliziranom SON-u (engl. Centralized SON - C-SON), algoritmi za upravljanje i optimizaciju mreže izvršavaju se na višim razinama upravljanja, poput sustava za operacije, administraciju i održavanje (engl. Operations, Administration and Maintenance – OAM), pri čemu se dodatno razlikuju varijante na razini upravljanja mrežom i upravljanja elementima, što omogućava globalni uvid u rad mreže i koordinaciju većeg broja ćelija, primjerice u kontekstu raspodjele opterećenja na širem geografskom području. Nasuprot tome, distribuirani SON (engl. Distributed SON - D-SON) podrazumijeva izvršavanje SON funkcija izravno na razini mrežnih elemenata, najčešće baznih postaja, čime se omogućava brza i lokalno optimizirana reakcija na promjene u mreži. Kao kompromis između ova dva pristupa, **hibridni SON** kombinira centralizirane i distribuirane funkcionalnosti, pri čemu se algoritmi izvršavaju na više razina istovremeno, čime se postiže ravnoteža između globalne optimizacije i lokalne prilagodljivosti mreže [65].

Prema dokumentu [66], napredna arhitektura mreže za implementaciju nove generacije SON-a (engl. Next Generation SON - NG SON) sustava zahtijeva pažljivo projektiran pristup koji objedinjuje prednosti distribuiranih i centraliziranih rješenja kroz hibridni model. Takva arhitektura omogućava istovremeno brzo reagiranje na promjene u mreži putem D-SON funkcionalnosti, kao i dugoročno upravljanje i optimizaciju na razini cijele mreže putem C-SON pristupa. Uz to, ključnu ulogu ima podatkovna platforma zasnovana na konceptima velikih podataka, koja prikuplja i obrađuje mjerne podatke, zapise i konfiguracijske informacije iz RAN-a i korisničke opreme, čime se osigurava temelj za automatizirano donošenje odluka. Važan aspekt ovakvih sustava predstavlja i vizualizacija procesa optimizacije, koja operatorima omogućava praćenje utjecaja SON prilagodbi na performanse mreže i korisničko iskustvo. Fleksibilnost sustava dodatno se unapređuje uvođenjem programibilnosti, čime se inženjerima omogućava razvoj i implementacija novih optimizacijskih mehanizama u cilju rješavanja specifičnih operativnih izazova.

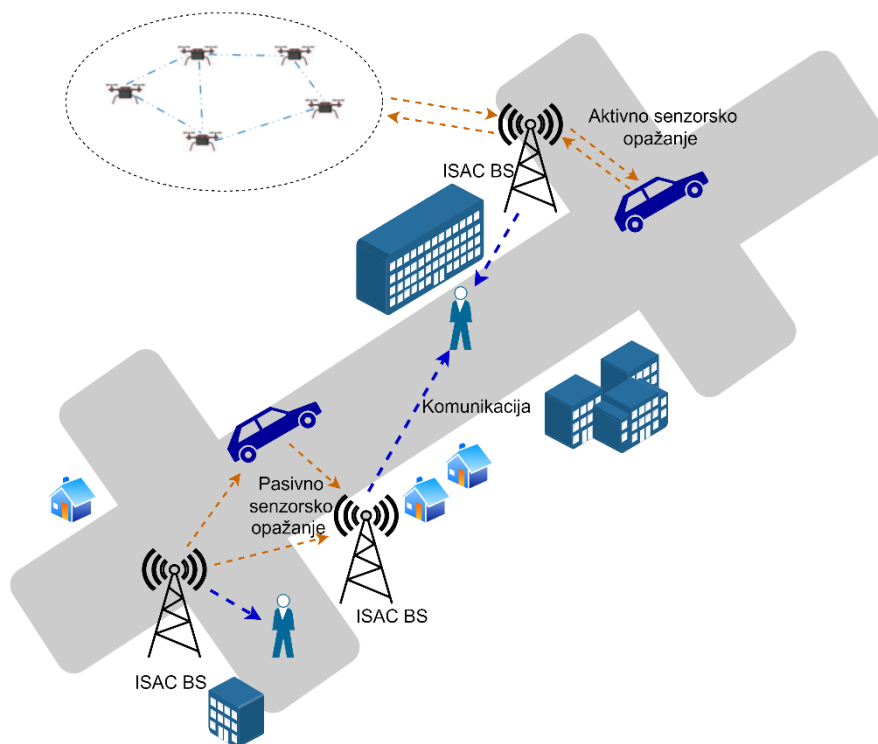
Suvremeni SON sustavi sve više integriraju umjetnu inteligenciju i distribuirane modele učenja, zajedno sa SDN/NFV infrastrukturom, čime se mrežnim čvorovima omogućava autonomna prilagodba ključnih parametara, poput dometa prijenosa i topologije povezivanja, na temelju lokalnih uvjeta. Ovakav pristup rezultira proizašlim globalnim ponašanjem koje osigurava visoku povezanost i robusnost mreže uz smanjenu potrošnju energije, dok istovremeno omogućava kontinuirano prilagođavanje promjenjivim uvjetima okruženja. Energetska učinkovitost u okviru SON sustava ostvaruje se kroz funkcionalnost samo-optimizacije koja omogućava privremeno isključivanje baznih postaja u trenucima kada njihov kapacitet nije potreban zbog smanjenog prometnog opterećenja. Ovakav pristup može rezultirati značajnim uštedama energije, osobito u velikim mobilnim mrežama koje obuhvaćaju veliki broj baznih postaja, gdje čak i djelomično smanjenje aktivnih elemenata dovodi do osjetnog smanjenja operativnih troškova. Tipični scenariji primjene uključuju noćne sate ili specifična okruženja, poput poslovnih zona, gdje je potreba za kapacitetom izrazito promjenjiva tokom dana i sedmice. Uvažavajući kompleksnost upravljanja takvim procesima, implementacija ove funkcionalnosti oslanja se na automatizirane SON mehanizme, koji pri deaktivaciji pojedine ćelije istovremeno rekonfiguriraju susjedne ćelije kako bi preuzele dodatno opterećenje, primjerice prilagodbom prijenosne snage ili usmjeravanjem bežičnog signala. Međutim, proces uštede energije ne može se promatrati izolirano, budući da promjene u jednoj ćeliji utječu na raspodjelu opterećenja, kvalitetu usluge i ukupnu potrošnju energije u ostatku mreže, zbog čega SON funkcije moraju integrirano upravljati ovim međuzavisnostima,

umjesto da se oslanjaju isključivo na jednostavne pragove opterećenja za donošenje odluka [65].

5.3 Integracija komunikacije i senzorskog opažanja

Integracija komunikacije i senzorskog opažanja (engl. Integrated Sensing and Communications - ISAC) predstavlja napredni paradigmatški pristup u kojem se komunikacijske i senzorske funkcionalnosti integriraju unutar jedinstvenog bežičnog sustava kroz zajedničko korištenje spektra, hardverskih resursa, signalnih struktura i mehanizama obrade podataka [67]. Za razliku od tradicionalnih pristupa, gdje su primjerice radar i komunikacijski sustavi projektirani i implementirani odvojeno, što rezultira neefikasnim korištenjem radio resursa, dupliranjem infrastrukture i ograničenom interoperabilnošću, ISAC uvodi koncept zajedničkog dizajna i upravljanja ovim funkcijama. Takva integracija postaje posebno značajna u kontekstu razvoja 6G mreža, gdje se očekuje prelazak sa koncepta “povezane komunikacije” na koncept “povezane inteligencije”, u kojem mreža ne samo da prenosi podatke već i aktivno opaža i interpretira fizičko okruženje [68]. Jedan od ključnih razloga za uvođenje ISAC-a je sve izraženiji problem ograničenosti spektralnih resursa i rastući zahtjevi novih aplikacija koje istovremeno zahtijevaju visoke brzine prijenosa podataka i precizno senzorsko opažanje, poput autonomnih vozila, pametnih gradova i industrijskih sustava [69]. U konvencionalnim rješenjima, odvojeni sustavi za komunikaciju i opažanje ne mogu efikasno zadovoljiti ove zahtjeve, budući da koriste različite frekvencijske pojaseve, hardverske komponente i signalne strukture. Nasuprot tome, ISAC omogućava korištenje istog bežičnog signala za prijenos podataka i istovremeno prikupljanje informacija o okruženju kroz refleksije i propagacijske karakteristike elektromagnetskih valova.

Time se ostvaruje značajno poboljšanje spektralne učinkovitosti, budući da se isti frekvencijski resurs koristi za dvije funkcije, dok istovremeno dolazi do smanjenja veličine, kompleksnosti i potrošnje energije sustava zahvaljujući dijeljenju hardverskih komponenti. Kao što je prikazano na Slici 5.5, u ISAC razlikujemo aktivno i pasivno senzorsko opažanje.



Slika 5.5 Scenariji primjene ISAC-a [69]

Aktivno senzorsko opažanje temelji se na emitiranju vlastitog signala od strane sustava radi detekcije i analize reflektiranih signala iz okoline, dok pasivno senzorsko opažanje koristi već postojeće (tuđe) komunikacijske signale u okruženju bez vlastite transmisije za prikupljanje informacija o ciljevima i okolini. U tom kontekstu, aktivni pristup omogućava veću kontrolu nad valnim oblikom i kvalitetom mjerenja, dok pasivni pristup smanjuje potrošnju energije i interferenciju jer ne zahtijeva dodatno emitiranje signala, ali je ovisan o dostupnosti i karakteristikama vanjskih izvora signala.

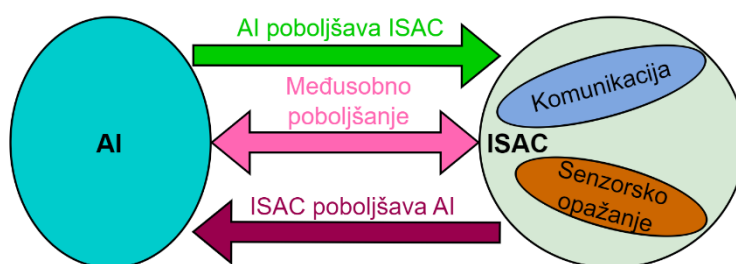
Dodatno, integracija osjetilnih i komunikacijskih funkcija doprinosi smanjenju kašnjenja i signalizacijskog opterećenja, jer se obje funkcije realiziraju unutar jedinstvenog upravljačkog i signalnog okvira, bez potrebe za razmjenom informacija između odvojenih sustava [67]. Osim toga, osjetilne funkcionalnosti mogu aktivno unaprijediti performanse komunikacijskog sustava, na primjer kroz preciznije tehnike usmjeravanja signala (engl. beamforming), efikasnije upravljanje kanalnim stanjem i smanjenje signalizacije [68]. S druge strane, komunikacijska infrastruktura omogućava distribuirano prikupljanje i razmjenu senzorskih podataka, čime se ostvaruje šira i detaljnija percepcija okruženja.

U ISAC sustavima, temeljni princip proizlazi iz činjenice da elektromagnetski (RF) signal može istovremeno služiti kao nosilac informacija i kao sredstvo za opažanje okoline, čime se ostvaruje njegova dualna funkcija u komunikacijskom i senzorskom domenu. S jedne strane, komunikacijska funkcija koristi signal za prijenos podataka između odašiljača i prijemnika, pri čemu se informacija kodira u amplitudi, fazi ili frekvenciji signala, a prijemnik rekonstruira sadržaj na osnovu primljenog vala. S druge strane, isti signal se može koristiti za senzorsko opažanje analizom reflektiranih, raspršenih i propagacijskih karakteristika elektromagnetskih valova u prostoru, što predstavlja osnovu radarskog principa rada. Konkretno, kada se signal emitira prema okolini, dio energije se reflektira od objekata (ciljeva) i vraća prema prijemniku, pri čemu analiza kašnjenja, frekvencijskog pomaka i prostorne distribucije reflektiranog signala omogućava ekstrakciju ključnih informacija o okruženju. Na taj način moguće je procijeniti udaljenost objekta na osnovu vremena propagacije signala, brzinu objekta korištenjem Dopplerovog pomaka frekvencije, te ugao dolaska signala primjenom više elementnih antenskih sistema i tehnika obrade signala [70]. Ovakva integracija komunikacijske i senzorske funkcije unutar istog RF signala zahtijeva pažljivo dizajnirane signalne strukture, budući da komunikacija teži nasumičnosti radi povećanja kapaciteta kanala, dok senzorsko opažanje zahtijeva određeni stupanj determinističnosti radi precizne detekcije i procjene parametara [67]. Upravo ova dualnost i potreba za kompromisom između komunikacijskih i senzorskih zahtjeva predstavlja jedan od ključnih izazova, ali i osnovnih principa dizajna ISAC sustava u 5G i 6G mrežama.

U kontekstu ISAC-a, tj. mobilnih mreža nove generacije, gNodeB nije više isključivo komunikacijski entitet, već se proširuje dodatnim mogućnostima opažanja okoline, koristeći iste RF lance za emitiranje i prijem signala, čime cijela komunikacijska infrastruktura poprima funkciju distribuiranog senzorskog sustava. Obrada podataka prikupljenih putem ISAC funkcionalnosti sve se više premješta prema rubu mreže, gdje se omogućava brža analiza i donošenje odluka u realnom vremenu, što je posebno važno za aplikacije koje zahtijevaju nisko kašnjenje i visoku preciznost opažanja. U tehnološkom smislu, implementacija ISAC arhitekture snažno se oslanja na napredne radio tehnologije, poput masivnih MIMO sustava, koji omogućavaju iskorištavanje prostorne dimenzije signala za simultano ostvarivanje komunikacijskih i senzorskih ciljeva kroz beamforming i prostornu razlučivost [71]. Dodatno, korištenje visokofrekvencijskih pojaseva, uključujući mmWave i THz spektar, osigurava široke frekvencijske opsege i visoku rezoluciju opažanja, što je ključno za preciznu lokalizaciju, mapiranje i rekonstrukciju okoline [68]. Arhitektura ISAC sustava također je kompatibilna s otvorenim i virtualiziranim mrežnim paradigmama, gdje se kroz integraciju funkcija i dijeljenje resursa omogućava fleksibilno raspoređivanje i orkestracija senzorskih i komunikacijskih

funkcionalnosti unutar mreže, što predstavlja osnovu za daljnju evoluciju prema softverski definiranim i inteligentnim mrežnim sustavima budućih generacija.

ISAC se u kontekstu naprednih 5G i budućih 6G mreža prirodno povezuje sa SON konceptom, AI i energetsom učinkovitošću kroz jedinstveni okvir autonomnog i kontekstno svjesnog upravljanja mrežom. Integracijom komunikacijskih i senzorskih funkcija, ISAC omogućava mreži da kontinuirano prikuplja informacije o okruženju, prometu i stanju resursa, čime se stvara bogata podatkovna osnova za AI algoritme koji se koriste za predikciju opterećenja, optimizaciju radio resursa i donošenje odluka u realnom vremenu. Ovakvi inteligentni mehanizmi direktno podržavaju SON funkcionalnosti (samo-optimizacija, samo-konfiguracija i samo-oporavak), jer omogućavaju autonomno prilagođavanje mrežnih parametara na osnovu stvarnih uvjeta u mreži, uključujući preciznije upravljanje interferencijom i raspodjelom kapaciteta. Interakcija između ISAC-a i umjetne inteligencije predstavlja dvosmjerni i međusobno ojačavajući odnos, u kojem svaka komponenta unapređuje funkcionalnosti druge, što je prikazano na Slici 5.6 kroz tri ključne perspektive. S jedne strane, primjena AI u ISAC sustavima omogućava interferenciju niskog kašnjenja i brzu adaptaciju modela na rubu mreže, pri čemu se koriste optimizirane tehnike poput kompresije neuronskih mreža, plitkih arhitektura i meta-učenja kako bi se postigla visoka učinkovitost uz smanjenu računalnu složenost. To u praksi znači da mrežni elementi, poput baznih postaja ili edge čvorova, mogu lokalno donositi odluke (npr. o usmjeravanju signala ili raspodjeli resursa) bez potrebe za slanjem podataka u centralni oblak, čime se smanjuje kašnjenje i opterećenje mreže.

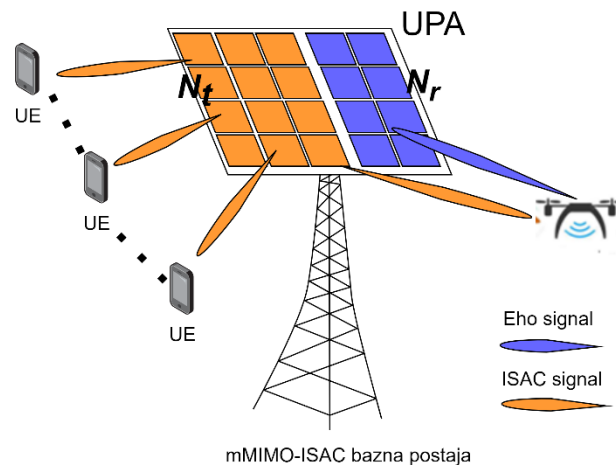


Slika 5.6 Interakcije između AI i ISAC [71]

S druge strane, ISAC omogućava unapređenje AI-a kroz pružanje sinkroniziranih i multimodalnih podataka dobivenih fuzijom različitih izvora (npr. RF signala, radarskih refleksija ili podataka o RF kanalu), čime se značajno poboljšava točnost inferencije i donošenja odluka u dinamičnim okruženjima. Za razliku od klasičnih sustava koji koriste ograničen broj senzora, ISAC sustavi nude bogatiji i vremenski usklađen prikaz okruženja, što omogućava preciznije predikcije, primjerice u mobilnim scenarijima ili pri upravljanju mrežnim resursima. U okviru međusobnog poboljšanja, AI se koristi za optimizaciju ključnih funkcija poput odabira valnog oblika, beamforminga i senzorskih strategija u realnom vremenu, dok ISAC istovremeno osigurava kontinuirani povrat informacija iz okruženja, čime se AI modeli mogu stalno poboljšavati i prilagođavati promjenjivim uvjetima. Ovakav zatvoreni krug (engl. feedback loop) omogućava mreži da „uči“ iz vlastitog rada i da postaje sve efikasnija kroz vrijeme, što predstavlja osnovu za razvoj autonomnih i samoučećih mreža. Ipak, implementacija ovakvih sustava suočava se s izazovima, poput potrebe za preciznom vremensko-frekvencijskom sinkronizacijom između distribuiranih čvorova, kao i ograničenjima stabilnosti AI algoritama u ne stacionarnim bežičnim okruženjima, gdje se uvjeti kanala i promet mogu brzo mijenjati [71].

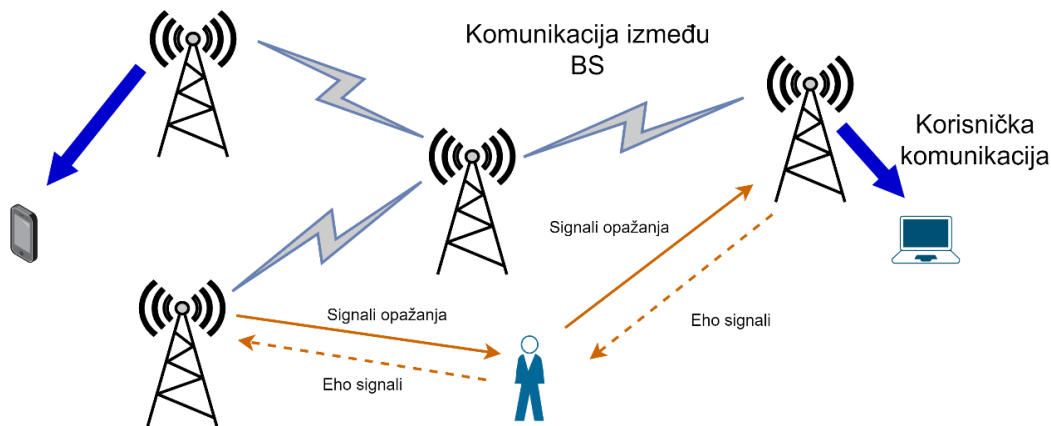
S aspekta energetske učinkovitosti, ISAC doprinosi smanjenju potrošnje energije kroz dijeljenje spektra, hardvera i signalnih resursa, čime se eliminira potreba za odvojenim komunikacijskim i senzorskim sustavima, što rezultira manjom ukupnom potrošnjom i većom

iskorištenošću infrastrukture. Energetska učinkovitost u ISAC sustavima predstavlja višedimenzionalni optimizacijski problem koji zahtijeva istovremeno razmatranje komunikacijskih i senzorskih funkcionalnosti, pri čemu se odustaje od njihovog tradicionalno odvojenog dizajna i uvodi integrirani pristup optimizaciji [72]. U tom kontekstu, ukupna EE ne zavisi isključivo od komunikacijskih performansi, poput spektralne učinkovitosti ili SINR-a, već i od preciznosti senzorskog opažanja, koja se kvantificira putem Cramér–Rao granica (engl. Cramér–Rao Bound - CRB) za procjenu parametara cilja. Zajednička infrastruktura, koja primjerice može biti realizirana tako da je zasnovana na antenama u rešetki (engl. Uniform Planar Array – UPA) i OFDM signalima (Slika 5.7), omogućava dijeljenje resursa između komunikacije i senzorskog opažanja, čime se otvara prostor za optimizaciju raspodjele snage i oblikovanja usmjerenog snopa bežičnog signala, u cilju smanjenja ukupne potrošnje energije. Izazov u takvom pristupu ogleda se u činjenici da povećanje komunikacijskih performansi može negativno utjecati na senzorsku preciznost, te obrnuto, što implicira postojanje fundamentalnog kompromisa između ova dva aspekta energetske učinkovitosti [73].



Slika 5.7 mMIMO ISAC sistem u okviru bazne postaje sa UPA predajnikom (N_t na je broj odašiljačkih antena, dok je N_r broj prijemnih antena) [72]

Dodatna dimenzija optimizacije energetske učinkovitosti uvodi se kroz vremensku komponentu rada sustava, odnosno optimizaciju trajanja aktivnih i neaktivnih perioda rada mrežnih elemenata. Ukupna potrošnja energije značajno je određena ne samo RF transmisijom, već i ne transmissionim komponentama poput obrade signala u osnovnom pojasu. Optimalna EE proizlazi iz kompromisa između tri faktora: komunikacijskog zahtjeva (minimalni protok), senzorskog zahtjeva (maksimalno dozvoljeni CRB za procjenu cilja) i ukupne potrošnje energije, pri čemu se problem formulira kao minimizacija energije uz ova ograničenja. Optimalna strategija podrazumijeva korištenje kraćih, ali energetske intenzivnijih transmisijskih intervala, čime se smanjuje ukupna ne transmisionalna potrošnja, posebno u scenarijima gdje dominira senzorska komponenta. U takvom okviru, energija se raspoređuje po nezavisnim kanalima ili pravcima prijenosa signala primjenom water-filling pristupa, pri čemu se najpovoljniji kanali koriste za istovremeno izvršavanje komunikacijskih i senzorskih funkcija, dok se preostali resursi mogu alocirati isključivo za zadatke senzorskog opažanja, čime se postiže efikasan balans između performansi i potrošnje energije [74]. Na razini mreže, energetska učinkovitost dodatno se unapređuje kroz koordiniranu saradnju više baznih postaja i inteligentno upravljanje raspoloživim resursima [3]. Kao što je prikazano na Slici 5.8, više baznih postaja može zajednički izvršavati senzorske zadatke, pri čemu se svaki zadatak dodjeljuje energetske najpovoljnijem čvoru ili grupi čvorova, čime se minimizira ukupna potrošnja energije na razini sustava.



Slika 5.8 ISAC s višestrukom suradnjom baznih postaja [75]

U tom kontekstu, posebno značajnu ulogu imaju DFRC (engl. dual-functional radar-communication) snopovi, koji omogućavaju istovremeno izvršavanje komunikacijskih i senzorskih funkcija korištenjem iste valne forme, čime se izbjegava dodatna transmisija i direktno smanjuje energetska potrošnja. Međutim, neka istraživanja pokazuju da nekontrolirana primjena višestruke suradnje baznih postaja može dovesti do suprotnog efekta, odnosno povećanja potrošnje energije, zbog čega se uvodi optimizacijski okvir koji zajednički razmatra alokaciju zadataka, raspoređivanje snopova bežičnih signala i kontrolu snage signala. Ovaj problem formulira se kao složen MINLP (engl. Mixed Integer Nonlinear Programming) optimizacijski problem, čije rješenje podrazumijeva selektivno aktiviranje skupova bežičnih linkova i pripadajućih snaga putem EE-CBS (engl. Energy Efficient Cooperative Beam Scheduling) algoritma, zasnovanog na konceptu MIS-power parova koji predstavljaju kombinaciju (parove) skupa aktivnih linkova/čvorova i njihovih pripadajućih nivoa snage. Time se izbjegava nepotrebna aktivacija mrežnih resursa i postiže značajno smanjenje ukupne potrošnje energije [75]. EE-CBS je optimizacijski algoritam koji bira koje bazne postaje će biti aktivne, koji snopovi će se koristiti i kojom snagom će raditi.

Integracijom navedenih pristupa jasno se pokazuje da se energetska učinkovitost u ISAC sustavima ne može postići izoliranom optimizacijom pojedinačnih komponenti, već zahtijeva holistički pristup koji obuhvaća zajednički dizajn oblikovanja i usmjerenja snopa bežičnih signala (engl. beamforming), adaptivnu raspodjelu snage i vremena rada baznih postaja, kao i koordinaciju na razini mreže. Takav integrirani pristup omogućava istovremeno zadovoljenje zahtjeva komunikacije i opažanja uz minimalnu potrošnju energije.

6. ZAKLJUČAK

U ovom radu provedena je analiza mogućnosti unapređenja energetske učinkovitosti mobilnih komunikacijskih mreža primjenom naprednih mehanizama upravljanja mrežnim resursima, s posebnim naglaskom na radio pristupni dio mreže, koji predstavlja dominantan izvor ukupne potrošnje energije mobilne mreže. Analizom evolucije mobilnih komunikacijskih sustava od ranih generacija do suvremenih 5G i nadolazećih B5G/6G arhitektura pokazano je da povećanje mrežnih kapaciteta, fleksibilnosti i kompleksnosti, neminovno dovodi do rasta energetske potrošnje, čime energetska učinkovitost postaje jedan od važnih kriterija u dizajnu i upravljanju budućim mobilnim mrežama.

U radu su detaljno razmotrene metrike energetske učinkovitosti koje omogućavaju kvantitativnu procjenu performansi sustava, pri čemu je naglašena važnost sagledavanja odnosa između prenesenog podatkovnog volumena, kvalitete usluge i utrošene energije. Pokazano je da optimizacija energetske učinkovitosti ne može biti zasnovana na pojedinačnim rješenjima, već zahtijeva integrirani pristup koji obuhvaća sve segmente mreže, uključujući RAN, transportnu i jezgrenu mrežu. Poseban naglasak stavljen je na ulogu upravljanja radio resursima, koje omogućava dinamičku prilagodbu mrežnih parametara stvarnim prometnim uvjetima, čime se smanjuje nepotrebna aktivacija resursa i ukupna potrošnja energije. Dodatno, implementacija režima mirovanja i dinamičke aktivacije mrežnih elemenata identificirana je kao jedan od ključnih mehanizama za ostvarivanje značajnih energetske ušteda, posebno u scenarijima s varijabilnim prometnim opterećenjem.

U kontekstu suvremenih mrežnih arhitektura, analizirana je primjena SDN i NFV paradigmi, koje omogućavaju softverizaciju mreže, fleksibilno upravljanje resursima i dinamičku alokaciju mrežnih funkcija. Ovakav pristup doprinosi povećanju skalabilnosti i operativne učinkovitosti, ali istovremeno otvara prostor za implementaciju naprednih mehanizama optimizacije potrošnje energije kroz centralizirano upravljanje i orkestraciju. Nadalje, u radu je istaknuta temeljna uloga umjetne inteligencije i autonomnih mrežnih koncepata u ostvarivanju energetske učinkovitosti sustava. Primjena AI metoda omogućava prediktivno upravljanje prometom, optimizaciju raspodjele resursa te automatizaciju mrežnih operacija kroz koncepte poput samoorganizirajućih mreža. Time se omogućava prelazak s reaktivnih na proaktivne i kontekstno uvjetovane strategije upravljanja, koje doprinose smanjenju potrošnje energije mobilne mreže uz očuvanje zahtijevane razine performansi.

Dodatno, integracija naprednih paradigmi poput ISAC-a ukazuje na smjer daljnjeg razvoja komunikacijskih sustava, gdje se komunikacijske i senzorske funkcije objedinjuju unutar jedinstvene infrastrukture. Ovakav pristup omogućava učinkovitije korištenje resursa, ali istovremeno uvodi nove izazove u pogledu optimizacije energetske učinkovitosti, što dodatno naglašava potrebu za inteligentnim i adaptivnim mehanizmima upravljanja. Zaključno, može se istaknuti da unapređenje energetske učinkovitosti mobilnih komunikacijskih mreža predstavlja kompleksan i multidisciplinarni problem koji zahtijeva sinergijsko djelovanje naprednih tehnologija, uključujući RRM, SDN/NFV, umjetnu inteligenciju i autonomne mrežne koncepte. Budući razvoj mreža prema B5G i 6G sustavima dodatno će intenzivirati ove zahtjeve, pri čemu će inteligentno upravljanje resursima, automatizacija i energetska osviještenost predstavljati temeljne komponente održivih i skalabilnih komunikacijskih sustava.

LITERATURA

- [1] M. Hegazy and T. Khalil, "Energy Consumption Estimation of Mobile Networks' Base Stations Due to Traffic Change," in *2023 5th Novel Intelligent and Leading Emerging Sciences Conference (NILES)*, Giza, Egypt: IEEE, Oct. 2023, pp. 126–129. doi: 10.1109/NILES59815.2023.10296755.
- [2] ITU-T, *Energy saving technologies and best practices for 5G radio access network (RAN) equipment*, L.1390, Aug. 2022.
- [3] J. Lorincz, A. Kukuruzović, and Z. Blažević, "A Comprehensive Overview of Network Slicing for Improving the Energy Efficiency of Fifth-Generation Networks," *Sensors*, vol. 24, no. 10, p. 3242, May 2024, doi: 10.3390/s24103242.
- [4] Statista, "Number of Internet of Things (IoT) connections worldwide from 2022 to 2023, with forecasts from 2024 to 2034," <https://www.statista.com/>. Accessed: Feb. 04, 2026. [Online]. Available: <https://www.statista.com/statistics/1183457/iot-connected-devices-worldwide/?srsltid=AfmBOooCWdgBVOB-m1orDE0zmz9GeKtFArMCIJwXZttbZl3CkdYh6fZ3>
- [5] Satyajit Sinha, "State of IoT 2025: Number of connected IoT devices growing 14% to 21.1 billion globally," [iot-analytics.com/](https://www.iot-analytics.com/). Accessed: Feb. 04, 2026. [Online]. Available: <https://www.iot-analytics.com/number-connected-iot-devices/>
- [6] Ericsson, "Ericsson Mobility Report," Ericsson, Nov. 2025. Accessed: Feb. 04, 2026. [Online]. Available: <https://www.ericsson.com/4aca6f/assets/local/reports-papers/mobility-report/documents/2025/ericsson-mobility-report-november-2025.pdf>
- [7] HUAWEI TECHNOLOGIES CO., LTD., "5G Power Whitepaper," HUAWEI TECHNOLOGIES CO., LTD., Feb. 2019. Accessed: Feb. 04, 2026. [Online]. Available: <https://carrier.huawei.com/~media/CNBG/Downloads/Spotlight/5g/5G-Power-White-Paper-en.pdf>
- [8] O. Shurdi, L. Ruci, A. Biberaj, and G. Mesi, "5G Energy Efficiency Overview," *Eur. Sci. J. ESJ*, vol. 17, no. 3, p. 315, Jan. 2021, doi: 10.19044/esj.2021.v17n3p315.
- [9] A. Fellenbaum, H. Taylor, and M. Creaner, "THE IMPORTANCE OF ENVIRONMENTAL SUSTAINABILITY IN TELECOM SERVICE PROVIDERS' STRATEGY," World Broadband Association (WBBA), Sep. 2022. Accessed: Apr. 02, 2026. [Online]. Available: <https://worldbroadbandassociation.com/wp-content/uploads/2022/09/The-Importance-of-Environmental-Sustainability-in-Telecom-Service-Providers-Strategy-World-Broadband-Association-White-Paper.pdf>
- [10] H. P. Phyu, D. Naboulsi, R. Stanica, and G. Poitau, "Towards Energy Efficiency in RAN Network Slicing," in *2023 IEEE 48th Conference on Local Computer Networks (LCN)*, Daytona Beach, FL, USA: IEEE, Oct. 2023, pp. 1–9. doi: 10.1109/LCN58197.2023.10223377.
- [11] "Sustainable telecommunications: the role of telecoms in the energy transition," www.equans.com. Accessed: Feb. 04, 2026. [Online]. Available: <https://www.equans.com/news/sustainable-telecommunications-role-telecoms-energy-transition>
- [12] S. Ansari, "Network Energy Efficiency Phase 2," NGMN Alliance, Oct. 2023. Accessed: Mar. 04, 2026. [Online]. Available: https://www.ngmn.org/wp-content/uploads/NGMN_Network_Energy_Efficiency_Phase2.pdf
- [13] K. Muppavaram, S. Govathoti, D. Kamidi, and B. T., "Exploring the Generations: A Comparative Study of Mobile Technology from 1G to 5G," *Int. J. Electron. Commun. Eng.*, vol. 10, no. 7, pp. 54–62, Jul. 2023, doi: 10.14445/23488549/IJECE-V10I7P106.
- [14] T. Mshvidobadze, "Evolution mobile wireless communication and LTE networks," in *2012 6th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT)*, Tbilisi, Georgia: IEEE, Oct. 2012, pp. 1–7. doi: 10.1109/ICAICT.2012.6398495.
- [15] A. Sufyan, K. B. Khan, O. A. Khashan, T. Mir, and U. Mir, "From 5G to beyond 5G: A Comprehensive Survey of Wireless Network Evolution, Challenges, and Promising Technologies," *Electronics*, vol. 12, no. 10, p. 2200, May 2023, doi: 10.3390/electronics12102200.

- [16] A. Dogra, R. K. Jha, and S. Jain, "A Survey on Beyond 5G Network With the Advent of 6G: Architecture and Emerging Technologies," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 67512–67547, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3031234.
- [17] M. Harvanek, J. Bolcek, J. Kufa, L. Polak, M. Simka, and R. Marsalek, "Survey on 5G Physical Layer Security Threats and Countermeasures," *Sensors*, vol. 24, no. 17, p. 5523, Aug. 2024, doi: 10.3390/s24175523.
- [18] J. Gieske, "eNodeB vs. gNodeB: A Comparative Guide Between Two Technologies," nybsys.com. Accessed: Sep. 04, 2026. [Online]. Available: <https://nybsys.com/enodeb-vs-gnodeb/>
- [19] A. Sultan, "5G System Overview," <https://www.3gpp.org>. Accessed: Sep. 04, 2026. [Online]. Available: <https://www.3gpp.org/technologies/5g-system-overview>
- [20] N. Omheni, H. Koubaa, and F. Zarai, "Artificial Intelligence for 5G and 6G Networks: A Taxonomy-Based Survey of Applications, Trends, and Challenges," *Technologies*, vol. 13, no. 12, p. 559, Dec. 2025, doi: 10.3390/technologies13120559.
- [21] M. Polese, L. Bonati, S. D'Oro, S. Basagni, and T. Melodia, "Understanding O-RAN: Architecture, Interfaces, Algorithms, Security, and Research Challenges," *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, vol. 25, no. 2, pp. 1376–1411, 2023, doi: 10.1109/COMST.2023.3239220.
- [22] J. Lorincz, A. Kukuruzović, and D. Begušić, "Mobile Network Softwarization: Technological Foundations and Impact on Improving Network Energy Efficiency," *Sensors*, vol. 26, no. 2, p. 503, Jan. 2026, doi: 10.3390/s26020503.
- [23] "Beyond-5G-White-Paper-Supplementary-Volume-E2E-Architecture." X Mobile promotion forum, Mar. 07, 2024. Accessed: Sep. 04, 2026. [Online]. Available: <https://xgmf.jp/wp-content/uploads/2024/12/Beyond-5G-White-Paper-Supplementary-Volume-E2E-Architecture.pdf>
- [24] M. K. Bahare *et al.*, "The 6G Architecture Landscape - European perspective," Feb. 2023, doi: 10.5281/ZENODO.7313231.
- [25] M. Moussaoui, E. Bertin, and N. Crespi, "5G shortcomings and Beyond-5G/6G requirements," in *2022 1st International Conference on 6G Networking (6GNet)*, Paris, France: IEEE, Jul. 2022, pp. 1–8. doi: 10.1109/6GNet54646.2022.9830439.
- [26] S. Prasad Tera, R. Chinthaginjala, G. Pau, and T. Hoon Kim, "Toward 6G: An Overview of the Next Generation of Intelligent Network Connectivity," *IEEE Access*, vol. 13, pp. 925–961, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3523327.
- [27] *Energy efficiency of 5G*, Management and orchestration TS 28.310, Dec. 2025. Accessed: Apr. 13, 2026. [Online]. Available: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3550>
- [28] A. Jagueneau, "Mobile Net Zero 2024 State of the Industry on Climate Action," GSMA, 2024. Accessed: Apr. 13, 2026. [Online]. Available: <https://www.gsma.com/solutions-and-impact/connectivity-for-good/external-affairs/wp-content/uploads/2024/02/Mobile-Net-Zero-2024-State-of-the-Industry-on-Climate-Action.pdf>
- [29] G. Kamiya, "Mobile Net Zero 2025 State of the Industry on Climate Action," GSMA, Jun. 2025. Accessed: Apr. 13, 2026. [Online]. Available: https://www.gsma.com/solutions-and-impact/connectivity-for-good/external-affairs/wp-content/uploads/2025/07/The_GSMA-Mobile-Net-Zero-2025-State-of-the-Industry-on-Climate-Action.pdf
- [30] *Assessment of mobile network energy efficiency*, ES 203 228, Apr. 2022. Accessed: Apr. 13, 2026. [Online]. Available: https://www.etsi.org/deliver/etsi_es/203200_203299/203228/01.04.01_60/es_203228v010401p.pdf
- [31] *5G end to end Key Performance Indicators (KPI)*, Mar. 2026. Accessed: Apr. 14, 2026. [Online]. Available: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3415>

- [32] *Energy efficiency metrics and measurement methods for telecommunication equipment*, Recommendation ITU-T L.1310. Accessed: Apr. 17, 2026. [Online]. Available: <https://www.itu.int/epublications/es/publication/itu-t-l-1310-2024-09-energy-efficiency-metrics-and-measurement-methods-for-telecommunication-equipment>
- [33] F. D. Calabrese, L. Wang, E. Ghadimi, G. Peters, L. Hanzo, and P. Soldati, "Learning Radio Resource Management in RANs: Framework, Opportunities, and Challenges," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 56, no. 9, pp. 138–145, Sep. 2018, doi: 10.1109/MCOM.2018.1701031.
- [34] Z. Wei, Y. Cai, D. W. K. Ng, and J. Yuan, "Energy-Efficient Radio Resource Management," in *Wiley 5G Ref*, 1st ed., R. Tafazolli, C. Wang, and P. Chatzimisios, Eds., Wiley, 2019, pp. 1–23. doi: 10.1002/9781119471509.w5GRef072.
- [35] S. Manap, K. Dimyati, M. N. Hindia, M. S. Abu Talip, and R. Tafazolli, "Survey of Radio Resource Management in 5G Heterogeneous Networks," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 131202–131223, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3002252.
- [36] N. R. Netshikweta and M. Sumbwanyambe, "Power Control Techniques for Interference Management—A Systematic Review," *Telecom*, vol. 6, no. 1, p. 2, Dec. 2024, doi: 10.3390/telecom6010002.
- [37] G. Miao, N. Himayat, G. Y. Li, A. T. Koc, and S. Talwar, "Interference-Aware Energy-Efficient Power Optimization," in *2009 IEEE International Conference on Communications*, Dresden, Germany: IEEE, Jun. 2009, pp. 1–5. doi: 10.1109/ICC.2009.5199096.
- [38] T. Akhtar, C. Tselios, and I. Politis, "Radio resource management: approaches and implementations from 4G to 5G and beyond," *Wirel. Netw.*, vol. 27, no. 1, pp. 693–734, Jan. 2021, doi: 10.1007/s11276-020-02479-w.
- [39] A. M. Jaradat, M. Alayed, and H. Arslan, "A Survey of Radio Resource Scheduling for 6G and Future Wireless Networks," *IEEE Open J. Commun. Soc.*, vol. 6, pp. 10191–10218, 2025, doi: 10.1109/OJCOMS.2025.3640408.
- [40] B. Saoud, I. Shaya, M. A. Alnakhli, and H. Mohamad, "Mobility and Handover Management in 5G/6G Networks: Challenges, Innovations, and Sustainable Solutions," *Technologies*, vol. 13, no. 8, p. 352, Aug. 2025, doi: 10.3390/technologies13080352.
- [41] Md. S. Islam and S. A. H. Chowdhury, "Mobility Management in Next Generation Wireless Networks," *Am. J. Netw. Commun.*, vol. 13, no. 1, pp. 75–83, Jun. 2024, doi: 10.11648/j.ajnc.20241301.16.
- [42] H. Jouini, "Radio Resource Management in LTE Networks : Load Balancing in Heterogeneous Cellular Networks," HAL open science, 2018. Accessed: Apr. 20, 2026. [Online]. Available: <https://theses.hal.science/tel-01878355/file/PhDHanaJouini.pdf>
- [43] M. H. Kassem, "Radio resource management for energy efficient cellular networks with intelligent reflecting surfaces," HAL open science, 2026. Accessed: Apr. 20, 2026. [Online]. Available: <https://theses.hal.science/tel-05578794/document>
- [44] R. Tan, Y. Shi, Y. Fan, W. Zhu, and T. Wu, "Energy Saving Technologies and Best Practices for 5G Radio Access Network," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 51747–51756, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3174089.
- [45] B. G. Assefa and Ö. Özkasap, "A survey of energy efficiency in SDN: Software-based methods and optimization models," *J. Netw. Comput. Appl.*, vol. 137, pp. 127–143, Jul. 2019, doi: 10.1016/j.jnca.2019.04.001.
- [46] S. Rout, K. S. Sahoo, S. S. Patra, B. Sahoo, and D. Puthal, "Energy Efficiency in Software Defined Networking: A Survey," *SN Comput. Sci.*, vol. 2, no. 4, p. 308, Jul. 2021, doi: 10.1007/s42979-021-00659-9.
- [47] A. Mughees, M. Tahir, M. A. Sheikh, and A. Ahad, "Towards Energy Efficient 5G Networks Using Machine Learning: Taxonomy, Research Challenges, and Future Research Directions," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 187498–187522, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3029903.
- [48] R. Singh, L. M. P. Larsen, E. Ollora Zaballa, M. S. Berger, C. Kloch, and L. Dittmann, "Enabling Green Cellular Networks: A Review and Proposal Leveraging Software-Defined Networking,

- Network Function Virtualization, and Cloud-Radio Access Network,” *Future Internet*, vol. 17, no. 4, p. 161, Apr. 2025, doi: 10.3390/fi17040161.
- [49] L. M. Moreira Zorello, M. G. Torres Vieira, R. A. Girani Tejos, M. A. Torres Rojas, C. Meirosu, and T. C. Melo De Brito Carvalho, “Improving Energy Efficiency in NFV Clouds with Machine Learning,” in *2018 IEEE 11th International Conference on Cloud Computing (CLOUD)*, San Francisco, CA, USA: IEEE, Jul. 2018, pp. 710–717. doi: 10.1109/CLOUD.2018.00097.
- [50] ETSI, *Network Functions Virtualisation (NFV) Release 5; Evolution and Ecosystem; Report on energy efficiency aspects for NFV*, ETSI GR NFV-EVE 021, Sep. 2023. Accessed: Apr. 23, 2026. [Online]. Available: https://www.etsi.org/deliver/etsi_gr/NFV-EVE/001_099/021/05.01.01_60/gr_nfv-eve021v050101p.pdf
- [51] W. Guan, X. Wen, L. Wang, Z. Lu, and Y. Shen, “A Service-Oriented Deployment Policy of End-to-End Network Slicing Based on Complex Network Theory,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 19691–19701, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2822398.
- [52] C. Ranaweera *et al.*, “Design and deployment of optical x-haul for 5G, 6G, and beyond: progress and challenges [Invited],” *J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 15, no. 9, p. D56, Sep. 2023, doi: 10.1364/JOCN.492334.
- [53] A. Fayad, T. Cinkler, and J. Rak, “5G/6G optical fronthaul modeling: cost and energy consumption assessment,” *J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 15, no. 9, p. D33, Sep. 2023, doi: 10.1364/JOCN.486547.
- [54] G. Kramer and G. Pesavento, “Ethernet passive optical network (EPON): building a next-generation optical access network,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 40, no. 2, pp. 66–73, Feb. 2002, doi: 10.1109/35.983910.
- [55] M. A. Khalighi and M. Uysal, “Survey on Free Space Optical Communication: A Communication Theory Perspective,” *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, vol. 16, no. 4, pp. 2231–2258, 2014, doi: 10.1109/COMST.2014.2329501.
- [56] *5G RAN CU - DU Network Architecture, Transport Options and Dimensioning*, Apr. 12, 2019. [Online]. Available: https://www.ngmn.org/wp-content/uploads/Publications/2019/190412_NGMN_RANFSX_D2a_v1.0.pdf
- [57] A. Checko *et al.*, “Cloud RAN for Mobile Networks—A Technology Overview,” *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, vol. 17, no. 1, pp. 405–426, 2015, doi: 10.1109/COMST.2014.2355255.
- [58] Ericsson, “Packet fronthaul – design choices towards versatile RAN deployments,” Ericsson, Ericsson White Paper, Jan. 2026. Accessed: Apr. 27, 2026. [Online]. Available: <https://www.ericsson.com/48dc39/assets/local/reports-papers/white-papers/2026/packet-fronthaul.pdf>
- [59] G. Otero Perez, D. Larrabeiti Lopez, and J. A. Hernandez, “5G New Radio Fronthaul Network Design for eCPRI-IEEE 802.1CM and Extreme Latency Percentiles,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 82218–82230, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2923020.
- [60] N. Lassoued and N. Boujnah, “A Comprehensive Review of Energy Efficiency in 5G Networks: Past Strategies, Present Advances, and Future Research Directions,” *Computers*, vol. 15, no. 1, p. 50, Jan. 2026, doi: 10.3390/computers15010050.
- [61] Z. A. Bhat, I. B. Sofi, and I. S. Masoodi, “Smart Energy-Saving Solutions Based on Artificial Intelligence and Other Emerging Technologies for 5G Wireless and Beyond Networks Communications,” in *Intelligent Signal Processing and RF Energy Harvesting for State of art 5G and B5G Networks*, J. A. Sheikh, T. Khan, and B. K. Kanaujia, Eds., in Energy Systems in Electrical Engineering. , Singapore: Springer Nature Singapore, 2024, pp. 77–95. doi: 10.1007/978-981-99-8771-9_5.
- [62] TU-T Focus Group on Environmental Efficiency for, “Smart Energy Saving of 5G Base Station: Based on AI and other emerging technologies to forecast and optimize the management of 5G wireless network energy consumption,” ITU-T, FG-AI4EE, Mar. 2021. Accessed: Apr. 27, 2026. [Online]. Available: https://www.itu.int/en/ITU-T/focusgroups/ai4ee/Documents/TR-D.WG3_02-

- Smart%20Energy%20Saving%20of%205G%20Base%20Station%20Based%20on%20AI%20and%20Other%20emerging%20technologies_Tan.pdf
- [63] A. G. Papidas and G. C. Polyzos, "Self-Organizing Networks for 5G and Beyond: A View from the Top," *Future Internet*, vol. 14, no. 3, p. 95, Mar. 2022, doi: 10.3390/fi14030095.
 - [64] B. Maaz, K. Khawam, S. Tohme, J. Nasreddine, and S. Lahoud, "Achieving power and energy efficiency in self-organizing networks," in *2017 14th IEEE Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC)*, Las Vegas, NV, USA: IEEE, Jan. 2017, pp. 741–747. doi: 10.1109/CCNC.2017.7983227.
 - [65] J. Korhonen, "Self-Organising Networks (SON)," <https://www.3gpp.org/technologies/son>. Accessed: Apr. 28, 2026. [Online]. Available: <https://www.3gpp.org/technologies/son>
 - [66] TELUS and Huawei, "Next Generation SON for 5G." TELUS and Huawei. Accessed: Apr. 28, 2026. [Online]. Available: <https://www-file.huawei.com/admin/asset/v1/pro/view/905fcc5eda0f4c019f41e31d6386e243.pdf>
 - [67] Y. Cui, F. Liu, C. Masouros, J. Xu, T. X. Han, and Y. C. Eldar, "Integrated Sensing and Communications: Background and Applications," in *Integrated Sensing and Communications*, F. Liu, C. Masouros, and Y. C. Eldar, Eds., Singapore: Springer Nature Singapore, 2023, pp. 3–21. doi: 10.1007/978-981-99-2501-8_1.
 - [68] D. K. Pin Tan *et al.*, "Integrated Sensing and Communication in 6G: Motivations, Use Cases, Requirements, Challenges and Future Directions," in *2021 1st IEEE International Online Symposium on Joint Communications & Sensing (JC&S)*, Dresden, Germany: IEEE, Feb. 2021, pp. 1–6. doi: 10.1109/JCS52304.2021.9376324.
 - [69] Z. Wei *et al.*, "Integrated Sensing and Communication Signals Toward 5G-A and 6G: A Survey," *IEEE Internet Things J.*, vol. 10, no. 13, pp. 11068–11092, Jul. 2023, doi: 10.1109/JIOT.2023.3235618.
 - [70] A. Bayesteh *et al.*, "Integrated Sensing and Communication (ISAC) — From Concept to Practice." Huawei, Sep. 2022. Accessed: Apr. 05, 2026. [Online]. Available: <https://www-file.huawei.com/-/media/corp2020/pdf/publications/huawei-research/issue2/isac-en.pdf?la=en>
 - [71] D. Zhang *et al.*, "Integrated Sensing and Communications Over the Years: An Evolution Perspective," *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, vol. 28, pp. 5014–5048, 2026, doi: 10.1109/COMST.2026.3655674.
 - [72] H. T. Nguyen *et al.*, "Energy Efficiency for Massive MIMO Integrated Sensing and Communication Systems," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 44, pp. 165–180, 2026, doi: 10.1109/JSAC.2025.3610821.
 - [73] J. Zou, S. Sun, C. Masouros, Y. Cui, Y.-F. Liu, and D. W. K. Ng, "Energy-Efficient Beamforming Design for Integrated Sensing and Communications Systems," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 72, no. 6, pp. 3766–3782, Jun. 2024, doi: 10.1109/TCOMM.2024.3369696.
 - [74] G. Wu, Y. Fang, J. Xu, Z. Feng, and S. Cui, "Energy-Efficient MIMO Integrated Sensing and Communications With On–Off Nontransmission Power," *IEEE Internet Things J.*, vol. 11, no. 7, pp. 12177–12191, Apr. 2024, doi: 10.1109/JIOT.2023.3336339.
 - [75] Y. Cui, H. Ding, Y. Ma, X. Li, H. Zhang, and Y. Fang, "Energy-Efficient Integrated Sensing and Communication in Collaborative Millimeter Wave Networks," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 24, no. 3, pp. 2341–2357, Mar. 2025, doi: 10.1109/TWC.2024.3520302.

POPIS OZNAKA I KRATICA

3rd Generation Partnership Project	3GPP
5G Core	5GC
Active Antenna System	AAS
Advanced Mobile Phone System	AMPS
Artificial Intelligence	AI
Artificial Intelligence	AI
Base Band Unit	BBU
Beyond 5G	B5G
Carbon Dioxide	CO ₂
Cell Range Expansion	CRE
Central Unit	CU
Centralized RAN	C RAN
Centralized SON	C SON
Code Division Multiple Access	CDMA
Common Public Radio Interface	CPRI
Coordinated Multi Point	CoMP
Cramér Rao Bound	CRB
Data Volume	DV
Deep Learning	RL
Discontinuous Transmission – DTX	
Distributed SON	D SON
Distributed Unit	DU
Domain Name System	DNS
Downlink	DL
Dual functional radar communication	DFRC
Dynamic Voltage and Frequency Scaling	DVFS
E2 Application Protocol	E2AP
E2 Service Model	E2SM
End to End	E2E
Energy Consumed	EC
Energy Efficiency	EE
Energy Efficiency Key Performance Indicators	EE KPI
Energy Efficient Cooperative Beam Scheduling	EE CBS
enhanced CPRI	eCPRI
Enhanced Data rates for GSM Evolution	EDGE
enhanced Mobile Broadband	eMBB
European Telecommunications Standards Institute	ETSI
Evolved Node B	eNodeB
Evolved Packet Core	EPC
Forward Error Correction	FEC

Free Space Optics	FSO
Frequency Division Multiple Access	FDMA
General Packet Radio Service	GPRS
Global System for Mobile Communications	GSM
In phase in Quadrature	IQ
Integrated Sensing and Communications	ISAC
Intelligent Reflecting Surfaces	IRS
International Organization for Standardization/ Open Systems Interconnection	ISO/OSI
International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector	ITU T
Internet of Things	IoT
Internet Protocol	IP
International Telecommunication Union	ITU
Long Term Evolution	LTE
Machine Learning	ML
Machine to Machine	M2M
massive Machine Type Communications	mMTC
Massive MIMO	mMIMO
Mixed Integer Nonlinear Programming	MINLP
Mobility Load Balancing	MLB
Multiple Input Multiple Output	MIMO
Network Function Virtualization	NFV
Network Functions Virtualization Infrastructure	NFVI
Network Slicing	NS
New Radio	NR
next Generation Node B	gNodeB
Next Generation SON	NG SON
NonStandalone	NSA
Nordic Mobile Telephone	NMT
O CU Control Plane	O CU CP
O CU User Plane	O CU UP
Open Central Unit	O CU
Open Distributed Unit	O DU
Open Radio Unit	O RU
Open RAN	O RAN
Operational Expenditure	OPEX
Operations, Administration and Maintenance	OAM
Orthogonal Frequency Division Multiple Access	OFDMA
Passive Optical Network	PON
Physical Network Function	PNF
Point to Multipoint	PMP
Point to Point	P2P

Power Amplifier	PA
Quality of Service	QoS
Radio Access Network	RAN
Radio Frequency	RF
Radio Resource Management	RRM
Radio over Fiber	RoF
RAN Intelligent Controller	RIC
Reinforcement Learning	RL
Remote Radio Head/Unit	RRH/U
Self organizing networks	SON
Short Message Service	SMS
Signal to Interference plus Noise Ratio	SINR
Software Defined Network	SDN
Standalone	SA
Stream Control Transmission Protocol	SCTP
Subscriber Identity Module	SIM
Telecommunications Energy Efficiency Ratio	TEER
Ternary Content Addressable Memory	TCAM
Time and Wavelength Division Multiplexing PON	TWDM PON
Time Division Multiple Access	TDMA
Time Division Multiplexing	TDM
Total Access Communication System	TACS
Ultra Reliable Low Latency Communications	URLLC
Uniform Planar Array	UPA
Universal Mobile Telecommunications System	UMTS
Uplink	UL
User Plane Function	UPF
Virtualized Network Function	VNF
Virtualized Network Function Components	VNFC
Wavelength Division Multiplexing PON	WDM PON
Wideband CDMA	WCDMA
Virtualized Network Function Components	VNFC
Wavelength Division Multiplexing PON	WDM PON
Wideband CDMA	WCDMA

SAŽETAK

Kontinuirani rast količine podatkovnog prometa, porast broja povezanih uređaja te sve veći zahtjevi suvremenih komunikacijskih usluga za performansama doveli su do značajnog povećanja potrošnje energije u mobilnim komunikacijskim mrežama. U tom kontekstu, radio pristupni dio mreže (engl. Radio Access Network - RAN) identificiran je kao dominantan izvor ukupne potrošnje energije, čime unapređenje energetske učinkovitosti postaje jedan od temeljnih izazova u projektiranju, implementaciji i upravljanju suvremenim i budućim komunikacijskim sustavima. U radu se provodi analiza mogućnosti unapređenja energetske učinkovitosti mobilnih komunikacijskih mreža primjenom naprednih tehnika upravljanja mrežnim resursima, s posebnim naglaskom na RAN segment. Analiza započinje pregledom evolucije mobilnih mreža, od ranih generacija do 5G (engl. 5th generation) sustava, pri čemu se ističe rastuća arhitekturna složenost i njezin izravan utjecaj na potrošnju energije. Posebna pažnja posvećena je suvremenim arhitekturnim konceptima, uključujući centralizirane (engl. Centralized RAN – C-RAN) i otvorene (engl. Open RAN – O-RAN) RAN arhitekture, kao i funkcionalnoj podjeli između distribuiranih i centraliziranih jedinica. Nadalje, rad sustavno razmatra bitne metrike energetske učinkovitosti definirane od strane relevantnih standardizacijskih tijela, koje omogućuju kvantitativnu procjenu performansi mreže u odnosu na potrošnju energije. Ove metrike obuhvaćaju ne samo količinu prenesenih podataka, već i aspekte pokrivenosti, kašnjenje i kvalitete usluge, čime se osigurava višedimenzionalni pristup evaluaciji energetske učinkovitosti. Značajan dio rada posvećen je analizi tehnika optimizacije potrošnje energije, uključujući upravljanje radio resursima (engl. Radio Resource Management – RRM), dinamičku kontrolu snage, upravljanje interferencijom te adaptivne mehanizme raspoređivanja. Također, implementacija režima mirovanja i dinamičke aktivacije odnosno deaktivacije mrežnih elemenata prepoznata je kao temeljni pristup smanjenju potrošnje energije, osobito u uvjetima promjenjivog prometnog opterećenja. Dodatno, razmatra se uloga softverizacije mreže kroz primjenu softverski definiranih mreža (engl. Software Defined Network – SDN) i virtualizacije mrežnih funkcija (engl. Network Function Virtualization – NFV), koje omogućuju fleksibilnu i energetske osviještenu alokaciju mrežnih resursa. Integracija umjetne inteligencije dodatno se analizira kao ključni omogućivač budućih energetske učinkovitih mreža. Pristupi potpomognuti umjetnom inteligencijom omogućuju prediktivnu analizu prometa, automatizirano donošenje odluka te adaptivnu optimizaciju mrežnih resursa, čime se omogućava prijelaz s reaktivnih na proaktivne strategije upravljanja energijom. U tom kontekstu razmatraju se i koncepti samo organizirajućih mreža kao temeljne komponente budućih inteligentnih komunikacijskih sustava. Na kraju, razmatraju se i napredne paradigme poput integracije komunikacije i senzorskog opažanja, koje omogućuju učinkovitije korištenje resursa objedinjavanjem komunikacijskih i senzorskih funkcionalnosti unutar jedinstvenog sustava. Rezultati rada ukazuju na to da postizanje visoke energetske učinkovitosti u budućim mobilnim mrežama zahtijeva holistički i multidisciplinarni pristup koji objedinjuje napredno upravljanje resursima, softverizaciju mreže i automatizaciju temeljenu na umjetnoj inteligenciji, čime se postavljaju temelji za održive i skalabilne B5G (engl. Beyond 5G) i 6G (engl. 6th generation) sustave.