

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

**DOKTORSKI STUDIJ ELEKTROTEHNIKE I
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA**

KVALIFIKACIJSKI DOKTORSKI ISPIT

**Poboljšanje energetske učinkovitosti
bežičnih komunikacijskih mreža**

Zvonimir Klarin

Split, listopad 2024.

SADRŽAJ

1. UVOD	1
1.1. Motivacija	3
1.1.1. Ekološka svijest i održivost.....	4
1.1.2. Operativni troškovi	4
1.1.3. Tehnološki napredak	4
1.1.4. Regulatorni zahtjevi	5
2. EVOLUCIJA MOBILNIH MREŽA	6
2.1. 5G mobilna mreža	7
2.1.1. Rastući podatkovni promet i njegove implikacije.....	8
2.1.2. Ključni scenariji upotrebe	10
2.1.3. Heterogena arhitektura i frekvencijski spektar 5G mreža.....	11
2.1.4. Energetska učinkovitost 5G mreža.....	12
2.2. Sljedeća evolucijska faza 5G mreža.....	13
2.2.1. Tehnološke inovacije u okviru 5G Advanced paradigme	14
2.2.2. Prijelaz prema 6G mrežama	16
2.3. Buduća 6G tehnologija.....	17
2.3.1. Ključne značajke i tehničke inovacije buduće 6G tehnologije	17
2.3.2. Scenariji primjene i tehnološki izazovi budućih 6G mreža	19
2.3.3. Napredna NOMA tehnika višestrukog pristupa	19
2.3.4. Energetska učinkovitost i održivost budućih 6G mreža.....	22
3. ENERGETSKA UČINKOVITOST MOBILNIH MREŽA	25
3.1. Definicija energetske učinkovitosti.....	26
3.2. Metrike energetske učinkovitosti RAN dijela mobilne reže	27
3.3. Standardizirane metrike energetske učinkovitosti	28
3.3.1. Segmentacija mreže za procjenu energetske učinkovitosti.....	28
3.3.2. Parametri za ocjenu energetske učinkovitosti	29
3.3.3. Procjena energetske učinkovitosti mobilnih mreža.....	31
3.4. Ključni čimbenici energetske učinkovitosti	32
3.4.1. Spektralna učinkovitost.....	33

3.4.2. Varijacije prometa mobilnih mreža	34
3.4.3. Kašnjenje.....	35
3.4.4. Interferencija	35
3.4.5. Topologija mreže.....	36
3.5. Energetska učinkovitost baznih postaja	36
3.6. Utjecaj SDN tehnologije na poboljšanje energetske učinkovitosti	39
3.7. Optimizacija energetske učinkovitosti primjenom tehnologije mrežnog rezanja	41
4. OPTIMIZACIJA POTROŠNJE ENERGIJE.....	43
4.1. Optimizacija energetske učinkovitosti komponenata baznih postaja.....	44
4.1.1. Radiofrekvencijska pojačala	45
4.1.2. Jedinice za obradu signala.....	46
4.2. Ušteda energije korištenjem tehnika mirovanja	47
4.2.1. Optimizacija načina mirovanja upotrebom umjetne inteligencije	51
4.3. Optimizacija radio prijenosa i resursa.....	52
4.3.1. Optimizacija odašiljačke snage	53
4.3.2. Upotreba MIMO tehnologije	54
4.3.3. Kognitivni radio i kooperativne tehnike za raspodjelu resursa.....	56
4.4. Optimizacija potrošnje energije mobilne mreže korištenjem malih ćelija.....	58
4.5. Implementacija obnovljivih izvora energije.....	60
4.5.1. Tehnologije prikupljanja i pohrane energije	60
4.5.2. Primjena u 5G i IoT mrežama kroz inovativne arhitekture.....	61
4.5.3. Planiranje kapaciteta solarnih i vjetroelektrana	62
4.6. Primjena NOMA tehnike za poboljšanje energetske učinkovitosti mobilnih mreža ...	63
4.7. Primjena tehnologije mrežnog rezanja na poboljšanje energetske učinkovitosti mobilnih mreža	66
5. BUDUĆI IZAZOVI I PRILIKE.....	69
6. ZAKLJUČAK	73
LITERATURA	75
POPIS OZNAKA I KRATICA	91
SAŽETAK.....	95

Popis slika

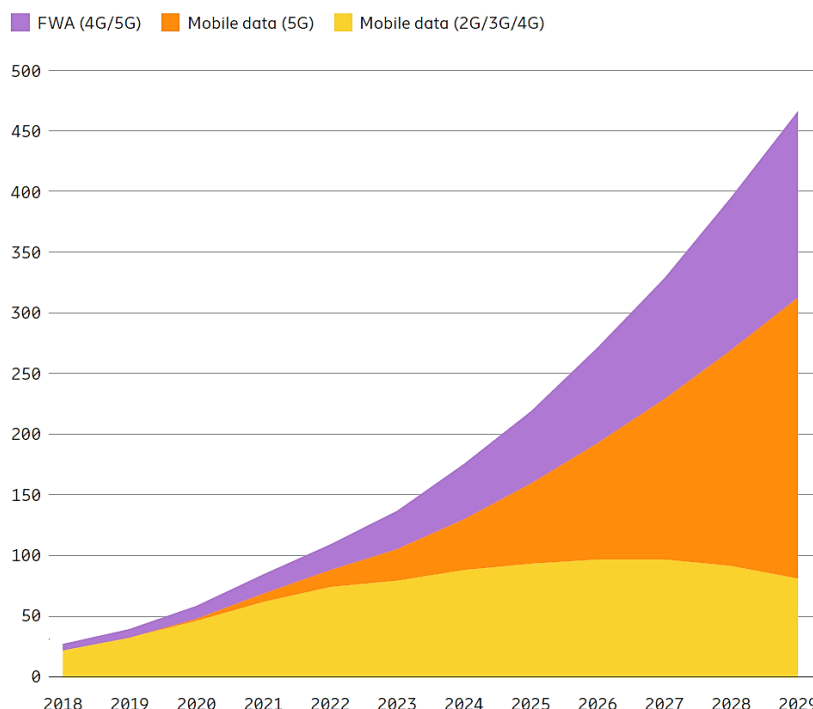
Slika 1.1. Globalni podatkovni promet mobilne mreže (EB mjesečno)	1
Slika 2.1. Usporedba 5G nesamostalne (NSA) i 5G samostalne (SA) mrežne arhitekture	7
Slika 2.2. Mobilne pretplate prema tehnologiji (milijarde)	9
Slika 2.3. Tri glavna scenarija upotrebe 5G mobilnih mreža.....	9
Slika 2.4. 5G HetNet mrežna arhitektura.....	10
Slika 2.5. Raspodjela frekvencijskih pojaseva u 5G mrežama	12
Slika 2.6. Evolucija 5G tehnologije prema 5G Advanced i početak 6G ere (2017-2028).....	13
Slika 2.7. Usporedba ključnih značajki 5G i 6G tehnologija.....	17
Slika 2.8. Scenariji upotrebe i opći aspekti budućih 6G mreža	18
Slika 2.9. Primjena NOMA sa SIC tehnikom na strani korisničkog uređaja u silaznoj vezi...20	
Slika 3.1. Pregled energetske učinkovitosti RAN dijela mreže	27
Slika 3.2. Primjer topologije mreže za procjenu energetske učinkovitosti.....	29
Slika 3.3. Raspodjela potrošnje energije po mrežnim elementima 2025.	37
Slika 3.4. Generičke components bazne postaje.....	38
Slika 3.5. Konceptualni prikaz SDN arhitekture s centraliziranim upravljanjem.....	39
Slika 3.6. Pregled tehnologije mrežnog rezanja u omogućavanju pametnih usluga.....	41
Slika 4.1. Distribucija potrošnje unutar bazne postaje.....	44
Slika 4.2. Principi masivnog MIMO-a s više predajnika i više antena.....	54
Slika 4.3. Povezivanje RRU i AAU baznih postaja s BBU putem optičkih vlakana.....	57
Slika 4.4. Izvori prikupljanja energije u bežičnim komunikacijskim sustavima	61

Popis tablica

Tablica 2.1. Evolucija i usporedba tehnologija mobilnih mreža.....	6
Tablica 2.2. Ključni scenariji upotrebe u 5G-Advanced mrežama	15
Tablica 3.1. Očekivana spektralna učinkovitost silazne veze	33
Tablica 4.1. Usporedba strategija za energetske učinkovite mobilne mreže	43
Tablica 4.2. Pregled tehnika mirovanja i njihovih osnovnih metoda.....	47
Tablica 4.3. Pregled recentnih istraživanja o optimizaciji energetske učinkovitosti baznih postaja uz primjenu tehnika mirovanja i strojnog učenja	50
Tablica 4.4. Sažetak ključnih tehnika i izazova u optimizaciji radio prijenosa i resursa.....	52

1. UVOD

Energetska učinkovitost predstavlja značajnu priliku za smanjenjem potrošnje energije i emisije stakleničkih plinova svake zemlje, bez obzira na njihov stupanj razvoja, a informacijska i komunikacijska tehnologija (engl. *Information and communication technology, ICT*) ima ključnu ulogu u ostvarivanju tog cilja unutar svih industrija. U današnjem digitalnom dobu svjedočimo ubrzanom porastu broja povezanih uređaja, s posebnim naglaskom na pametne telefone i uređaje Interneta stvari (engl. *Internet of Things, IoT*). Ovaj trend uzrokuje značajne promjene u strukturi i zahtjevima komunikacijskih mreža, koje se suočavaju s povećanom potrošnjom energije.



Slika 1.1. Globalni podatkovni promet mobilne mreže (EB mjesečno) [1]

Porast broja korisničkih uređaja (kao što su primjerice pametni telefoni i IoT uređaji) ima nekoliko ključnih implikacija za komunikacijske mreže. Pametni telefoni generiraju velike količine podataka putem aplikacija, prijenosa video sadržaja u stvarnom vremenu (engl. *streaming*), društvenih mreža i drugih online aktivnosti. Istovremeno, IoT uređaji kontinuirano prikupljaju, obrađuju i prenose podatke, što dodatno opterećuje mobilne mreže. Prema izvješću *Ericsson Mobility Report* iz 2023. godine [2], broj IoT uređaja dosegnut će 38,9 milijardi do 2029. godine, dok će broj mobilnih pretplatnika premašiti 9,2 milijarde. Također, globalna prosječna mjesečna potrošnja podataka po pametnom telefonu do 2029. godine dosegnut će 56

GB, što ukazuje na ekstremni porast prometa i potrebu za osiguranjem izrazito velikih podatkovnih kapaciteta.

Nadalje, u *Ericsson Mobility Report* iz lipnja 2024. godine [1], predviđa se da će globalni mobilni podatkovni promet doseći 313 EB mjesečno do 2029. godine. Uključujući promet generiran od strane korisničkih uređaja u fiksnom bežičnom pristupu (engl. *Fixed Wireless Access, FWA*), ukupni mobilni mrežni promet mogao bi dosegnuti 466 EB mjesečno do kraja predviđenog razdoblja (Slika 1.1.). Ovaj rast prometa prvenstveno je potaknut povećanom potrošnjom video sadržaja, koji je krajem 2023. godine činio 73% ukupnog mobilnog prometa.

Budući da se broj uređaja i količina prenesenih podataka eksponencijalno povećavaju, raste i potreba za energetski učinkovitijom mrežnom infrastrukturom. To podrazumijeva postavljanje dodatnih baznih postaja (engl. *base station, BS*), nadogradnju postojeće opreme te implementaciju naprednih tehnologija poput mobilnih mreža pete generacije (5G). Iako 5G tehnologija može ponuditi veću energetsku učinkovitost po jedinici prenesenih podataka, ukupna potrošnja energije može rasti zbog većeg broja baznih postaja i veće gustoće mreže. Svaka bazna postaja zahtijeva dodatnu količinu energije za rad, održavanje i u određenim implementacijama hlađenje, što naglašava važnost balansiranja energetske učinkovitosti s potrebom za većim kapacitetima mobilne mreže.

Posebno u području telekomunikacija, potrošnja energije i posljedično onečišćenje okoliša koje nastaje uslijed emisije stakleničkih plinova (engl. *Greenhouse Gas, GHG*) i drugih štetnih tvari postaju veliki operativni i ekonomski problem. Rapidni porast mrežnog prometa i broja povezanih uređaja čini energetsku učinkovitost sve važnijim pitanjem za mobilne operatore. Tehnologija 5G mobilnih mreža može imati ključnu ulogu u poboljšanju energetske učinkovitosti, pomažući industrijama da postignu ciljeve održivosti, istovremeno rješavajući neke od društvenih i ekoloških izazova.

Uvođenje 5G mobilne mreže ne samo da donosi značajan napredak u brzini i pouzdanosti komunikacija, već i postavlja nove standarde za energetsku učinkovitost. Energetska učinkovitost dobila je vlastitu ulogu kao mjera performansi za 5G komunikacijske mreže, što otvara nove izazove za budućnost. Ova mjera performansi dolazi u obliku ključnog pokazatelja uspješnosti (engl. *Key Performance Indicator, KPI*) za 5G mreže, koji se mora uzeti u obzir tijekom planiranja, implementacije i korištenja mobilne mreže [3].

Primjena energetski učinkovitih tehnologija u 5G mrežama može rezultirati višestrukim prednostima. Prvo, smanjenje potrošnje energije direktno smanjuje operativne troškove (engl.

operating expenses, OPEX) telekomunikacijskih operatora, što može dovesti do nižih cijena usluga za krajnje korisnike. Drugo, energetska učinkovitije mreže imaju manji ekološki utjecaj, smanjujući emisije stakleničkih plinova i doprinoseći globalnim naporima u borbi protiv klimatskih promjena.

Pored 5G tehnologije, nadolazeća tehnologija mobilne mreže šeste generacije (6G) obećava dodatna poboljšanja u energetske uštedama i performansama [4], [5]. 6G mreže će potencijalno pružiti još veće brzine prijenosa podataka, manje kašnjenje (engl. *latency*) u prijenosu podataka i veće kapacitete, a također će biti dizajnirane s još većim fokusom na energetska učinkovitost [6]. Predviđa se da će 6G tehnologija koristiti napredne tehnike poput umjetne inteligencije (engl. *artificial intelligence, AI*) za optimizaciju energetske potrošnje i smanjenje negativnog ekološkog otiska mobilne mreže. Ove mreže bit će ključne za podršku novih aplikacija kao što su proširena stvarnost (engl. *augmented reality, AR*), virtualna stvarnost (engl. *virtual reality, VR*), autonomna robotika, sustavi bespilotnih letjelica (engl. *unmanned aerial vehicle, UAV*) te Internet svega (engl. *Internet of Everything, IoE*), koje će dodatno povećati zahtjeve za podatkovnim kapacitetom i energetske učinkovitošću [7].

Uzimajući u obzir sve ove prednosti i izazove, jasno je da energetska učinkovitost zajedno s 5G i nadolazećom 6G tehnologijom ima potencijal za značajan pozitivan utjecaj na društvo i okoliš. Stoga, energetska učinkovitost će biti ključna u rješavanju operativnih i ekoloških problema, a 5G i 6G tehnologije će omogućiti mobilnim operatorima da odgovore na sve veće zahtjeve za brzinom i podatkovnim kapacitetom, čime će doprinijeti održivom razvoju komunikacijskih mreža.

1.1. Motivacija

Motivacija za istraživanje optimizacije potrošnje energije i poboljšanja energetske učinkovitosti u bežičnim komunikacijskim mrežama proizlazi iz nekoliko ključnih čimbenika koji uključuju: ekološka svijest o klimatskim promjenama i potrebi za održivim razvojem, smanjenje operativnih troškova, tehnološki napredak te regulatorni zahtjevi. Ovi čimbenici potiču potrebu za istraživanjem i razvojem novih strategija za optimizaciju potrošnje energije i poboljšanje energetske učinkovitosti bežičnih komunikacijskih mreža. Cilj je pronaći rješenja koja će omogućiti održivi razvoj i istovremeno zadovoljiti rastuće zahtjeve za kapacitetom i performansama mreža.

1.1.1. Ekološka svijest i održivost

Budući da se svijest o klimatskim promjenama i potrebi za održivim razvojem povećava, postoji sve veći pritisak na mobilne operatore i proizvođače opreme da smanje emisiju stakleničkih plinova (GHG emisija) i potrošnju energije. Optimizacija energetske učinkovitosti komunikacijskih mreža je ključni korak prema postizanju tih ciljeva. Klimatske promjene predstavljaju jedan od najvažnijih globalnih izazova našeg vremena. Sve veći broj znanstvenih studija i izvješća potvrđuje ozbiljnost situacije i potrebu za hitnim djelovanjem [8]. Ova svijest dovela je do povećanog pritiska na industrije, uključujući telekomunikacijski sektor, da smanje svoj ekološki otisak [9].

1.1.2. Operativni troškovi

Potrošnja energije predstavlja značajan dio operativnih troškova mobilnih operatora. U telekomunikacijskoj industriji, energija čini između 20% i 40% ukupnih operativnih troškova [10], što ovu stavku čini jednom od najvažnijih za optimizaciju. Visoki troškovi energije proizlaze iz potrebe za kontinuiranim napajanjem baznih postaja, rashladnih sustava, podatkovnih centara i druge opreme koja omogućuje rad mobilnih mreža. Osim toga, rastući zahtjevi za širinom frekvencijskog pojasa i bržim uslugama dodatno povećavaju energetske potrebe mreža, što dovodi do povećanja operativnih troškova.

S obzirom na konkurentno tržišno okruženje, mobilni operatori suočeni su s pritiskom da smanje troškove kako bi ostali profitabilni i konkurentni. Povećanje energetske učinkovitosti predstavlja jednu od ključnih strategija za smanjenje operativnih troškova, omogućujući operatorima da optimiziraju svoje operacije i povećaju profitabilnost. U konačnici, smanjenje operativnih troškova kroz optimizaciju energetske učinkovitosti jača ekonomsku otpornost i konkurentnost mobilnih operatora na globalnom tržištu.

1.1.3. Tehnološki napredak

Tehnološki napredak igra ključnu ulogu u povećanju energetske učinkovitosti bežičnih komunikacijskih mreža. Razvoj novih tehnologija, kao što su 5G i nadolazeće 6G mreže, donosi značajne promjene u načinu na koji se mreže dizajniraju i upravljaju njihovom potrošnjom energije [11], [12]. Ove tehnologije omogućuju implementaciju naprednih rješenja koja optimiziraju potrošnju energije i smanjuju operativne troškove. S tehnološkim napretkom dolazi i mogućnost korištenja sofisticiranih sustava koji omogućuju preciznije upravljanje energetskom potrošnjom. Napredni algoritmi i AI omogućuju dinamičko prilagođavanje

mrežnih resursa u stvarnom vremenu, što rezultira učinkovitijim korištenjem energije. S obzirom na rastuće zahtjeve za kapacitetom i performansama mreža, tehnološki napredak omogućava postizanje energetske učinkovitosti bez kompromitiranja kvalitete usluge (engl. *Quality of Service, QoS*). Ove inovacije su ključne za održivi razvoj bežičnih komunikacijskih mreža i smanjenje njihovog ekološkog otiska.

1.1.4. Regulatorni zahtjevi

Sve više zemalja uvodi strože regulative vezane uz potrošnju energije i emisiju stakleničkih plinova. Mobilni operatori moraju ispuniti ove zahtjeve kako bi izbjegli sankcije i dodatne troškove povezane s neusklađenošću s propisima. Na primjer, Europska unija je uvela niz regulacija za smanjenje emisije stakleničkih plinova, uključujući cilj smanjenja emisija za 40% do 2030. godine u usporedbi s razinama iz 1990. godine [13]. Ova odluka dio je šire strategije koja uključuje i povećanje udjela obnovljive energije te poboljšanje energetske učinkovitosti kako bi se postigla klimatska neutralnost do 2050. godine.

U Sjedinjenim Američkim Državama, mnoge države također usvajaju ciljeve za smanjenje emisija stakleničkih plinova i implementiraju tržišno utemeljene politike. Prema izvješću *National Conference of State Legislatures (NCSL)*, najmanje 16 država usvojili su zakonske ciljeve za smanjenje emisija [14]. Ovi ciljevi često uključuju sustave praćenja i izvještavanja o emisijama, kao i sustav ograničenja i trgovine (engl. *cap and trade*) za regulaciju emisija u sektorima energetike i transporta. Ovi naponi usmjereni su na smanjenje emisija i poticanje korištenja obnovljivih izvora energije, čime se podržavaju širi ciljevi održivosti i zaštite okoliša.

U takvom regulatornom okviru, telekomunikacijski sektor mora se također prilagoditi kako bi smanjio potrošnju energije i emisije stakleničkih plinova. Uvođenje zelenih politika i tehnologija energetske učinkovitosti postaje imperativ ne samo zbog regulatornih zahtjeva, već i zbog ekonomske isplativosti i ekološke održivosti. Smanjenje potrošnje energije u bežičnim mrežama nije samo odgovor na regulatorne zahtjeve, već i ključan korak prema dugoročnom očuvanju okoliša i smanjenju operativnih troškova.

2. EVOLUCIJA MOBILNIH MREŽA

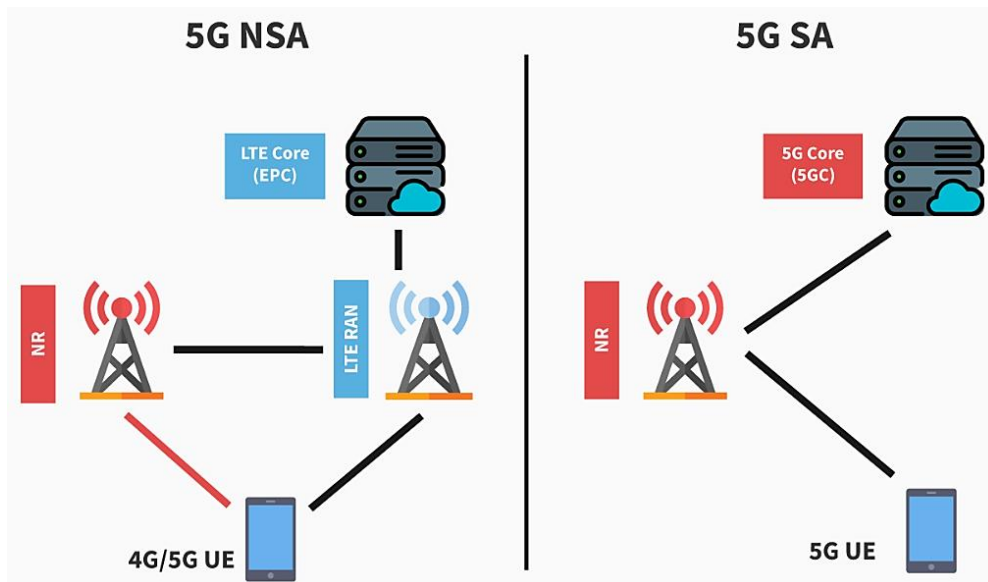
Tablica 2.1. Evolucija i usporedba tehnologija mobilnih mreža [15]

Značajke	1G	2G	3G	4G	5G	6G (pretpostavljeno)
Razdoblje	1980.–1990.	1990.–2000.	2000.–2010.	2010.–2020.	2020.–2030.	2030.–2040.
Maksimalna brzina	2,4 kb/s	144 kb/s	2 Mb/s	1 Gb/s	35,46 Gb/s	100 Gb/s
Maksimalna frekvencija	894 MHz	1.900 MHz	2.100 MHz	6 GHz	90 GHz	10 THz
Razina usluge	Glas	Tekst	Slika	Video	3D VR/AR	Taktilno
Standardi	MTS, AMPS, IMTS, PTT	GSM, IS-95, CDMA, EDGE	UMTS, WCDMA, IMT2000, CDMA2000, TD-SCDMA	WiMAX, LTE, LTE-A	5G NR, WWW	–
Multipleksiranje	FDMA	FDMA, TDMA	CDMA	OFDMA	OFDMA	Pametni OFDMA plus IM
Arhitektura	SISO	SISO	SISO	MIMO	mMIMO	Inteligentna površina
Osnovna mreža	PSTN	PSTN	Paketna mreža	Internet	Internet, Internet stvari	Internet svega
Naglasak	Mobilnost	Digitalizacija	Internet	Prijenos u stvarnom vremenu	Izuzetno velika brzina	Sigurnost, tajnost, privatnost

Razvoj mobilnih mreža od prvih generacija do 5G predstavlja kontinuiranu evoluciju koja zadovoljava rastuće potrebe za bržim prijenosom podataka, većim kapacitetom, nižim kašnjenjem u prijenosu podataka (engl. *latency*) i podrškom za napredne tehnologije (Tablica 2.1.). Svaka generacija donosi značajna poboljšanja u brzini prijenosa podataka, frekvencijskom rasponu, razini usluga i tehnološkim standardima [15]. Dok su rane generacije bile usmjerene na prijenos glasa i tekstualnih poruka, novije generacije uvode napredne mogućnosti poput prijenosa videa, virtualne i proširene stvarnosti te taktilnih komunikacija. S vremenom se povećava i složenost arhitektura, prelazak s jednostavnih sustava na *Multiple Input Multiple Output* (MIMO) i masivni MIMO (mMIMO), s fokusom na energetske učinkovitost, sigurnost i privatnost u nadolazećim tehnologijama. Dok je 5G mobilna mreža u fazi praktične implementacije na globalnoj razini, znanstvena zajednica i industrija već se pripremaju za evoluciju prema 6G mrežama, koje će donijeti još veće promjene u načinu na koji komuniciramo i povezujemo uređaje.

2.1. 5G mobilna mreža

Mobilne mreže prolaze kroz kontinuiranu evoluciju kako bi zadovoljile sve veće zahtjeve za bržim prijenosom podataka, većim kapacitetom, nižim kašnjenjem u prijenosu podataka i podrškom za nove tehnologije.



Slika 2.1. Usporedba 5G nesamostalne (NSA) i 5G samostalne (SA) mrežne arhitekture [16]

Tipična mobilna mreža u modernom kontekstu sastoji se od tri ključne komponente: korisničke opreme (engl. *user equipment, UE*), jezgrene mreže (engl. *core network, CN*) i radijske pristupne mreže (engl. *Radio Access Network, RAN*) (Slika 2.1.). Korisnička oprema uključuje uređaje poput mobilnih telefona, tableta i IoT uređaja koje krajnji korisnici koriste za pristup mreži. Jezgrena mreža upravlja signalizacijom, usmjeravanjem prometa i pružanjem usluga u mobilnim mrežama. U mobilnim mrežama četvrte generacije (engl. *fourth generation, 4G* poznatim i kao engl. *Long Term Evolution, LTE* mreže), ovu funkciju obavlja *Evolved Packet Core (EPC)* (Slika 2.1.), arhitektura koja omogućuje prijenos podataka, upravljanje mobilnošću i sigurnost korisnika [17]. S dolaskom mobilnih mreža pete generacije (5G), jezgrena mreža *5G Core (5GC)* (Slika 2.1.) uvodi napredne funkcionalnosti koje podržavaju ultra-nisko kašnjenje u prijenosu podataka, masovnu povezanost te fleksibilnu mrežnu segmentaciju korištenjem tehnike mrežnog rezanja (engl. *network slicing*) [18]. Te značajke omogućuju 5G mreži prilagodbu različitim vrstama aplikacija i usluga, od autonomnih vozila do IoT uređaja, značajno proširujući spektar mogućih primjena u odnosu na prethodne generacije mobilnih mreža.

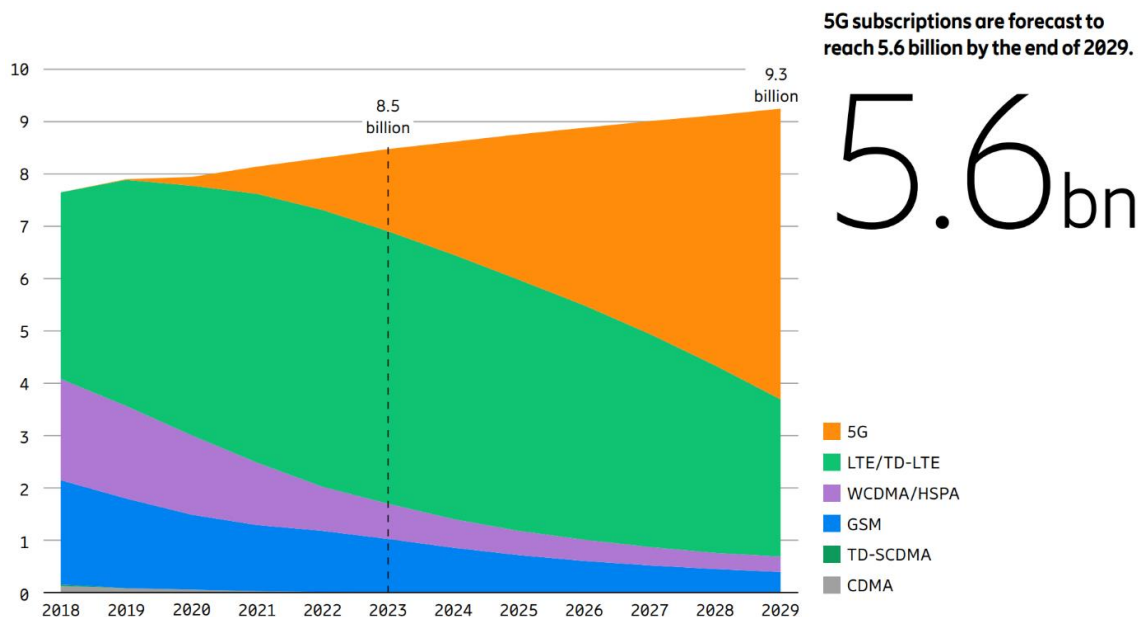
Radijska pristupna mreža (engl. *Radio Access Network, RAN*) povezuje korisničku opremu s jezgrenom mrežom putem baznih postaja, koje su ključne za omogućavanje pristupa različitim uslugama i aplikacijama. U 4G mrežama, bazne postaje poznate su kao *evolved Node B* (eNodeB) i odgovorne su za upravljanje resursima i kontrolu mobilnosti. U 5G mrežama, bazne postaje nazivaju se *next-generation Node B* (gNodeB) te donose napredne mogućnosti, uključujući podršku za veće brzine prijenosa podataka, niže kašnjenje u prijenosu podataka i povezivanje mnogo većeg broja uređaja, što je ključno za nove tehnologije poput IoT-a i autonomnih vozila. Ključnu ulogu u ovoj evoluciji ima 5G *New Radio* (NR), koja predstavlja novu radijsku tehnologiju razvijena za 5G mreže i koja omogućuje značajna poboljšanja u kapacitetu, brzini prijenosa i smanjenju kašnjenja u prijenosu podataka u odnosu na prethodne generacije [19]. 5G NR osigurava fleksibilnu i skalabilnu platformu koja može podržati širok raspon aplikacija, od mobilne širokopojasne komunikacije do masovne povezanosti uređaja u okviru IoT-a.

Uvođenje 5G tehnologije označilo je značajnu prekretnicu u evoluciji mobilnih mreža, ne samo zbog brzine prijenosa podataka, već i zbog mogućnosti koje omogućavaju razvoj novih usluga. Važno je napomenuti da je uvođenje 5G tehnologije u početku provedeno u obliku tzv. *non-standalone* (NSA) arhitekture (Slika 2.1.), gdje se 5G mreža oslanja na postojeću 4G jezgrenu mrežu za signalizaciju i upravljanje [20]. Ovaj pristup omogućio je brže uvođenje 5G usluga i širu pokrivenost u ranijim fazama implementacije. S vremenom se očekuje potpuni prijelaz na 5G *standalone* (SA) arhitekturu (Slika 2.1.), koja koristi novu 5G jezgrenu mrežu i omogućuje potpunu neovisnost od 4G infrastrukture [18]. NSA arhitektura 5G mreža donosi napredne funkcionalnosti poput ultra-niskog kašnjenja u prijenosu podataka, veću mrežnu fleksibilnost te podršku za napredne industrijske aplikacije, što će dodatno unaprijediti mogućnosti mobilnih mreža.

2.1.1. Rastući podatkovni promet i njegove implikacije

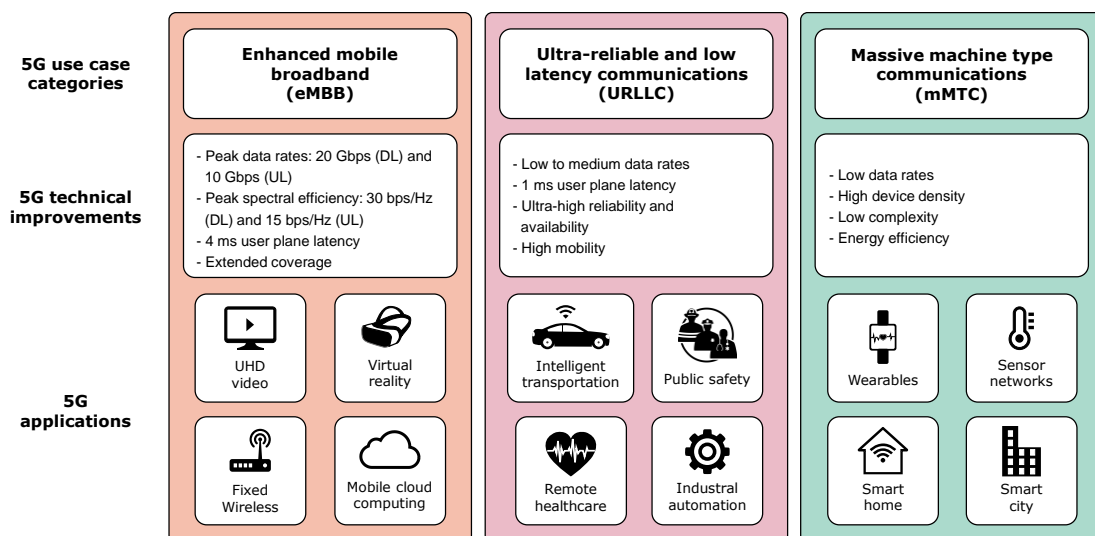
Evolucija mrežne arhitekture karakteristična za 5G mreže omogućuje prijenos značajno većeg podatkovnog prometa, što se očituje u trenutnim pokazateljima godišnjeg rasta prenesenog podatkovnog prometa. Na kraju 2023. godine, 5G je činila 25% ukupnog podatkovnog prometa, a očekuje se da će do 2029. godine taj udio porasti na 75% [1]. Ovaj rast potaknut je sve većom potražnjom za uslugama poput produžene stvarnosti (engl. *extended reality, XR*), koja uključuje proširenu stvarnost, virtualnu stvarnost te tehnologije miješane

stvarnosti (engl. *mixed reality, MR*), a koje će dodatno povećati podatkovni promet mobilnih mreža u nadolazećim godinama.



Slika 2.2. Mobilne pretplate prema tehnologiji (milijarde) [1]

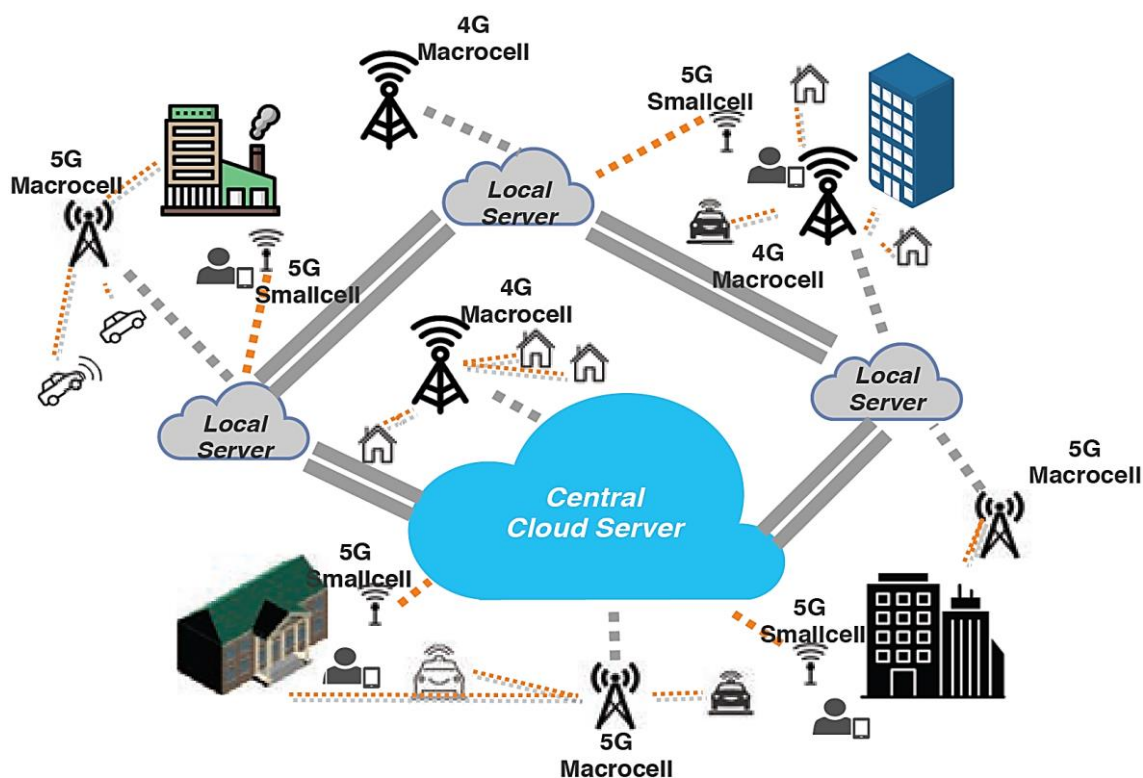
Uz rast podatkovnog prometa, predviđa se da će 5G postati dominantna tehnologija mobilnog pristupa prema broju pretplata do 2028. godine, s gotovo 5,6 milijardi 5G pretplata do 2029. (Slika 2.2.), čime će činiti 60% svih mobilnih pretplata. Daljnji razvoj 5G mreža, posebice kroz implementaciju samostalne (SA) 5G arhitekture mreže, omogućit će širenje spektra novih usluga koje zahtijevaju veliki kapacitet uzlazne veze (engl. *uplink*), uključujući napredne aplikacije za javnu sigurnost i nadzor.



Slika 2.3. Tri glavna scenarija upotrebe 5G mobilnih mreža [21]

2.1.2. Ključni scenariji upotrebe

Globalni trendovi vode svijet prema sveprisutnom umrežavanju, gdje ne samo ljudi, nego i uređaji komuniciraju jedni s drugima, postajući sve pametniji u smislu mogućnosti komunikacije bez ljudske interakcije. Budući da se očekuje komunikacija „svih sa svime“, postoji velika potražnja za mrežnim kapacitetom, propusnošću i pokrivenošću, uz potrebu za osiguravanjem pouzdanosti i dostupnosti mreže. Mobilne 5G mreže dizajnirane su kako bi zadovoljile ove zahtjeve kroz praktičnu primjenu tri ključne značajke (Slika 2.3.): poboljšani mobilni širokopojasni pristup (engl. *enhanced Mobile Broadband, eMBB*), masovne komunikacije među uređajima (engl. *massive Machine Type Communications, mMTC*) te ultra pouzdane komunikacije s niskim kašnjenjem u prijenosu podataka (engl. *Ultra-Reliable Low Latency Communications, URLLC*) [22].



Slika 2.4. 5G HetNet mrežna arhitektura [23]

Scenarij primjene eMBB osmišljen je za osiguranje visokih kapaciteta i propusnosti, pružajući korisnicima brži i pouzdaniji pristup internetu, čak i u područjima s velikim brojem povezanih uređaja. mMTC omogućuje povezivanje velikog broja uređaja koji zahtijevaju komunikaciju „stroj prema stroju“ (engl. *machine-to-machine, M2M*), osiguravajući efikasno funkcioniranje IoT sustava. Uz sve veći broj uređaja i senzora koji nude M2M komunikaciju,

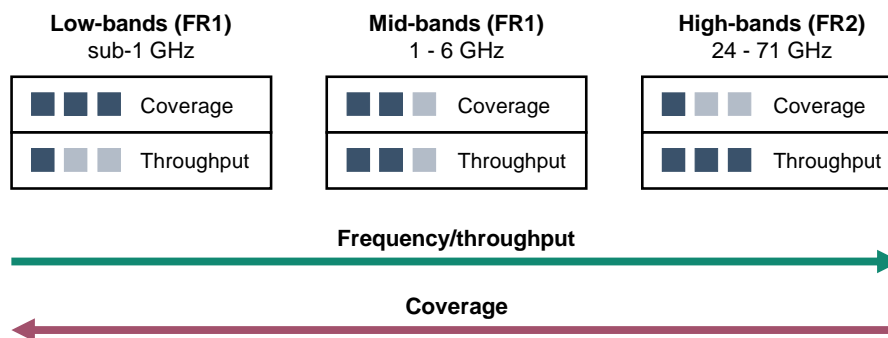
slučajevi korištenja mMTC-a postat će prisutniji u bliskoj budućnosti. URLLC zadovoljava visoke zahtjeve za niskim kašnjenjem u prijenosu podataka, što je ključno za primjene u kritičnim situacijama i komunikacijama u stvarnom vremenu. Visoka pouzdanost i nisko kašnjenje u prijenosu podataka ključni su zahtjevi za nove kritične aplikacije, uključujući telekirurgiju, inteligentni transport i industrijsku automatizaciju [24].

2.1.3. Heterogena arhitektura i frekvencijski spektar 5G mreža

Za postizanje optimalne pokrivenosti, kapaciteta i energetske učinkovitosti, 5G se implementira kao heterogena mreža (engl. *heterogeneous network*, *HetNet*) koja kombinira različite vrste baznih postaja i frekvencijskih opsega (Slika 2.4.). Heterogene mreže koriste kombinaciju vanjskih makročelija za široko pokrivanje signala te malih ćelija (mikročelije, pikoćelije, femtoćelije) kako bi se izbjegle bilo kakve rupe u pokrivenosti i ispunili visoki zahtjevi za kapacitetom [25].

HetNet arhitektura omogućuje veću fleksibilnost u dizajnu i upravljanju mrežom, što je ključno za 5G mreže, koje moraju podržavati širok spektar aplikacija, od video poziva visoke propusnosti do kritičnih aplikacija s niskim kašnjenjem u prijenosu podataka. Prednost HetNet-a je u mogućnosti učinkovite distribucije resursa prema potrebama korisnika, što omogućuje bolju iskorištenost spektra i energetske resursa.

Međutim, budući da su frekvencijski pojasevi ispod 6 GHz, koji su korišteni u prethodnim generacijama mobilnih mreža sve više zagušeni i nude ograničene mogućnosti za široke frekvencijske kanale, standardizacija 5G tehnologije predviđa prijenos podataka korištenjem milimetarskih valova (engl. *millimeter wave*, *mmWave*) u frekvencijskom pojasu iznad 24 GHz [26]. Ove frekvencije omogućuju prijenos većih količina podataka koristeći šire frekvencijske kanale, zadovoljavajući tako rastuće zahtjeve za brzinama prijenosa. Međutim, *mmWave* frekvencije imaju svoje nedostatke koji se primarno ogledaju u kratkom dometu prijenosa signala, zbog visokih gubitaka pri propagaciji i penetraciji signala prouzrokovanih negativnim utjecajem prepreka ili kiše na prijenos signala. Zbog toga je u 5G mrežama heterogena arhitektura ključna, pri čemu makročelijske bazne postaje osiguravaju široko pokrivanje signalom 5G mreže, dok male ćelije nadopunjuju mrežu pružajući visok kapacitet u područjima s velikom gustoćom korisnika (engl. *hot spots*).



Slika 2.5. Raspodjela frekvencijskih pojaseva u 5G mrežama [21]

Unutar *mmWave* frekvencijskog raspona, očekuje se da će do 100 GHz novog spektra biti dostupno za mobilne komunikacije, što predstavlja značajan porast širine korištenog spektra u odnosu na prethodno korištene frekvencije ispod 6 GHz namijenjene za 5G mobilne mreže te mreže ranijih generacija.

Za zadovoljavanje specifičnih potreba, 5G frekvencijski spektar podijeljen je u tri kategorije (Slika 2.5.): niskopojasne (ispod 1 GHz) unutar FR1 pojasa, srednjopojasne (1–6 GHz) unutar FR1 pojasa i visokopojasne frekvencije (24–52 GHz) unutar FR2 pojasa [27]. Niskopojasne frekvencije ključne su za široko pokrivanje, pokrivenost unutar zgrada i podršku za IoT primjene. Srednjopojasni spektar nudi kompromis između pokrivenosti i kapaciteta, a većina komercijalnih 5G mreža koristit će frekvencijski raspon od 3,3 GHz do 4,2 GHz unutar ovog spektra [28]. Za postizanje iznimno visokih brzina prijenosa podataka i ultra niskog kašnjenja u prijenosu podataka, koje su ključne za 5G komunikacije, potrebne su visoke frekvencije. Globalno dodijeljeni *mmWave* spektar uključuje frekvencije u rasponu od 24 do 28 GHz, uz planove za dodatne alokacije spektra u budućnosti (npr. 37–50 GHz, 50–71 GHz) [28].

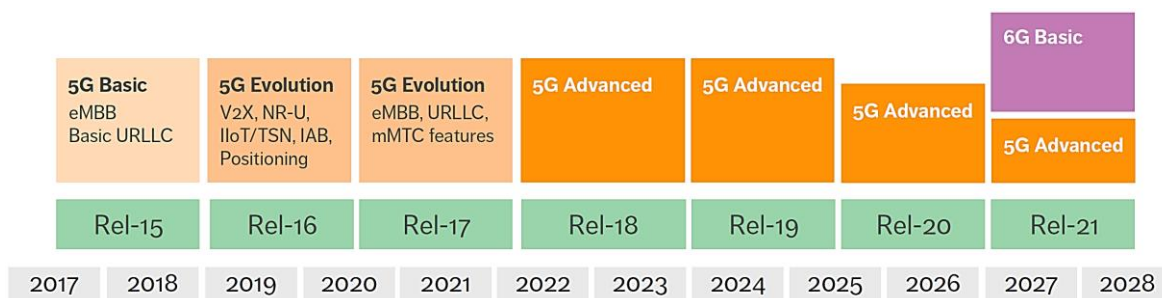
2.1.4. Energetska učinkovitost 5G mreža

Količina instaliranih 5G baznih postaja ovisit će o gustoći korisnika i njihovoj potražnji za kapacitetom prometa. Ovo utječe na ukupan broj instaliranih makro, a posebno malih baznih postaja (engl. *small base stations*), što izravno utječe na energetska učinkovitost 5G mreža. Razlike među područjima u smislu gustoće korisnika i odgovarajućih količina prometa zahtijevat će različite konfiguracije 5G mreže u smislu broja i kapaciteta baznih postaja. To će dalje rezultirati različitim utjecajima na energetska učinkovitost 5G mreža [29]. S porastom potrebnog broja makro i malih ćelijskih baznih postaja, energetska zahtjevi 5G mreža značajno se povećavaju. S napretkom bežične mobilne komunikacijske tehnologije, energetska

učinkovitost postaje jedno od ključnih pitanja. Svaka nova generacija mobilnih mreža zahtijeva više energije, što je posljedica novih zahtjeva povezanih s povećanjem broja korisnika i volumena podatkovnog prometa.

2.2. Sljedeća evolucijska faza 5G mreža

Mobilna mreža *5G Advanced* predstavlja sljedeću fazu evolucije bežičnih mreža, temeljenu na *3rd Generation Partnership Project (3GPP) Release 18 (Rel-18)* verziji tehničke specifikacije, s ciljem dodatnog unaprjeđenja performansi, pokrivenosti te energetske učinkovitosti postojećih 5G mreža. Ova tehnologija donosi ključne inovacije koje mobilnim operatorima omogućuju pružanje inteligentnih mrežnih rješenja vođenih podacima, prilagođenih specifičnim potrebama korisnika, kao što su autonomna vozila, industrijska automatizacija, metaverzum (engl. *metaverse*) i aplikacije proširene stvarnosti [30]. 5G Advanced često se opisuje i kao početna faza razvoja tehnologija nakon 5G (engl. *beyond 5G, B5G*), koje će nastaviti evolucijski put prema 6G mrežama.



Slika 2.6. Evolucija 5G tehnologije prema 5G Advanced i početak 6G ere (2017-2028) [31]

Slika 2.6. prikazuje evolucijski put razvoja 5G mreža od njihovog početka s *Release 15 (Rel-15)* specifikacijom do planiranog uvođenja 6G tehnologije, kao dijela *Release 21 (Rel-21)* specifikacije. Početni razvoj 5G mreža, označen kao *5G Basic* u *Rel-15*, uveo je osnovne funkcionalnosti poput eMBB-a i početne verzije URLLC-a. Sljedeće faze razvoja, kroz *Rel-16* i *Rel-17*, označene kao *5G Evolution*, donijele su proširenja koja uključuju komunikacije vozila sa svime (engl. *Vehicle-to-Everything, V2X*), industrijski Internet stvari (engl. Industrial IoT, IIoT) i vremenski osjetljive mrežne komunikacije (engl. *Time-Sensitive Networking, TSN*), te značajke za mMTC komunikacije. Od *Rel-18* specifikacije nadalje (2022-2028), 5G tehnologija prelazi u fazu *5G Advanced*, koja uvodi daljnje poboljšanje performansi, kapaciteta i pouzdanosti kako bi zadovoljila rastuće zahtjeve za povezivanjem i uslugama. Konačno, specifikacija *Rel-21*, planiran za 2028. godinu, označava početak razvoja *6G Basic* tehnologije,

čime će započeti nova era mobilnih komunikacija koja će donijeti nove napredne mogućnosti za povezivanje, kao i nove paradigme u korištenju mobilnih mreža.

Jedna od najvažnijih karakteristika *5G Advanced* jest unaprijeđeno upravljanje mrežom i poboljšana učinkovitost putem primjene umjetne inteligencije (AI) i strojnog učenja (engl. *machine learning, ML*). Ova tehnologija omogućava prilagodbu povezanosti specifičnim uslugama, dok istovremeno povećava energetske učinkovitost te proširuje podršku za IoT uređaje, uključujući one bez vlastitog izvora energije. Također, *5G Advanced* omogućuje besprekidno (engl. *seamless*) povezivanje između zemaljskih i nezemaljskih mreža, što će značajno poboljšati pokrivenost u ruralnim i teško dostupnim područjima [31].

Uz tehnološke inovacije, *5G Advanced* otvara nove poslovne modele i strateška partnerstva, omogućujući operatorima bolje ostvarivanje prihoda od svojih ulaganja u 5G mreže. Očekuje se da će ova tehnologija imati ključnu ulogu u prijelazu prema 6G mrežama, postavljajući temelje za buduće inovacije u bežičnim komunikacijama [32].

2.2.1. Tehnološke inovacije u okviru 5G Advanced paradigme

Evolucijska faza *5G Advanced* donosi značajna poboljšanja u radijskoj tehnologiji, uključujući poboljšanja MIMO sustava koja povećavaju kapacitet i pokrivenost mreže. Umjetna inteligencija i strojno učenje igraju ključnu ulogu u optimizaciji energetske učinkovitosti, pametnom upravljanju resursima i poboljšanju mobilnosti korisnika [33]. Jedan od ciljeva *5G Advanced* jest podrška za nove tržišne segmente poput XR, *cloud gaming*-a i industrijskih senzorskih mreža. U tom kontekstu, *RedCap* (engl. *Reduced Capability*) tehnologija igra važnu ulogu. *RedCap* je optimizirana verzija 5G NR dizajnirana za uređaje srednje i niske složenosti, poput nosivih uređaja, industrijskih senzora i pametnih mreža. Ova tehnologija smanjuje kompleksnost i troškove uređaja, zadržavajući ključne prednosti 5G mreža, poput niskog kašnjenja u prijenosu podataka i visoke energetske učinkovitosti. *RedCap* omogućuje široku primjenu 5G tehnologije u slučajevima gdje nije potrebna potpuna snaga i funkcionalnost standardnog 5G NR-a, ali je potrebna pouzdana i brza povezanost. S obzirom na očekivani rast XR aplikacija, 3GPP *Release 18* uvodi standarde za smanjenje kašnjenja u prijenosu podataka i poboljšanje energetske učinkovitosti XR uređaja. *Release 19* će dodatno unaprijediti AI/ML tehnologije za upravljanje mobilnošću i optimizaciju mreže, što će biti presudno za podršku budućih 6G mreža [34].

Tablica 2.2. Ključni scenariji upotrebe u 5G-Advanced mrežama [32]

Novi scenariji upotrebe	Opis
AI/ML primjena u bežičnom (zračnom) sučelju baznih postaja	Upotreba AI/ML za poboljšanje povratnih informacija o stanju kanala (<i>channel state Information, CSI</i>), upravljanje snopovima 5G signala (engl. <i>beamforming</i>) i preciznost pozicioniranja.
Poboljšanja pozicioniranja i prijenosa podataka primjenom tehnologije direktne komunikacije između 5G uređaja (engl. <i>NR sidelink</i>)	Poboljšanja za aplikacije poput V2X, javne sigurnosti i komercijalnih usluga s naglaskom na integritet pozicioniranja za kritične usluge.
NR <i>RedCap</i> povezani slučajevi upotrebe	Podrška za nosive uređaje, industrijske senzore, video nadzor i pametne mreže uz smanjenje kompleksnosti uređaja.
Poboljšanja UAV NR usluga	Rješavanje problema interferencije u uzlaznoj i silaznoj vezi, te poboljšanja u mobilnosti bespilotnih letjelica.
Poboljšanja NR multicast i broadcast usluga	Unapređenja za javne sigurnosne usluge, kritične aplikacije, V2X, IPTV i IoT aplikacije kroz multicast i broadcast usluge.
Scenariji upotrebe povezani s tehnologijama <i>mobile integrated access and backhaul (IAB)</i> i <i>vehicle mounted relay (VMR)</i>	Proširenje pokrivenosti i kapaciteta u vozilima, na javnim događajima i u hitnim situacijama kroz mobilne IAB mreže.
Poboljšanja za XR usluge	Optimizacija kašnjenja u prijenosu podataka i energetske učinkovitosti za aplikacije proširene stvarnosti, medije u stvarnom vremenu i industrijsku kontrolu.
Dual Tx/Rx <i>multiple universal subscriber identity module (MUSIM)</i> za povezani način rada na oba <i>universal subscriber identity module-a (USIM)</i>	Mogućnost simultanog korištenja glasovnih poziva na jednom USIM-u dok se podaci preuzimaju putem drugog USIM-a.
Daljnja poboljšanja prikupljanja podataka za samoorganizirajuće mreže (engl. <i>self-organizing networks, SON</i>) te minimizacija testiranja pogona (engl. <i>minimization of drive tests, MDT</i>) u okviru 5G NR i <i>evolved non-standalone dual connectivity (EN-DC)</i> konfiguracije	Unapređenje prikupljanja i korištenja podataka za realizaciju koncepta samoorganizirajućih mreža i minimizaciju testiranja pogona.

Tablica 2.2. prikazuje ključne scenarije upotrebe u 5G *Advanced* mrežama, identificirane u tehničkom dokumentu [32]. Ovi scenariji predstavljaju glavne inovacije i primjene koje će definirati budući razvoj 5G *Advanced* tehnologija. Naglasak je na AI/ML primjeni u različitim aspektima mrežnog upravljanja, kao i na poboljšanjima u povezivanju uređaja, povećanju pouzdanosti mreže te optimizaciji resursa. Tablica 2.2. obuhvaća nove slučajeve upotrebe kao što su napredne AI/ML tehnike za upravljanje radijskim sučeljem, poboljšanja u NR *sidelink* pozicioniranju (izravna komunikacija između 5G uređaja bez posredovanja baznih postaja), podrška za NR *RedCap* uređaje te optimizacije za XR aplikacije. Ovi scenariji također uključuju značajke koje će omogućiti poboljšanu interoperabilnost i efikasnost u složenim

mrežnim okruženjima, kao što su rješenja za komunikaciju bespilotnih letjelica (engl. *unmanned aerial vehicle, UAV*), NR multicast i broadcast usluge te primjenu dualnog Tx/Rx MUSIM komunikacijskog modula. Predstavljeni scenariji upotrebe ne samo da ilustriraju tehnička unapređenja, već i otvaraju nove mogućnosti za poslovne modele i inovacije unutar različitih industrijskih sektora.

2.2.2. Prijelaz prema 6G mrežama

5G Advanced ne samo da poboljšava trenutne kapacitete 5G mreža, već također postavlja temelje za razvoj 6G tehnologija. Ova faza evolucije mobilne 5G mreže omogućuje pružateljima usluga da iskoriste nove tržišne prilike, dok istovremeno smanjuju energetske zahtjeve i poboljšavaju ukupnu učinkovitost mreža. Uvođenje 3GPP *Release 18* donosi ključna poboljšanja koja proširuju mogućnosti 5G mreža, uključujući unapređenja u pozicioniranju, prijenosu podataka te podršku za kritične aplikacije kao što su javna sigurnost i V2X komunikacije [32].

Prema dokumentu [33] evolucija prema B5G mrežama bit će ključna za povezivanje društva budućnosti, omogućujući napredne oblike komunikacije i integraciju digitalnih blizanaca (engl. *digital twins*) i kibernetičko-fizičkih (engl. *cyber-physical*) sustava. Naglasak je na heterogenim mrežama (engl. *heterogeneous networks, HetNets*) koje kombiniraju različite vrste baznih postaja i frekvencijskih opsega kako bi se osigurala optimalna pokrivenost i kapacitet uz povećanje energetske učinkovitosti.

U razmatranju budućnosti bežičnih komunikacija, prijelaz s 5G na 6G tehnologije predstavlja ključnu fazu. Iako 5G već donosi značajna poboljšanja, razvoj 6G tehnologija usmjeren je na postizanje ultra-visoke pouzdanosti, većih brzina prijenosa podataka i smanjenje kašnjenja u prijenosu podataka, uz fokus na energetske učinkovitije sustave. Ove tehnologije omogućit će potpuno autonomne sustave, napredne mogućnosti proširene stvarnosti i razvoj pametnih gradova, što će komunikacijske mreže dodatno učiniti neizostavnim dijelom svakodnevnog života [35].

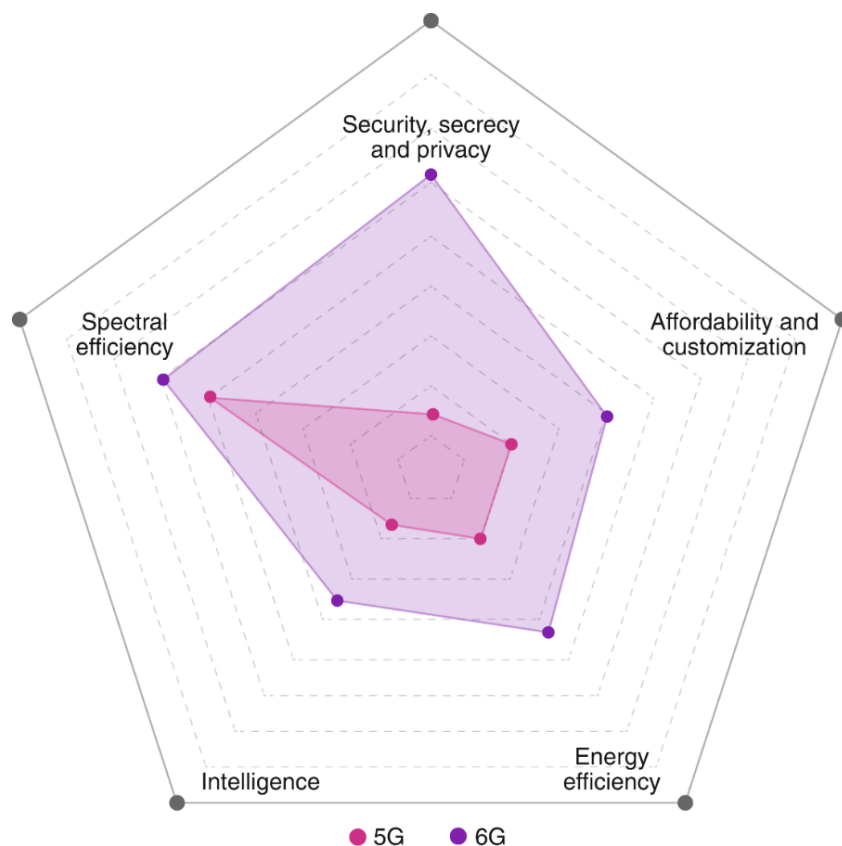
5G Advanced predstavlja važan korak prema 6G tehnologijama, osiguravajući temelj za buduće inovacije u bežičnim komunikacijama. Ova tehnologija omogućuje mobilnim operatorima da povećaju kapacitet, poboljšaju pokrivenost i optimiziraju energetske učinkovitost, čime se otvaraju nove mogućnosti na tržištu.

2.3. Buduća 6G tehnologija

S daljnjim napretkom mobilnih komunikacija, 6G tehnologija postavlja nove standarde za budućnost, s naglaskom na ubrzavanje digitalne transformacije u svim sektorima društva. Dok je 5G omogućio revolucionarne promjene u brzini prijenosa podataka, kašnjenja u prijenosu podataka i povezivanju uređaja, očekuje se da će 6G tehnologija donijeti još veću razinu integracije, inteligencije i prilagodljivosti. Uvođenje 6G mreža ne samo da će nadograditi postojeće kapacitete, već će otvoriti vrata novim aplikacijama, posebno u područjima kao što su umjetna inteligencija, proširena stvarnost, senzorske mreže i sveprisutna povezanost.

2.3.1. Ključne značajke i tehničke inovacije buduće 6G tehnologije

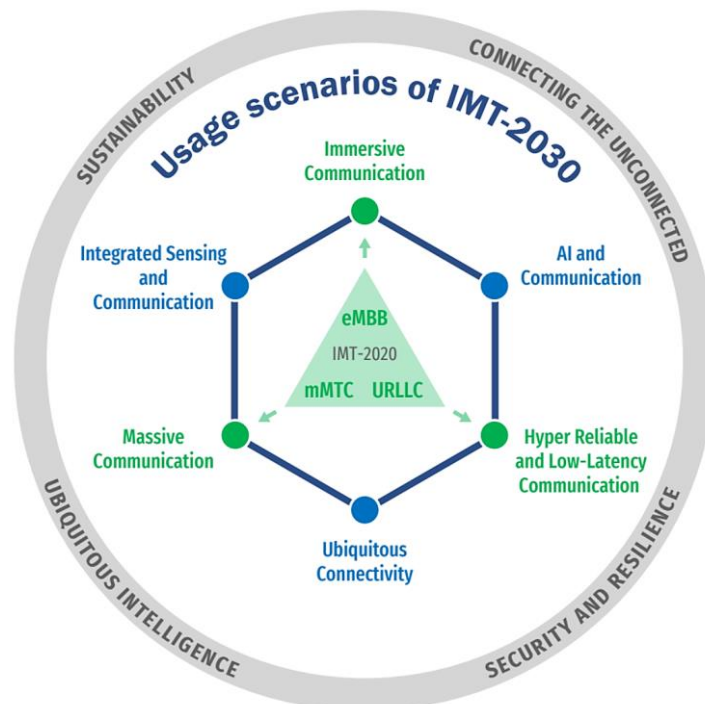
Očekuje se da će 6G tehnologija u 2030-ima donijeti značajna poboljšanja u svim aspektima mobilnih komunikacija. Iako će klasične mobilne komunikacije i dalje biti ključna primjena, novi scenariji upotrebe postat će sve važniji. Stoga će 6G mreže biti usmjerene na poboljšanje korisničkog iskustva, s naglaskom na visoku razinu sigurnosti, privatnosti i prilagodljivosti [15]. Ova usmjerenost na korisnika, a ne samo na tehnologiju, bit će temeljna karakteristika 6G mreža.



Slika 2.7. Usporedba ključnih značajki 5G i 6G tehnologija [15]

Slika 2.7. prikazuje usporedbu ključnih značajki 5G i 6G tehnologija. Na slici su evaluirane su sljedeće karakteristike mobilne mreže: sigurnost, privatnost, prilagodljivost, energetska učinkovitost, inteligencija i spektralna učinkovitost. Grafikon jasno pokazuje kako očekivane karakteristike 6G tehnologije nadmašuje 5G tehnologiju u svim ovim aspektima. Posebno se ističu poboljšanja u sigurnosti, privatnosti i prilagodljivosti, koja su ključna za zaštitu korisničkih podataka i fleksibilno prilagođavanje različitim potrebama korisnika.

Jedan od ključnih tehnoloških iskoraka u 6G mrežama bit će terahercna (engl. *terahertz*, *THz*) komunikacija, koja predstavlja idući veliki korak u razvoju bežičnih mreža, nadilazeći ograničenja 5G tehnologije. Koristeći frekvencijski raspon između 0,1 i 10 THz, komunikacija u ovim pojasevima omogućuje neviđene širine pojasa i brzine prijenosa podataka, što je ključno za buduće aplikacije poput ultra-visoke rezolucije video prijenosa, virtualne stvarnosti i drugih podatkovno intenzivnih usluga [36]. Ključne tehnologije koje omogućuju THz komunikaciju uključuju modeliranje kanala, dizajn *multibeam* antena, razvoj integriranih čipova, obradu signala i dinamičko upravljanje resursima [36]. Precizno modeliranje kanala nužno je zbog specifičnih karakteristika THz frekvencija, poput visokog gubitka signala i jedinstvenih svojstava apsorpcije. *Multibeam* antene omogućuju usmjerene snopove visoke dobitke koji mogu učinkovito ciljati više korisnika ili uređaja istovremeno, kompenzirajući visoke gubitke u prijenosu.



Slika 2.8. Scenariji upotrebe i opći aspekti budućih 6G mreža [37]

2.3.2. Scenariji primjene i tehnološki izazovi budućih 6G mreža

IMT-2030 kao sljedeća faza mobilnih mreža, proširit će postojeće scenarije primjene i uvesti nove, inovativne mogućnosti (Slika 2.8.) [37]. Dok IMT-2020 [22] poznat i kao 5G, uvodi eMBB, URLLC i mMTC, IMT-2030 će ići korak dalje, uvodeći nove scenarije upotrebe zasnovane na umjetnoj inteligenciji, senzorskoj tehnologiji i sveprisutnoj povezanosti.

Jedan od ključnih novih scenarija bit će imerzivna komunikacija (engl. *Immersive Communication*), koja će nadograditi eMBB s interaktivnim video iskustvima, poput XR, daljinskog teleprisustva i holografskih komunikacija. Ova tehnologija obećava potpuno novo korisničko iskustvo, omogućujući integraciju virtualnih i stvarnih svjetova. Izuzetno pouzdana komunikacija s niskim kašnjenjem u prijenosu podataka (engl. *Hyper Reliable and Low-Latency Communication, HRLLC*) proširit će mogućnosti URLLC tehnologije, pružajući podršku za aplikacije poput potpune automatizacije u industriji, kontrole kritičnih sustava i telemedicine, gdje je minimalno kašnjenje od ključne važnosti. Masovna komunikacija (engl. *Massive Communication*) doživjet će značajnu ekspanziju, omogućujući povezivanje velikog broja IoT uređaja u sektorima poput pametnih gradova, transporta, zdravstva i poljoprivrede. Ovaj scenarij otvorit će nove mogućnosti za automatizaciju i optimizaciju raznih procesa. Uključivanje sveprisutne povezanosti (engl. *Ubiquitous Connectivity*) u IMT-2030 bit će ključno za premošćivanje digitalnog jaza, posebno u ruralnim i udaljenim područjima, omogućujući univerzalni pristup digitalnim uslugama. Nadalje, IMT-2030 će podržati napredne AI aplikacije i integrirano osjetilno-komunikacijske sustave, omogućujući preciznu i pravovremenu obradu podataka za nove industrijske i svakodnevne primjene.

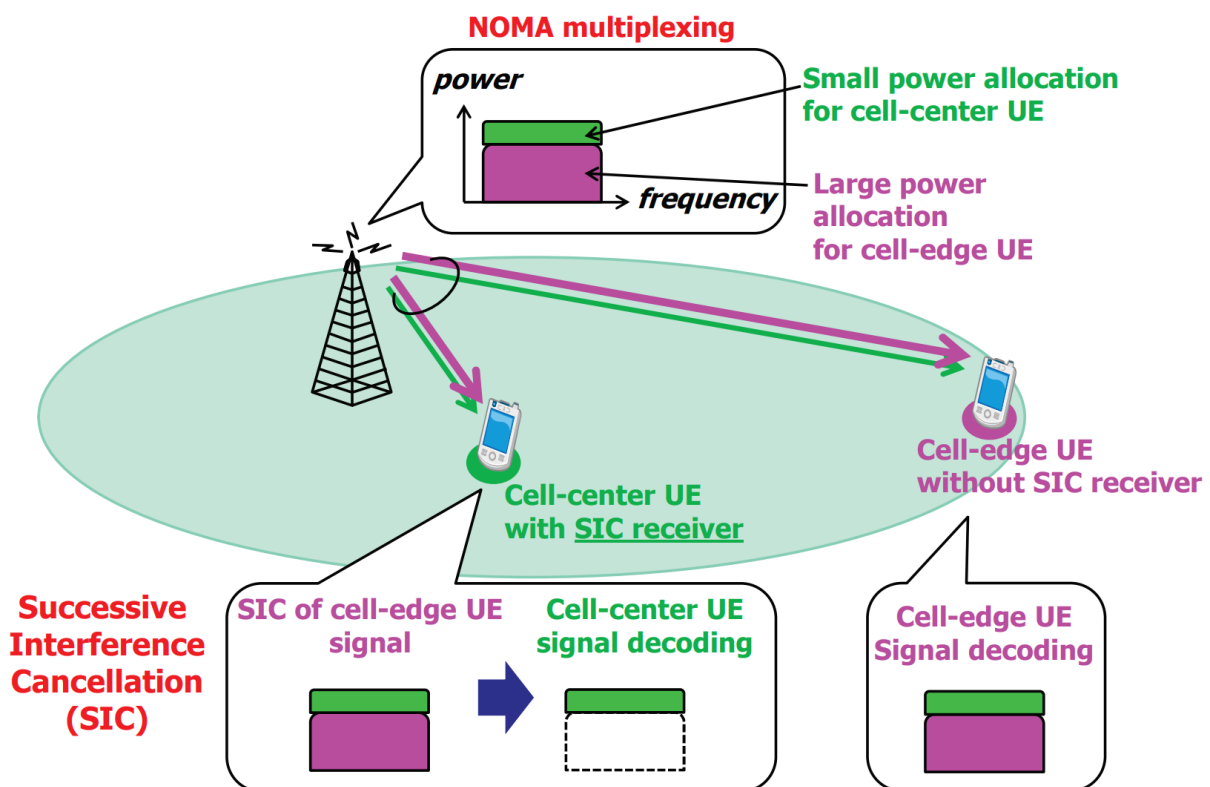
2.3.3. Napredna NOMA tehnika višestrukog pristupa

S obzirom na eksponencijalni rast podatkovnog prometa i broj povezanih uređaja, tradicionalne tehnike višestrukog pristupa, kao što su višestruki pristup s vremenskom raspodjelom (engl. *Time Division Multiple Access, TDMA*), višestruki pristup s frekvencijskom raspodjelom (engl. *Frequency Division Multiple Access, FDMA*) i višestruki pristup s ortogonalnom frekvencijskom raspodjelom (engl. *Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA*), suočavaju se s izazovima u zadovoljavanju sve većih zahtjeva za kapacitetom, spektralnom i energetsom učinkovitošću. Ove tehnike koriste dijeljenu ili ortogonalnu alokaciju resursa, pri čemu se svakom korisniku dodjeljuju različiti resursi, poput vremena, frekvencije ili kanala, kako bi se izbjegla interferencija. Međutim, takav pristup može

dovesti do neučinkovitog korištenja spektra u uvjetima velike gustoće korisničkog prometa i masovne povezanosti.

S dolaskom 6G mreža, očekuje se drastično povećanje kapaciteta, dodatno smanjenje kašnjenja u prijenosu podataka te podrška za masovnu povezanost uređaja i aplikacija s visokim zahtjevima za prijenos podataka, poput VR, AR i IoT. Kako bi se odgovorilo na ove izazove i osigurala bolja iskoristivost raspoloživih resursa, razvijaju se nove metode višestrukog pristupa. Jedna od najperspektivnijih tehnologija je neortogonalni višestruki pristup (engl. *Non-orthogonal multiple access, NOMA*) [38], koja se pojavljuje kao inovativno rješenje omogućujući istovremeni prijenos signala višestrukih korisnika unutar istog resursnog bloka (engl. *resource block, RB*). Na taj način se značajno poboljšava učinkovitost korištenja spektra i kapacitet mreže.

NOMA tehnika omogućuje fleksibilniju raspodjelu RF resursa i optimizaciju performansi mreže, što je ključna prednost za buduće generacije mreža gdje su zahtjevi za kapacitetom, povezivosti i kašnjenjem u prijenosu podataka mnogo veći [39]. Ova tehnologija omogućuje učinkovitiju uporabu spektra i smanjenje interferencije, čineći je posebno pogodnom za buduće 6G mreže koje zahtijevaju visoku učinkovitost i fleksibilnost u upravljanju resursima.



Slika 2.9. Primjena NOMA sa SIC tehnikom na strani korisničkog uređaja u silaznoj vezi [40]

Za razliku od ortogonalnih metoda višestrukog pristupa (engl. *Orthogonal Multiple Access, OMA*), koje različitim korisnicima dodjeljuju različite resurse kako bi izbjegle interferenciju, NOMA omogućuje višestrukim korisnicima dijeljenje istog RF resursa kroz dodjelu različitih razina snage prijenosa. Na strani predajnika, NOMA primjenjuje superpozicijsko kodiranje (engl. *superposition coding*), pri čemu se signal višestrukih korisnika superponira na istom frekvencijskom spektru, ali s različitim razinama snage (Slika 2.9.)

Na strani prijemnika, NOMA koristi tehniku sukcesivnog interferencijskog poništavanja (engl. *Successive Interference Cancellation, SIC*) za dekodiranje i odvajanje signala korisnika unutar istog ortogonalnog resursnog bloka. SIC postupak omogućuje prijemniku da prvo dekodira signal s većom alokacijom snage, zatim taj signal oduzme iz ukupnog primljenog signala, te potom dekodira signal s manjom alokacijom snage iz preostalog dijela (Slika 2.9). Ovaj proces omogućuje uspješno primanje oba signala čak i kada stižu istovremeno, jer uklanja interferenciju snažnijeg signala prije dekodiranja slabijeg [41]. Zahvaljujući ovoj tehnici, NOMA može učinkovito povećati kapacitet mreže i poboljšati performanse korisnika na rubu ćelije.

Slika 2.9. prikazuje primjenu NOMA u silaznoj vezi, gdje bazna postaja koristi superpozicijsko kodiranje za istovremeni prijenos signala korisnicima u centru ćelije (engl. *cell-center UE*) i korisnicima na rubu ćelije (engl. *cell-edge UE*) [40]. Korisnici u centru ćelije, koji su opremljeni SIC prijemnicima, dobivaju signal s manjom snagom jer su bliže baznoj postaji te koriste tehniku sukcesivne interferencijske supresije kako bi uklonili interferenciju signala korisnika na rubu ćelije, kojemu je dodijeljena veća snaga. Nakon uklanjanja interferencije, korisnici u centru ćelije dekodiraju vlastiti signal.

S druge strane, korisnici na rubu ćelije (Slika 2.9.) koji nemaju SIC prijemnik dekodiraju svoj signal izravno, tretirajući signal korisnika iz centra ćelije kao šum. To može rezultirati smanjenom kvalitetom prijema zbog interferencije. Unatoč tome, ovaj pristup omogućuje dijeljenje istih frekvencijskih resursa među više korisnika, čime se povećava spektralna učinkovitost i kapacitet mreže.

Prema istraživanju [42], primjena NOMA u budućim radio pristupnim mrežama može dovesti do trostrukog povećanja spektralne učinkovitosti u usporedbi s LTE sustavima, posebno kada se koristi zajedno s MIMO tehnologijama te kooperativnim tehnikama na više lokacija. Ovaj pristup omogućuje bolju iskorištenost spektra i značajno povećava kapacitet mreže bez potrebe za dodatnim frekvencijskim pojasevima, što čini NOMA posebno prikladnom za

buduće 6G mreže. Takve mreže zahtijevaju visoku učinkovitost i fleksibilnost u upravljanju resursima, što NOMA omogućuje svojim inovativnim neortogonalnim višestrukim pristupom prijenosnom mediju.

Standardizacija NOMA tehnike unutar 3GPP-a započela je s LTE *Release 13* specifikacijom, kroz metodu pod nazivom *Multi-User Superposed Transmission* (MUST), koja je bila fokusirana na silazne veze (DL). Proširenja za uzlazne veze (UL) dodana su u *Release 14* i u kasnijim specifikacijama [39]. Ove specifikacije omogućuju prijenos bez dodjele (engl. *grant-free transmission*), što smanjuje kašnjenje i poboljšava pouzdanost u mMTC i URLLC scenarijima [38]. Daljnji razvoj NOMA tehnologije usmjeren je na poboljšanje performansi i rješavanje izazova kao što su složenost SIC tehnike, točnost dekodiranja te upravljanje interferencijom. Trenutna istraživanja se fokusiraju na smanjenje složenosti i potrošnje energije SIC prijelnika te poboljšanje performansi u uvjetima velike gustoće korisnika [39].

Unutar 3GPP-a razmatraju se dodatne primjene NOMA tehnike, uključujući suradničku komunikaciju i prijenos u otvorenoj petlji (engl. *open-loop transmission*), koje omogućuju daljnje poboljšanje performansi mreže u uvjetima visoke pokretljivosti i heterogenih mrežnih konfiguracija [39]. Iako NOMA nije u potpunosti standardizirana u 5G mrežama, intenzivno se istražuje za širu primjenu u 5G Advanced i 6G mrežama, gdje se nastoje riješiti izazovi poput složenosti algoritama za obradu signala na strani prijelnika [43]. Daljnja standardizacija u 6G mrežama ovisit će o dodatnim istraživanjima i poboljšanjima.

NOMA se smatra ključnom tehnologijom za 6G mreže zbog svoje sposobnosti podržavanja masovne povezanosti, poboljšanja spektralne i energetske učinkovitosti te fleksibilnosti u raspodjeli resursa, posebno u scenarijima s velikim brojem uređaja poput IoT-a i aplikacija osjetljivih na kašnjenje, poput VR/AR [39]. Međutim, NOMA se suočava s izazovima poput potrebe za naprednim algoritmima za uparivanje raspodjelom resursa između korisnika, prilagodbom snage odašiljanja i smanjenjem interferencije. Istraživanja se stoga usmjeravaju na razvoj algoritama za optimizaciju resursa i primjenu umjetne inteligencije za adaptivnu kontrolu mrežnih parametara [44], [45], prilagođavajući tehnologiju specifičnim zahtjevima 6G mreža, uključujući nisko kašnjenje u prijenosu podataka i visoku pouzdanost.

2.3.4. Energetska učinkovitost i održivost budućih 6G mreža

Razvojem tehnologija bežičnih komunikacija prema 6G mrežama, energetska učinkovitost postaje ključan faktor za održivost i dugoročno funkcioniranje. Očekuje se da će 6G mreže pružiti značajna poboljšanja u brzini prijenosa podataka, kašnjenju u prijenosu

podataka te pouzdanosti, ali će također donijeti nove izazove u optimizaciji energetske potrošnje. Potreba za značajnim kompromisom između spektralne i energetske učinkovitosti, koji je dugo bio izazov u bežičnim komunikacijama, smanjit će se uvođenjem tehnologija za prikupljanje energije (engl. *energy harvesting*) iz okoliša. 6G mreže iskoristit će energiju iz radio valova, vibracija i solarnih izvora, smanjujući ovisnost o baterijama i povećavajući održivost uređaja. Osim toga, primjena inteligentnih površina, koje optimiziraju radijska okruženja, omogućit će učinkovitije rasprostiranje RF signala uz optimalnije korištenje RF spektra i energije.

Razvoj 6G mreža usmjeren je na zadovoljavanje sve veće potrebe za održivim i energetski učinkovitim komunikacijskim rješenjima. Jedno od ključnih područja fokusiranja je razvoj energetski osviještenih dizajna mreže koji uključuju napredne strategije upravljanja odašiljačkom snagom, poput dinamičke dodjele snage i adaptivne modulacije, kako bi se smanjila potrošnja energije uz održavanje optimalnih performansi mreže [4]. Nadalje, očekuje se da će 6G mreže integrirati zelene bazne postaje i ekološki prihvatljive antene koje koriste obnovljive izvore energije i uključuju inteligentne tehnike upravljanja energijom. Ove strategije, uključujući implementaciju energetski učinkovitih podatkovnih centara i infrastrukture za računarstvo u oblaku, značajno smanjuju energetski otisak telekomunikacijskih mreža, promičući održivost i smanjujući emisije ugljika [4].

Uz ove sveobuhvatne pristupe, specifične tehnologije također igraju ključnu ulogu u smanjenju potrošnje energije u 6G mrežama. Jedan od pristupa povećanju energetske učinkovitosti u 6G mrežama je korištenje komunikacije između uređaja (engl. *device-to-device*, *D2D*), koja može optimizirati potrošnju energije smanjenjem potrebe za prijenosom podataka preko baznih postaja. Istraživanja pokazuju da primjena D2D komunikacije uz upotrebu dinamičke klasterizacije i inteligentnog odlučivanja značajno poboljšava učinkovitost mreže i prilagodljivost sustava promjenjivim uvjetima, što doprinosi održivosti i dugoročnoj stabilnosti 6G mreža [46].

Pored toga, istraživanja usmjerena na buduće 6G mreže sugeriraju da bi prilagodba radijskih resursa, poput smanjenja broja aktivnih antena i prilagođavanja razina odašiljačke snage, mogla biti ključna za uštedu energije. Ova strategija potencijalno omogućuje učinkovitije korištenje resursa uz zadržavanje potrebnih performansi mreže, što je od presudne važnosti za održivost i učinkovitost 6G mreža [47].

Integracija AI i multi-agent sustava (engl. *multi-agent system, MAS*) također je od ključnog značaja za postizanje visoke energetske učinkovitosti budućih mobilnih mreža. Kombinacija ovih tehnologija omogućava inteligentno donošenje odluka u realnom vremenu, što smanjuje potrošnju energije i poboljšava performanse mreže, posebno u industrijskim IoT aplikacijama [48].

3. ENERGETSKA UČINKOVITOST MOBILNIH MREŽA

Do unazad petnaest godina, poboljšanje energetske učinkovitosti nije bilo u fokusu mobilnih operatora jer se velika pozornost poklanjala na osiguravanje kvalitete usluge, kapaciteta i prijenosnih brzina u mobilnim mrežama kao i osiguranje funkcionalnog rada mobilne mreže kroz brzu detekciju i otklanjanje kvarova [49]. Međutim, od sredine prošlog desetljeća energetska učinkovitost postala je jedno od ključnih pitanja u razvoju mobilnih mreža. To pitanje posebno je važno postalo u smislu potrebe za osiguranjem zahtjeve za prijenosom sve veća količina podataka i povećanjem broja povezanih uređaja. Budući da se svijet sve više oslanja na mobilne tehnologije, optimizacija potrošnje energije postaje neophodna za smanjenje operativnih troškova, poboljšanje održivosti i ispunjavanje ekoloških ciljeva.

Prema GSMA izvješću [50], ICT sektor doprinosi 1,4% globalnih emisija stakleničkih plinova i oko 4% globalne potrošnje električne energije. Očekuje se da će se taj udio povećati u budućnosti zbog kontinuiranog rasta potražnje za ICT uslugama i uređajima te ograničenih kapaciteta za korištenje obnovljivih izvora energije. Ispunjavanje ciljeva u borbi protiv klimatskih promjena zahtijeva od ICT sektora značajno smanjenje vlastitih emisija te omogućavanje velikih ušteda u drugim sektorima. Za smanjenje emisija ICT sektora, čak i uz pretpostavku stabiliziranih emisija, bio bi potreban snažan i koordiniran trud, uključujući trenutni razvoj politika i upravljanje u ICT sektoru. Bez ovog zajedničkog napora, čak i ako bi emisije ICT sektora ostale stabilne na razini iz 2020. godine tijekom narednih desetljeća, relativni udio ICT sektora u globalnim emisijama bi se povećao na više od trećine, jer bi ostali sektori smanjivali svoje emisije u skladu sa scenarijem ograničenja zagrijavanja na 1,5°C [51]. Stoga je ključno da ICT sektor preuzme aktivnu ulogu u smanjenju emisija i poboljšanju energetske učinkovitosti kako bi se izbjegao značajan porast njegovog udjela u globalnim emisijama CO₂. Posebno je važno raditi na razvoju energetski učinkovitih mreža i infrastrukture, kao i na integraciji obnovljivih izvora energije unutar ICT sektora.

Premda ICT industrija pridonosi globalnim emisijama ugljičnog dioksida, ona također pomaže u njihovom smanjenju u drugim sektorima. Prema analizi izvješća Global eSustainability Initiative (GeSI) SMARTer2030 [52], ICT sektor ostvaruje korist koja je 9,7 puta veća od njegove vlastite emisije ekvivalenta ugljičnog dioksida (CO₂e). Stoga bi povećanje upotrebe ICT sustava moglo pomoći u ravnoteži između očuvanja okoliša i gospodarskog rasta, postižući oba cilja. Unatoč pozitivnim predviđanjima, porast potražnje za

povezivanjem korisnika te količine podatkovnog prometa zahtijeva kontinuirano širenje postojećih ICT usluga i uvođenje inovativnih tehnologija. To dovodi do povećanja potrošnje energije i troškova, što postaje glavni problem za ICT sektor.

Mobilne mreže igraju ključnu ulogu u ICT sektoru, a energetska učinkovitost postala je jedno od najvažnijih pitanja u njihovom razvoju. Rastući zahtjevi za prijenosom podataka i sve veći broj povezanih uređaja stvaraju pritisak na energetske resurse, čineći optimizaciju potrošnje energije ključnom za smanjenje operativnih troškova, povećanje održivosti i postizanje ekoloških ciljeva. Prema istraživanjima, mobilna industrija trenutno doprinosi značajnom dijelu ukupnih emisija u ICT sektoru, s udjelom od približno 31% [50]. Jedan od pristupa povećanju energetske učinkovitosti je uvođenje 5G tehnologije, koja ima potencijal značajno smanjiti potrošnju energije po jedinici prenesenih podataka [53]. Međutim, ukupan utjecaj 5G mreža na emisije stakleničkih plinova bit će određivan načinom njihove implementacije, opsegom primjene naprednih tehnologija za upravljanje energijom te stupnjem integracije s obnovljivim izvorima energije.

Istraživanja pokazuju da optimizacija potrošnje energije tijekom rada baznih postaja, koje su glavni potrošači energije u mobilnim mrežama, može dovesti do značajnih ušteda [54]. Uvođenje tehnologija poput mMIMO i dinamičke alokacije resursa može značajno smanjiti potrošnju energije baznih postaja, a da pritom ne ugrozi kvalitetu usluge [55]. Osim tehničkih rješenja, razvoj politika i strategija za održivo upravljanje energetske resursima ključan je za smanjenje emisija mobilnih mreža.

3.1. Definicija energetske učinkovitosti

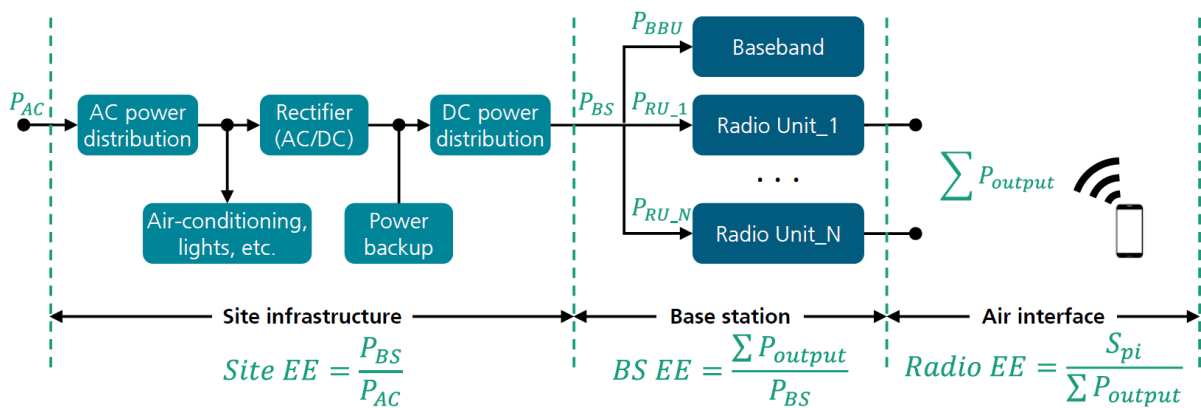
Energetska učinkovitost u mobilnim mrežama odnosi se na optimizaciju potrošnje energije pri pružanju usluga korisnicima, uz istodobno održavanje kvalitete usluge. Budući da se zahtjevi za mobilnim prometom i brzinom prijenosa podataka neprestano povećavaju, energetska učinkovitost postaje ključan aspekt dizajna i upravljanja modernim mobilnim mrežama, posebno u kontekstu 5G i budućih generacija mreža.

Energetska učinkovitost se općenito definira kao maksimalna količina bitova koja se može prenijeti po jedinici potrošnje energije, mjereno u bitovima po Jouleu (bit/J).

Optimizacijom potrošnje energije na svim razinama mreže, od osnovne radijske tehnologije do jezgrenih mreža i usmjernika, operatori mogu značajno smanjiti energetske troškove i doprinijeti održivosti mreže u dugoročnom smislu. Kroz primjenu energetske

učinkovitih rješenja, mobilne mreže mogu postići balans između visokih performansi i ekološke održivosti, što je ključno za budućnost telekomunikacijske industrije.

Informacije o ciljevima energetske učinkovitosti i mjerama koje se koriste za postizanje optimalne energetske učinkovitosti u 5G mrežama temelje se na preporukama i specifikacijama opisanim u standardu [56]. Ključne metrike za procjenu energetske učinkovitosti uključuju omjer između prenesenog volumena podataka i potrošene energije. Razmatraju se različiti scenariji za uštedu energije, poput djelomičnog ili potpunog isključivanja baznih postaja tijekom razdoblja niske potražnje za prijenosom podatkovnog prometa. Pored navedenoga, važno je upravljanje energetske stanjima mrežnih elemenata, pri čemu oni mogu biti prebačeni u stanje uštede energije ili ostati u punoj funkcionalnosti, ovisno o trenutnim prometnim zahtjevima i strategijama upravljanja energijom.



Slika 3.1. Pregled energetske učinkovitosti RAN dijela mreže [5]

3.2. Metrike energetske učinkovitosti RAN dijela mobilne reže

Sveukupna energetska učinkovitost sastoji se od tri faktora: učinkovitosti napajanja infrastrukture lokacije bazne postaje, učinkovitosti rada same bazne postaje i učinkovitosti odašiljanja radijskog sučelja bazne postaje [57]. Slika 3.1. prikazuje ovu strukturu i tipičnu opremu koja je uključena, te ilustrira tok energije od glavnog AC ulaza iz mreže, preko DC konverzije energije, isporuke do bazne postaje, pretvorbe u napajanje ormara od strane bazne postaje, te na kraju prijenos preko radijskog sučelja do korisničkog terminala.

Sveukupna energetska učinkovitost RAN dijela mreže prikazana je sljedećom relacijom [57]:

$$EP = \frac{P_{BS}}{P_{AC}} \times \frac{\sum P_{output}}{P_{BS}} \times \frac{S_{pi}}{\sum P_{output}} = \frac{S_{pi}}{P_{AC}} \quad (3.1.)$$

gdje je:

EP	energetska učinkovitost (engl. <i>energy performance</i>) cijelog sustava,
P_{BS}	ulazna istosmjerna snaga bazne postaje,
P_{AC}	ulazna izmjenična snaga lokacije,
$\sum P_{output}$	ukupna izlazna snaga svih antena na lokaciji,
S_{pi}	usluga koju pruža bazna postaja (npr. isporučeni bitovi ili broj korisnika).

Ovaj omjer tijekom određenog vremenskog razdoblja izražava se u megabitima po kilovatsatu (Mbit/kWh) ili megabitima po Jouleu (Mbit/J).

3.3. Standardizirane metrike energetske učinkovitosti

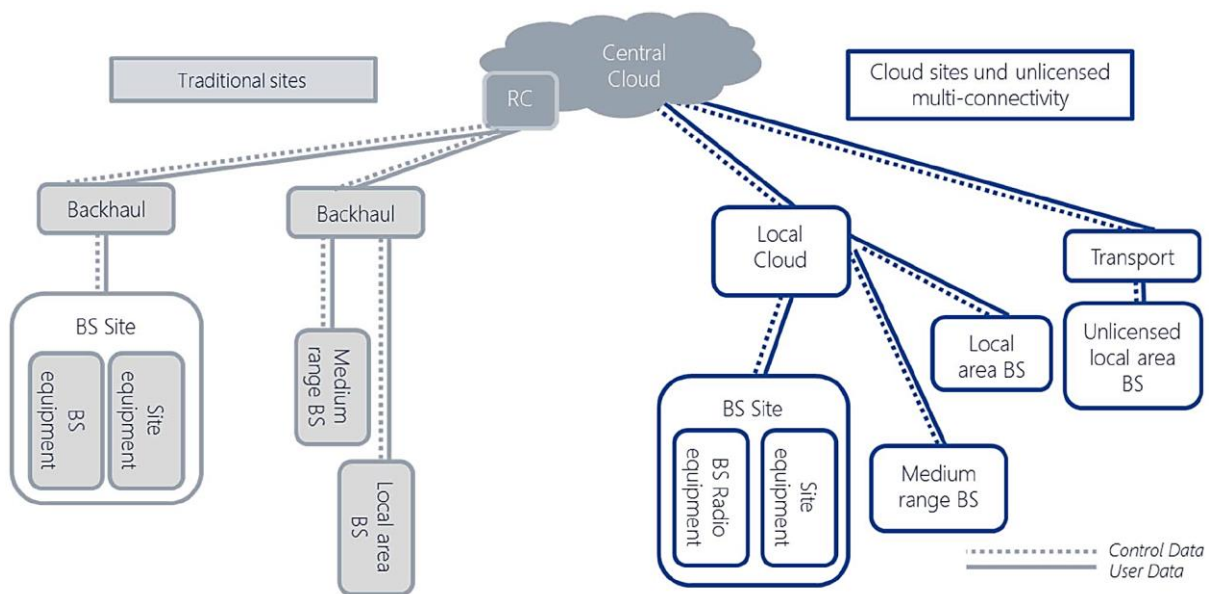
U prošlosti su se mobilni operatori prvenstveno bavili širinom pojasa, pokrivenošću i kašnjenjem u prijenosu podataka prilikom razvoja mrežne infrastrukture. Međutim, s rastućim ekološkim i ekonomskim razmatranjima, energetska učinkovitost mobilnih mreža postala je jedan od ključnih elemenata za razvoj mreža sljedeće generacije. Zbog održavanja kvalitete usluge, mobilni operatori moraju se prilagoditi rastućoj potražnji za prometom uzrokovanom porastom usluga visokog kapaciteta. Naglasak na uslugama visokog kapaciteta povećava energetske zahtjeve mreže, što uvodi kako ekološke, tako i ekonomske izazove. Stoga, u današnjem planiranju i operacijama mobilnih mreža, mobilni operatori moraju dati prednost energetske učinkovitosti kao ključnom pokazatelju uspješnosti, s obzirom na ekološke, financijske i operativne izazove [29].

3.3.1. Segmentacija mreže za procjenu energetske učinkovitosti

Potpuno i detaljno mjerenje potrošnje energije za cijelu mrežu unutar jedne države ili za cijelog mobilnog operatora često je nemoguće ili ekonomski neisplativo. Stoga se ukupna mreža dijeli na manji broj mreža ograničene veličine, tzv. „podmreže“. Ove podmreže definiraju se prema specifičnim karakteristikama, poput mreža ograničenih kapacitetom koje predstavljaju urbane (engl. *urban*) i gusto naseljene gradske mreže (engl. *dense urban*), prigradske mreže (engl. *suburban*) s visokim zahtjevima za pokrivenost i kapacitet te ruralne mreže (engl. *rural*) koje su obično ograničene zahtjevom za osiguranjem pokrivenosti sa signalom mobilne mreže.

Veličina i razmjer podmreža definiraju se na temelju različitih kriterija, poput topoloških, geografskih i demografskih granica. Dodatni čimbenici, kao što su klimatske zone, penetracija

operatora i vrste podatkovnog prometa, također mogu imati važnu ulogu u klasifikaciji i analizi pod mreža, omogućujući sveobuhvatniju procjenu energetske učinkovitosti. Ova segmentacija mreže omogućuje preciznije mjerenje i analizu energetske učinkovitosti, prilagođavajući se specifičnim uvjetima svake pod mreže, te omogućuje ekstrapolaciju rezultata na razini cijele mreže ili države.



Slika 3.2. Primjer topologije mreže za procjenu energetske učinkovitosti [3]

Pod mreže koje se analiziraju mogu se sastojati od baznih postaja samo makro razine ili heterogenih mreža, ovisno o stvarnoj implementaciji u praksi. Slika 3.2 prikazuje opći primjer mreže koja se promatra u svrhu procjene energetske učinkovitosti.

3.3.2. Parametri za ocjenu energetske učinkovitosti

Definiranje ključnih pojmova poput podatkovnog volumena (engl. *mobile data volume, DV*), površine pokrivenosti signalom (engl. *coverage area, CoA*) i potrošnje energije (engl. *energy consumption, EC*) važno je za izračun metrika energetske učinkovitosti mobilne mreže. Ovi pojmovi predstavljaju temelj za analizu i optimizaciju rada mreža, čime se omogućuje smanjenje njihovog utjecaja na okoliš.

Podatkovni volumen se odnosi na ukupnu količinu podataka koja se prenosi preko određenog dijela opreme mobilne mreže tijekom određenog vremena. Mjeri se u bitovima (bit) te uključuje prijenos podataka u oba smjera, prema korisniku (engl. *downlink*) i od korisnika (engl. *uplink*). Podatkovni volumen se definira kao volumen podataka koji isporučuje oprema

mobilne mreže koja je predmet ispitivanja tijekom vremenskog okvira T , u okviru procjene potrošnje energije. Ukupni podatkovni volumen može se izraziti relacijom:

$$DV_{MN} = \sum_{i,k} DV_{BS_{i,k}} \quad (3.2.)$$

gdje je:

- DV količina prenesenih podataka u mreži tijekom razdoblja mjerenja T ,
- i indeks koji obuhvaća broj lokacija,
- k indeks koji obuhvaća broj baznih postaja na i -toj lokaciji.

Područje pokrivenosti mobilne mreže odnosi se na prostor (izražen u km^2 ili m^2) u kojem mreža pruža usluge i evaluira se kroz tri ključna parametra. Prvi parametar je zemljopisno područje pokrivenosti (engl. *total geographical area of a country, CoA_geo*) koje označava ukupnu površinu gdje mobilni operator pruža uslugu prema licenčnom ugovoru. Drugi parametar je određeno područje pokrivenosti (engl. *designated coverage area, CoA_des*) koje predstavlja planirano područje pokriveno signalom prema mrežnom planu, uključujući unutarnje prostore zgrada. Ovo područje ovisi o snazi baznih postaja, uvjetima propagacije 5G signala i korištenim modelima planiranja. Treći parametar je kvaliteta pokrivenosti (engl. *coverage quality factor, CoA_Qdes*) koja ocjenjuje stvarno pokriveno područje unutar planiranog prostora, uzimajući u obzir stvarne performanse mreže, poput neuspjelih poziva, kako bi se procijenila učinkovitost i kvaliteta usluge. Ovi aspekti zajedno omogućuju sveobuhvatnu analizu i optimizaciju mrežne pokrivenosti.

Potrošnja energije odnosi se na ukupnu količinu energije koju troši mobilna mreža tijekom određenog vremenskog razdoblja. U kontekstu energetske učinkovitosti mobilne mreže, moguće je mjeriti potrošnju energije na razini svih komponenti mreže, uključujući bazne postaje, povratne veze (engl. *backhauling, BH*), infrastrukturu na lokacijama (engl. *site infrastructure, SI*) te kontrolne čvorove (engl. *control nodes*). Potrošnja energije izražava se u vatsatima (Wh) i mjeri se za svaku pojedinu mrežnu komponentu tijekom razdoblja mjerenja T . Ukupna potrošnja energije mreže (EC_{MN}) može se prikazati sljedećom relacijom:

$$EC_{MN} = \sum_i \left(\sum_k EC_{BS_{i,k}} + EC_{SI_i} \right) + \sum_m EC_{cells} + \sum_j EC_{BH_j} + \sum_l EC_{RC_l} + \sum_l EC_{CC_l} + \sum_l EC_{LC_l} \quad (3.3.)$$

gdje je:

- $EC_{BS_{i,k}}$ potrošnja energije k -te bazne postaje na i -toj lokaciji,

- EC_{SI_i} potrošnja energije infrastrukture lokacije na i -toj lokaciji,
- EC_{cells} potrošnja energije malih baznih postaja u mobilnoj mreži,
- EC_{BH_j} potrošnja energije j -te povratne veze koja osigurava vezu do baznih postaja,
- EC_{RC_l} potrošnja energije l -tog kontrolnog čvora mobilne mreže,
- EC_{CC_l} potrošnja energije l -tog centralnog oblaka (engl. *central cloud*) (Slika 3.2),
- EC_{LC_l} potrošnja energije l -tog lokalnog oblaka (engl. *local cloud*) (Slika 3.2),
- i indeks koji obuhvaća broj lokacija,
- j indeks koji obuhvaća broj opreme povratne veze povezane s i -tom lokacijom,
- k indeks koji obuhvaća broj baznih postaja na i -toj lokaciji,
- l indeks koji obuhvaća kontrolne čvorove mobilne mreže,
- m broj malih baznih postaja u mobilnoj mreži.

Ukupna potrošnja energije mreže može se mjeriti pomoću integriranih mjernih sustava ili vanjskih senzora za praćenje potrošnje energije opreme. Ovi sustavi prikupljaju podatke o potrošnji energije različitih mrežnih komponenti, uključujući bazne postaje, usmjernike i druge infrastrukturne elemente. Prikupljeni podaci analiziraju se kako bi se identificirali ključni izvori potrošnje energije i razvile strategije za optimizaciju energetske učinkovitosti.

3.3.3. Procjena energetske učinkovitosti mobilnih mreža

Za procjenu energetske učinkovitosti mobilnih mreža koriste se dvije standardizirane metrike [3]: podatkovna energetska učinkovitost mobilne mreže (engl. *Mobile Network Data Energy Efficiency*, $EE_{MN,DV}$) i energetska učinkovitost pokrivenosti mobilne mreže (engl. *Mobile Network Coverage Energy Efficiency*, $EE_{MN,CoA}$). Podatkovna energetska učinkovitost ($EE_{MN,DV}$) je omjer između količine prenesenih podataka i potrošnje energije u istom vremenskom razdoblju T . Izražava se u bitovima po Jouleu (bit/J) i računa se prema relaciji:

$$EE_{MN,DV} = \frac{DV_{MN}}{EC_{MN}} \quad (3.4.)$$

gdje je:

DV_{MN} količina prenesenih podataka,

EC_{MN} ukupnu potrošnju energije u istom razdoblju.

Energetska učinkovitost pokrivenosti ($EE_{MN,CoA}$) je metrika energetske učinkovitosti definirana kao omjer između područja pokrivenosti i godišnje potrošnje energije. Ova metrika je posebno korisna za mreže s niskim podatkovnim prometom, poput onih u ruralnim ili slabo naseljenim područjima i izražava se u kvadratnim metrima po Jouleu (m^2/J). Računa se prema formuli:

$$EE_{MN,CoA} = \frac{CoA_{desMN}}{EC_{MN}} \quad (3.5.)$$

gdje je:

CoA_{desMN} određeno područje pokrivanja,

EC_{MN} godišnja potrošnja energije.

Primjena ovih metrika također donosi izazove, jer zahtijeva precizno mjerenje potrošnje energije i prenesenih podataka u različitim dijelovima mreže. Dodatno, potrebno je uzeti u obzir varijacije u mrežnom prometu tijekom različitih vremenskih razdoblja i sezona, što može utjecati na točnost izračuna. Također, izravno mjerenje potrošnje energije na razini operatora često je otežano zbog strogih regulacija i ograničenih dozvola koje operatori nameću. U takvim slučajevima, simulacijski model može poslužiti kao praktično i učinkovito rješenje za procjenu energetske učinkovitosti mreže bez potrebe za izravnim mjerenjima. Unatoč tim izazovima, $EE_{MN,DV}$ i $EE_{MN,CoA}$ predstavlja operatorima kritične metrike koje su globalno standardizirane i prema kojima operatori trebaju osiguravati energetske održivosti i energetske optimizaciju performansi mobilnih mreža.

3.4. Ključni čimbenici energetske učinkovitosti

Energetska učinkovitost bežičnih mreža ovisi o raznim čimbenicima koji su prepoznati kao relevantni u istraživanju autora u radu [58]. Njihova analiza ukazuje na nekoliko ključnih područja koja značajno utječu na energetske učinkovitost bežičnih mreža, a to su: spektralna učinkovitost (engl. *Spectral Efficiency, SE*), varijacije prometa, kašnjenje, interferencija i topologija mreže. Ovi čimbenici su ključni za razumijevanje i poboljšanje energetske učinkovitosti bežičnih mreža, a njihovo prepoznavanje i analiza omogućuju razvoj učinkovitijih tehnologija i strategija za smanjenje potrošnje energije u mobilnim mrežama. Rad [58] pruža temeljitu analizu i uvid u ove čimbenike, što je od velikog značaja za daljnja

istraživanja i implementacije u području energetski učinkovitih bežičnih komunikacijskih mreža.

3.4.1. Spektralna učinkovitost

Spektralna učinkovitost se odnosi na sposobnost bežičnog komunikacijskog sustava da prenosi što više informacija preko zadanog frekvencijskog spektra. To je ključan parametar u istraživanju i razvoju bežičnih mreža, posebno zbog stalnog porasta zahtjeva za većim kapacitetom prijenosa podataka. Spektralna učinkovitost se mjeri kao količina podataka koja se može prenijeti po jedinici frekvencijskog spektra uz održavanje prihvatljive kvalitete usluge, a izražena je relacijom [59]:

$$\eta \approx \frac{R/B}{K} [\text{bit/s/Hz/ćeliji}] \quad (3.1.)$$

gdje je:

- R brzina prijenosa podataka,
- B širina pojasa,
- K veličina klastera.

Povećanje spektralne učinkovitosti može se postići kroz različite tehnike, uključujući prilagodbu brzine prijenosa, optimizaciju snage predajnika, te izbor odgovarajućih modulacijskih tehnika i veličina modulacijskih konstelacija [60]. Korištenjem naprednih modulacijskih shema i tehnika kodiranja, moguće je povećati broj bitova koji se mogu prenijeti po Hz spektra. Kontrola snage predajnika igra važnu ulogu u poboljšanju SE, jer smanjenje interferencije među sukanalima (engl. *co-channels*) omogućava učinkovitije korištenje dostupnog spektra [61], [62], [63]. Smanjenjem interferencije postiže se bolja kvaliteta signala, što omogućava prijenos više podataka preko istog frekvencijskog pojasa.

Tablica 3.1. Očekivana spektralna učinkovitost silazne veze [18]

Frekvencijski spektar	Širina pojasa	Antene	LTE (bps/Hz/ćeliji)	5G (bps/Hz/ćeliji)
Sub-1-GHz	10MHz FDD	2×2 MIMO	1,7	2,2
2GHz	20MHz FDD	4×4 MIMO	2,5	3,3
3,5GHz	100MHz TDD	mMIMO	6,3	10,4

Spektralna učinkovitost je mjerilo koliko učinkovito bežični sustav koristi dostupni frekvencijski spektar za prijenos podataka, a poboljšanje SE uključuje optimizaciju različitih parametara mreže i tehnologija kako bi se postigao veći prijenosni kapacitet uz minimalnu interferenciju. Spektralna učinkovitost za LTE i 5G značajno se razlikuje, s time da 5G pokazuje značajna poboljšanja (Tablica 3.1). U usporedbi s LTE sustavom koji koristi 2×2 MIMO antene, za koji se očekuje spektralna učinkovitost od 1,7 bit/s/Hz/čeliji, 5G može postići 30-65% veću učinkovitost. Dodatno, s 4×4 MIMO antenama, LTE postiže 50% bolje rezultate od 2×2, dok mMIMO donosi 150% poboljšanja za LTE. U konačnici, 5G s mMIMO tehnologijom i 100 MHz nosiocem može imati do šest puta veću spektralnu učinkovitost u odnosu na LTE [18].

3.4.2. Varijacije prometa mobilnih mreža

Promet u mobilnim mrežama značajno varira ovisno o vremenu dana i tjednu, što je povezano sa životnim stilovima korisnika. Na primjer, tijekom noći, glasovni pozivi su obično rjeđi nego tijekom dana, dok je podatkovni promet često veći zbog korištenja aplikacija koje zahtijevaju intenzivni prijenos podataka, poput društvenih mreža, pregledavanja Interneta, video streaminga u visokoj razlučivosti (HD) i videopoziva [58].

Većina popularnih aplikacija danas, poput platformi za društvene mreže, komunikacijskih aplikacija i usluga za razmjenu poruka, pokazuje obrasce prometa koji se razlikuju od tradicionalnog mobilnog prometa [64]. Podaci iz 2023. godine pokazuju da mobilne aplikacije za društvene mreže i razmjenu poruka značajno pridonose ukupnom mobilnom prometu [65]. Ove aplikacije često generiraju varijabilan promet, što može značajno opteretiti mrežu u određenim razdobljima. Prometni obrasci ovise o lokaciji, s vršnim prometom sredinom dana u urbanim područjima, dok u ruralnim područjima vršni promet nastupa u večernjim satima. Iako je ukupni promet veći u urbanim područjima, analiza mrežnih podataka pokazuje da je pojedinačni promet tijekom vršnih perioda najviši u prigradskim područjima, što predstavlja izazov za mrežnu infrastrukturu [66].

Ove varijacije u prometu zahtijevaju od mobilnih operatora da dinamički prilagođavaju svoje mrežne resurse kako bi osigurali optimalne performanse i minimalizirali zagušenja. To uključuje optimizaciju kapaciteta baznih postaja, učinkovito upravljanje resursima i primjenu naprednih tehnologija kako bi se osigurala visoka kvaliteta usluge unatoč promjenama u prometu [67], [68].

3.4.3. Kašnjenje

Primjena tehnika stavljanja u stanje mirovanja (engl. *sleep state*) RAN opreme mobilnih operatora kao što su primjerice bazne postaje u periodima malog ili u potpunosti izostalog prometa, može dovesti do problema s kašnjenjem u prijenosu podataka. Kada se određeni dijelovi mreže stavljaju u stanje mirovanja kako bi se smanjila potrošnja energije, to može uzrokovati povećanje kašnjenja prijenosa podataka u mreži, zbog vremena potrebnog za ponovno aktiviranje baznih postaja kada je to potrebno.

Negativni utjecaji na kašnjenje i performanse uzrokovani tehnikama mirovanja mogu se ublažiti podešavanjem određenih mrežnih atributa. Primjeri ovih atributa uključuju zaštitni interval i vrijeme histereze [58], [69], [70], [71]. Zaštitni interval odnosi se na vremenski period tijekom kojeg mreža može tolerirati kašnjenje prije nego što ponovno aktivira baznu postaju, dok vrijeme histereze predstavlja vremenski period koji se koristi za izbjegavanje čestih promjena stanja bazne postaje između aktivnog i mirovanja. Prilagođavanjem ovih parametara, moguće je smanjiti negativne učinke na kašnjenje, dok se i dalje postiže značajna ušteda energije. Optimizacija vremena histereze i zaštitnog intervala može osigurati balans između energetske učinkovitosti i mrežnih performansi, smanjujući kašnjenje bez značajnog kompromisa u uštedi energije.

3.4.4. Interferencija

Postavljanje baznih postaja s malom pokrivenošću koje se karakteriziraju kao male ćelije (engl. *small cells*) može uzrokovati značajnu interferenciju među ćelijama u mobilnoj mreži, što je posebno izraženo u gusto naseljenim urbanim sredinama. Kada se implementiraju male ćelije (poput mikro, piko i femto ćelija) u heterogenim mrežama, upravljanje interferencijom postaje ključno za osiguranje optimalnih performansi i energetske učinkovitosti heterogene mobilne mreže [72].

Interferencija se javlja kada više baznih postaja ili ćelija rade na sličnim ili istim frekvencijama, što dovodi do smetnji u prijenosu signala. U urbanim sredinama, gdje je gustoća baznih postaja i korisnika visoka, ovaj problem postaje još izraženiji. Interferencija može degradirati kvalitetu usluge, povećati kašnjenje i smanjiti ukupnu propusnost mreže, što rezultira lošijim korisničkim iskustvom.

Prema radu [73], upravljanje interferencijom u modernim mobilnim mrežama postaje sve složenije s uvođenjem novih tehnologija poput milimetarskih valova, masivnog MIMO-a i

dinamičkog *time division duplex*-a (TDD), koje uvode nove oblike interferencije. Ove tehnologije, premda donose značajna poboljšanja u kapacitetu i pokrivenosti, također stvaraju izazove u upravljanju interferencijom, posebno u heterogenim i gusto naseljenim mrežnim okruženjima.

Učinkovito upravljanje interferencijom ne samo da poboljšava performanse mreže, već također doprinosi značajnim uštedama energije. Smanjenjem smetnji, bazne postaje mogu raditi s nižom snagom prijenosa, što direktno smanjuje potrošnju energije i poboljšava ukupnu energetska učinkovitost mreže. Budući da mreže postaju sve složenije s napredovanjem prema 5G i dalje (engl. *beyond 5G*), bitno je razviti i primijeniti napredne tehnike upravljanja interferencijom kako bi se osigurala optimalna ravnoteža između performansi i energetske učinkovitosti.

3.4.5. Topologija mreže

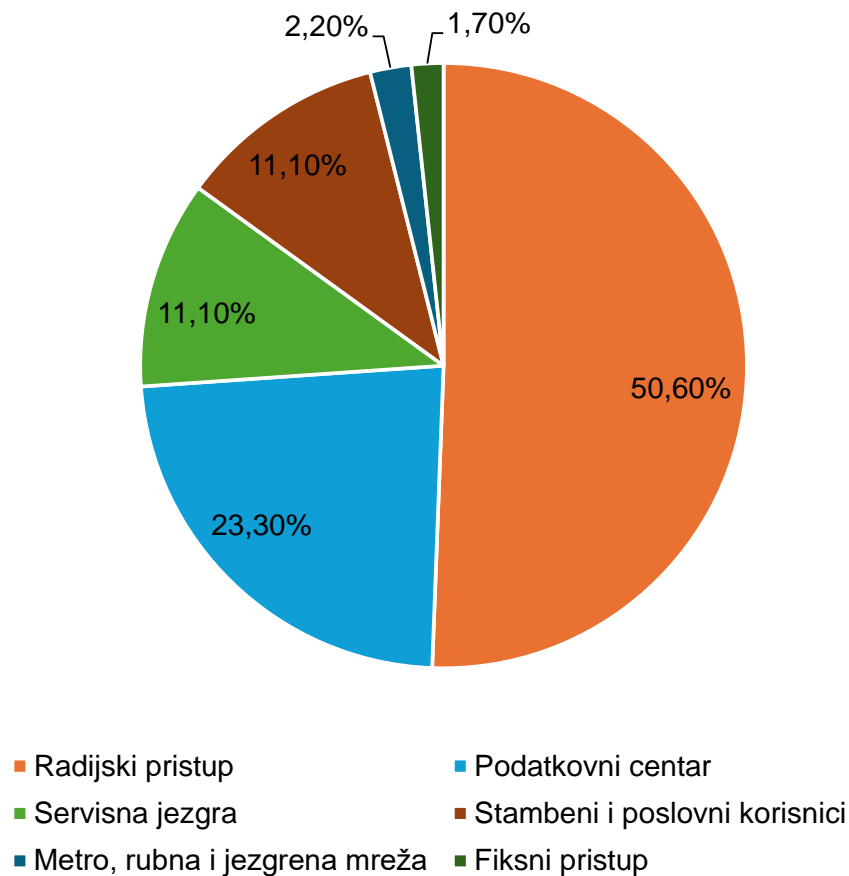
Topologija mreže, koja prikazuje geometrijske veze između baznih postaja i povezanih uređaja, ima značajan utjecaj na energetska učinkovitost bežičnih komunikacijskih sustava [58]. Nepravilnosti u postavljanju baznih postaja s obzirom na položaj mobilnih korisnika mogu rezultirati povećanom potrošnjom energije zbog potrebe za dodatnim resursima za održavanje stabilnih veza i pokrivenosti. Promjene u rasporedu baznih postaja i položaju korisnika stvaraju kompleksne izazove u uvjetima stohastičke geometrije i složenih bežičnih kanala. Stohastička geometrija omogućuje modeliranje i analizu mrežnih topologija koje nisu ravnomjerno raspoređene, što je čest slučaj u stvarnim urbanim i ruralnim okruženjima. Ovi izazovi zahtijevaju dodatna istraživanja kako bi se identificirale optimalne konfiguracije koje mogu maksimizirati energetska učinkovitost mreže [74].

Osim toga, složeni bežični kanali s različitim razinama interferencije, refleksije i apsorpcije signala također utječu na performanse mreže. Razumijevanje i modeliranje ovih faktora ključno je za optimizaciju energetske učinkovitosti kroz prilagodbu topologije mreže. Učinkovito pozicioniranje baznih postaja može smanjiti potrebu za visokim odašiljačkim snagama baznih postaja i poboljšati ukupnu pokrivenost mreže, čime se povećava energetska učinkovitost.

3.5. Energetska učinkovitost baznih postaja

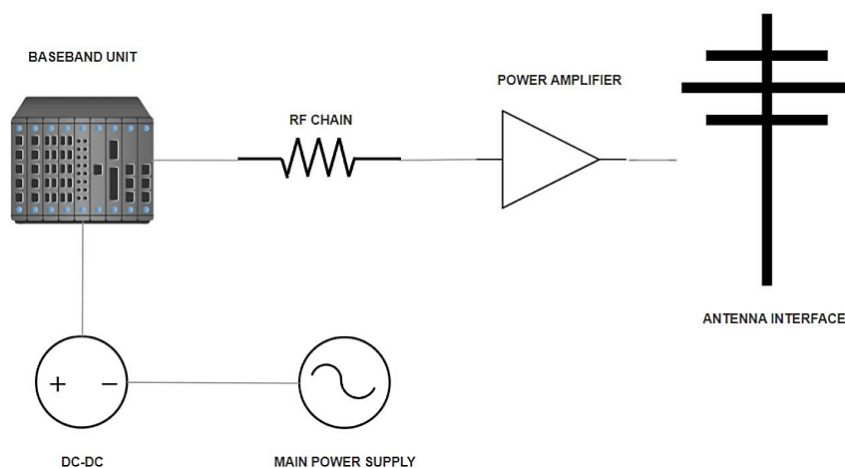
Bazne postaje unutar radijske pristupne mreže (RAN) mobilnih operatora ističu se kao glavne komponente, kako po broju, tako i po potrošnji energije [75]. Njihova značajna

prisutnost dovodi do znatnog doprinosa ukupnoj potrošnji energije telekomunikacijskih sustava, što odražava njihovu ključnu ulogu u energetsom profilu mreže. Studija u [76] naglašava da je radijska pristupna mreža (RAN), posebno bazne postaje, glavni potrošač energije u mobilnim mrežama, odgovorna za 57% ukupne potrošnje energije.



Slika 3.3. Raspodjela potrošnje energije po mrežnim elementima 2025. [77]

Prema radu [77], do 2025. godine, s ekspanzijom 5G mobilnih mreža, radijska pristupna mreža ostat će najveći potrošač energije u mreži telekom operatora koji nudi fiksne i mobilne usluge, s udjelom od približno 50,6% (Slika 3.3.) u ukupnoj potrošnji energije mobilnog operatora. Stoga se većina napora za poboljšanje energetske učinkovitosti u mobilnim mrežama usredotočuje upravo na bazne postaje.



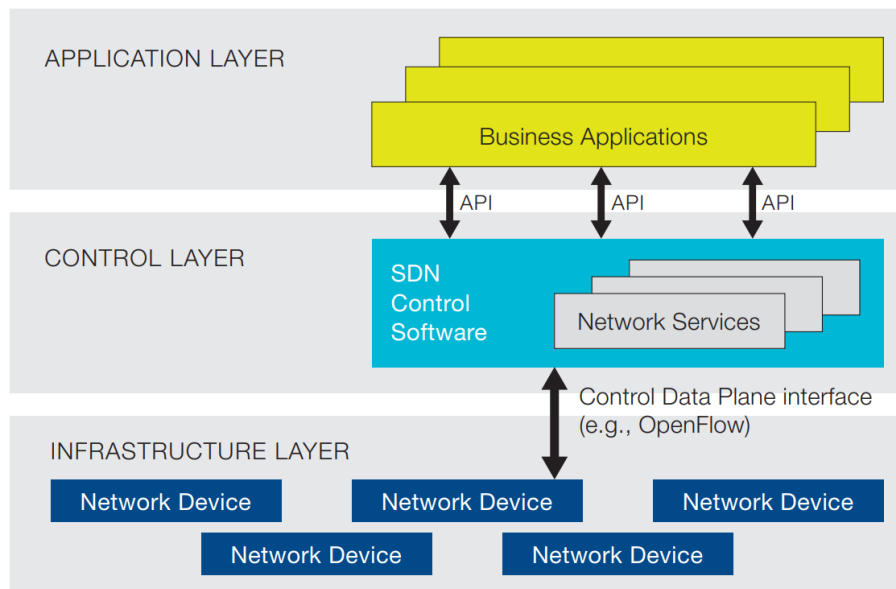
Slika 3.4. Generičke komponente bazne postaje [78]

Konvencionalna bazna postaja sastoji se od šest različitih komponenti (Slika 3.4.): sučelje antene, radiofrekvencijsko (engl. *radio-frequency*, *RF*) pojačalo, radiofrekvencijski lanac, jedinice za obradu signala (engl. *Baseband Unit*, *BBU*), DC-DC napajanje te glavno napajanje [78]. Pri ocjenjivanju funkcija i arhitektura baznih postaja, njihova se potrošnja energije može podijeliti u tri glavne kategorije [79]: odašiljačka snaga (engl. *transmission power*), računalna snaga (engl. *computation power*) i dodatna energija. Odašiljačka snaga odnosi se na energiju koju koriste RF pojačala i RF lanci za pretvaranje signala osnovnog pojasa (engl. *baseband signals*) u bežične radijske signale, uključujući snagu potrošenu na prijenosnicima (engl. *feeders*). Računalna snaga uključuje energiju koju BBU jedinice troše na digitalnu obradu signala, upravljanje baznom postajom i komunikaciju s jezgrenom mrežom. Dodatna energija pokriva sve ostale energetske zahtjeve bazne postaje, uključujući gubitke pri pretvaranju električne energije iz mreže (engl. *grid*) u primarno napajanje te gubitke nastale tijekom prijenosa između različitih DC-DC pretvarača. Za neke vrste, poput makro baznih postaja, to uključuje i aktivne sustave hlađenja, dok male ćelijske bazne postaje često nemaju potrebu za hlađenjem koje troši energiju.

Nadalje, ukupna potrošnja energije lokacije bazne postaje (engl. *base station site*) sastoji se od fiksnih i promjenjivih komponenti, pri čemu oko jedne četvrtine ukupne potrošnje energije otpada na fiksne dijelove, poput klimatizacije i napajanja, koji troše energiju čak i kada bazna postaja ne opslužuje promet. Također, svaka bazna postaja mora odašiljati pilot signale (engl. *pilot signals*) za oglašavanje postojanja mrežnog signala korisnicima, uspostavu poziva i sinkronizaciju, čak i kada nema aktivnih korisnika [58]. Korištenjem tehnika mirovanja, tehnologije malih ćelija i poboljšanja u dizajnu fizičkog sloja, poput naprednih modulacijskih tehnologija te MIMO tehnologija, može se značajno smanjiti preostala potrošnja energije [58].

3.6. Utjecaj SDN tehnologije na poboljšanje energetske učinkovitosti

Softverski definirano umrežavanje (engl. *Software Defined Networking, SDN*) predstavlja inovativnu mrežnu arhitekturu koja se temelji na odvajanju podatkovne, upravljačke i aplikacijske ravnine mreže. Ova podjela omogućuje odvajanje funkcija prosljeđivanja podataka (podatkovna ravnina) od funkcija upravljanja prometom i donošenja odluka (upravljačka ravnina), čime mreža postaje direktno programabilna. Slika 3.5. prikazuje konceptualnu SDN arhitekturu. Aplikacijska ravnina, smještena iznad upravljačke, omogućuje implementaciju mrežnih politika i aplikacija koje upravljaju mrežom kao jedinstvenim logičkim entitetom. Ovakva arhitektura omogućuje centraliziranu kontrolu mreže putem SDN kontrolera, čime se pojednostavljuje upravljanje mrežnim uređajima, koji više ne moraju samostalno obrađivati složene protokole, već izvršavaju upute dobivene od kontrolera [80].



Slika 3.5. Konceptualni prikaz SDN arhitekture s centraliziranim upravljanjem [80]

U SDN arhitekturi kontrola mreže centralizirana je unutar softverski baziranih SDN kontrolera (slika 3.5), koji omogućuju cjelokupan pregled mreže. Mreža se aplikacijama i sustavima za upravljanje politikama prikazuje kao jedinstvena cjelina, što operatorima omogućuje upravljanje cijelom mrežom s jedne centralne točke, neovisno o proizvođaču. Ovaj pristup znatno pojednostavljuje dizajn i rad mreže te smanjuje složenost mrežnih uređaja, koji više ne moraju obrađivati složene protokole, već samo slijede upute dobivene od SDN kontrolera. Time se ne samo povećava fleksibilnost i brzina reakcije na promjene u prometu,

već se također optimizira energetska učinkovitost, što je od posebne važnosti u kontekstu 5G mreža s rastućim brojem povezanih uređaja.

SDN tehnologija često se koristi zajedno s konceptom virtualizacije mrežnih funkcija (engl. *Network Function Virtualization, NFV*), koji omogućuje pokretanje mrežnih funkcija kao što su usmjeravanje i prospajanje (engl. *switching*) na općim poslužiteljskim platformama umjesto na specijaliziranom hardveru. Kombinacija SDN-a i NFV-a omogućuje dinamičko skaliranje mrežnih resursa prema potrebi, čime se dodatno smanjuju energetske troškovi [81]. Ova integracija je ključna u 5G mrežama, gdje rastući zahtjevi za performansama i niskom potrošnjom energije postavljaju nove izazove za mrežnu infrastrukturu.

Autori u radu [82] razvili su model optimizacije raspodjele energije u 5G mrežama koristeći kombinaciju SDN i NFV tehnologija. Njihov pristup povećava učinkovitost korištenja energije dok osigurava visoku kvalitetu usluge. Analiza njihovog optimizacijskog modela pokazala je kako se naprednim algoritmima može postići značajno poboljšanje energetske učinkovitosti, što je presudno za dugoročnu održivost 5G mreža. Tijekom migracije mobilnih mreža na arhitekture koje kombiniraju SDN i NFV, optimizacija usmjeravanja i postavljanja mrežnih funkcija može rezultirati značajnom uštedom energije. Na primjer, autori u radu [83] procjenjuju da se energetska potrošnja može smanjiti čak do 70% u određenim scenarijima, što ovu tehnologiju čini izuzetno učinkovitom za prijelazne faze između postojećih i novih mreža.

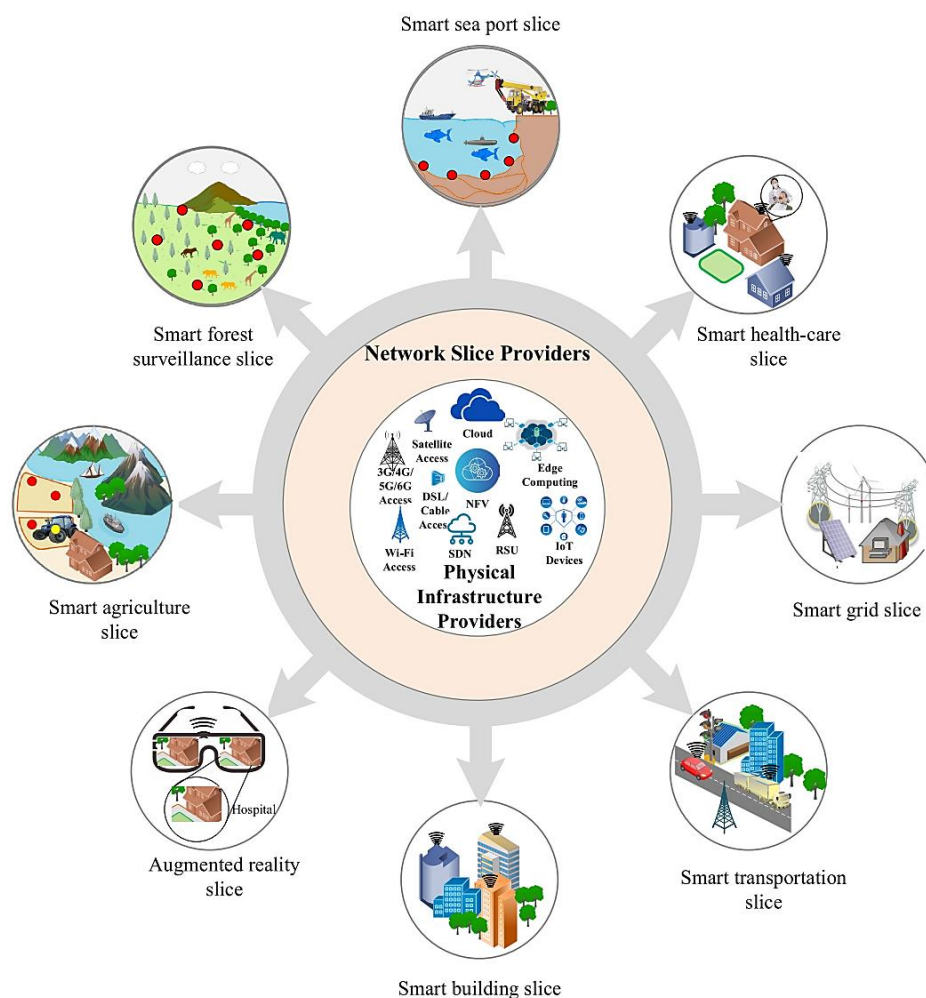
Dodatno, istraživanje u radu [84] bavi se primjenom SDN tehnologije u heterogenim 5G mrežama s naglaskom na sigurnost i inteligentno upravljanje resursima. Njihov model optimizacije performansi mreže kroz primjenu SDN-a pokazuje značajno smanjenje potrošnje energije po čvoru, što doprinosi održivosti budućih 5G sustava. Studija [85] istražuje hibridne arhitekture koje integriraju SDN i *Software Defined Radio (SDR)* unutar NFV okvira. Rezultati istraživanja pokazuju da se dodatna ušteda energije od 20% može postići fleksibilnom alokacijom CPU resursa i optimizacijom procesa unutar cloud-baziranih sustava, u usporedbi s tradicionalnim pristupima. Time se dodatno potvrđuje važnost inovativnih tehnoloških rješenja za postizanje energetske učinkovitosti i održivih mobilnih mreža nove generacije.

Integracija SDN tehnologije u mobilne mreže predstavlja značajan korak naprijed u postizanju energetske učinkovitosti u 5G mrežama. Korištenjem centraliziranog upravljanja, dinamičke alokacije resursa i naprednih algoritama za optimizaciju mrežnih operacija, SDN omogućuje značajne uštede energije uz zadržavanje visoke razine performansi i kvalitete usluge. Daljnji razvoj i primjena SDN-a u kombinaciji s drugim tehnologijama, poput NFV-a i

strojnog učenja, otvorit će nove mogućnosti za dodatnu optimizaciju, čime će se smanjiti energetska potrošnja mobilnih mreža i osigurati njihova održivost u budućnosti.

3.7. Optimizacija energetske učinkovitosti primjenom tehnologije mrežnog rezanja

Mrežno rezanje (engl. *network slicing*) omogućuje stvaranje logičkih mrežnih segmenata ili odsječaka (engl. *network slice, NS*) prilagođenih specifičnim zahtjevima korisnika i aplikacija, što omogućuje optimizirano korištenje mrežnih resursa i poboljšanje energetske učinkovitosti. U 5G i budućim 6G mrežama, mrežno rezanje postaje ključna tehnologija za podršku različitim scenarijima upotrebe, uključujući eMBB, URLLC i masivni Internet stvari (engl. *massive Internet of Things, mIoT*) (Slika 3.6), gdje je energetska učinkovitost od iznimne važnosti zbog sve većih zahtjeva za smanjenjem potrošnje energije i ekološkog otiska [86].



Slika 3.6. Pregled tehnologije mrežnog rezanja u omogućavanju pametnih usluga [87]

Mrežno rezanje omogućuje operatorima dijeljenje fizičke infrastrukture između različitih logičkih odsječaka, od kojih svaki može biti prilagođen specifičnim zahtjevima korisnika

(Error! Reference source not found..) Ova sposobnost omogućuje optimizaciju korištenja resursa, smanjenje prekomjerne potrošnje energije i poboljšanje ukupne energetske učinkovitosti mreže [86].

Nadalje, mrežno rezanje pruža mogućnost realizacije mreže kao uslugu (engl. *networks-as-a-service*), čime se značajno proširuju mogućnosti u odnosu na prethodne generacije mobilnih mreža [87]. Temeljne tehnologije za postizanje ove fleksibilnosti su NFV i SDN, koje omogućuju centralizirano upravljanje mrežnim resursima i prilagodbu mreže specifičnim potrebama korisnika i aplikacija [88]. Kako se mreže razvijaju, dinamička alokacija resursa postaje ključna za optimizaciju performansi i smanjenje potrošnje energije, osobito u uvjetima visokog prometa. NFV i SDN osiguravaju učinkovito upravljanje mrežnim kapacitetima i prilagodbu trenutnim uvjetima, smanjujući potrošnju energije u manje zahtjevnim scenarijima, što značajno doprinosi energetskej učinkovitosti.

Dodatno, ove tehnologije omogućuju da različite industrijske vertikale i usluge **(Error! Reference source not found..)** dijele istu fizičku mrežnu infrastrukturu, prilagođavajući resurse specifičnim zahtjevima svake usluge. Time se optimiziraju performanse i energetska učinkovitost, što omogućuje pružanje raznovrsnih usluga, od onih s niskom latencijom do onih s visokim zahtjevima za podatkovnim prometom, bez ugrožavanja performansi. Ovaj cjeloviti pristup ključan je za ostvarenje 5G i budućih 6G mreža kao platformi koje podržavaju raznolike usluge [89].

4. OPTIMIZACIJA POTROŠNJE ENERGIJE

Optimizacija potrošnje energije u bežičnim komunikacijskim mrežama predstavlja jedan od ključnih izazova suvremene telekomunikacijske industrije. S obzirom na sve veću potražnju za bežičnim uslugama te ubrzani porast broja povezanih uređaja, energetska učinkovitost postaje kritični faktor za održivost i ekonomičnost mrežnih operacija [90]. Prema procjenama prikazanim u [91], [92], radijska pristupna mreža (RAN) zauzima najveći udio u ukupnoj potrošnji energije mobilne mreže, što je čini glavnim fokusom istraživanja u cilju smanjenja potrošnje energije, odnosno poboljšanja energetske učinkovitosti.

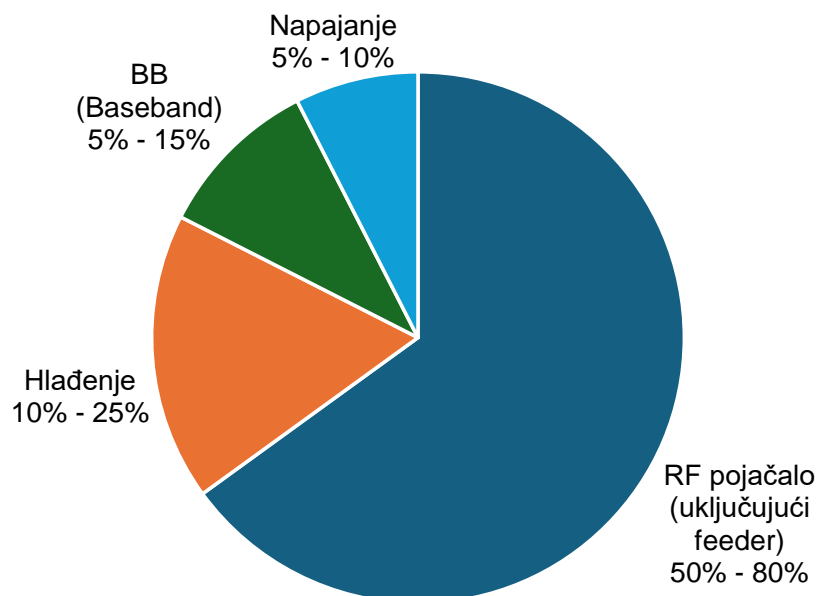
Energetska učinkovitost u RAN-u može se postići kroz različite pristupe, uključujući optimizaciju hardvera, uvođenje energetski učinkovitih algoritama i protokola, te korištenje naprednih tehnika upravljanja resursima. Različite strategije kao što su dinamičko upravljanje resursima, optimizacija odašiljačke snage i implementacija malih ćelija (engl. *small cells*) već su pokazale značajan potencijal u smanjenju energetske potrošnje. Sveobuhvatni pregled tehnika i strategija poboljšanja energetske učinkovitosti u bežičnim komunikacijskim mrežama nove generacije obuhvaća analizu ključnih elemenata dizajna s naglaskom na bazne postaje kao najveće potrošače energije [93].

Tablica 4.1. Usporedba strategija za energetski učinkovite mobilne mreže [94]

Strategija uštede energije	Primjer	Prednosti	Ograničenja
Poboljšanje rada pojedinačnih komponenti	Poboljšani dizajn pojačala snage; BBU jedinica te ponovni odabir i relokacija BS-a	Značajne uočene uštede, jednostavno i intuitivno	Postoje ograničenja u poboljšanjima, visoki troškovi zamjene hardvera
Tehnike mirovanja	Selektivno prebacivanje dijelova ili cijele BS u stanje mirovanja	Velike uštede energije, jednostavno i jeftinije za testiranje i implementaciju	Kompromis između performansi i uštede, trenutni modeli nisu dovoljno precizni
Optimizacija radio prijenosa i resursa	Kognitivna radio transmisija, kooperativno odašiljanje, MIMO	Niski troškovi, raznolika primjena	Kompromis između performansi i uštede, pogreške zbog neizvjesnosti
Implementacija mobilne mreže	Mješoviti makro, mikro, piko i femto-ćelijski rasporedi BS-ova	Niski troškovi implementacije, usmjereno na korisnika, potencijalno velike uštede	Uvodi nove probleme poput interferencije
Napajanje obnovljivim izvorima energije	Usvajanje obnovljivih izvora energije poput solarne, vjetrene i hidroenergije za napajanje lokacija BS-ova	Dugoročno rješenje za BS-ove izvan mreže	Visoki troškovi zamjene i ograničeni učinci za postojeće BS-ove priključene na mrežu

U svrhu postizanja energetske učinkovitosti u mobilnim mrežama, primjenjuju se različite strategije uštede energije. Prema radu [94] ove strategije obuhvaćaju poboljšanja na razini hardverskih komponenti, primjenu tehnika mirovanja (engl. *sleep mode*), optimizaciju odašiljačke snage (engl. *transmit power*), različite pristupe implementaciji novih mrežnih elemenata (baznih postaja) te korištenje obnovljivih izvora energije (Tablica 4.1.). Svaka od ovih strategija ima svoje specifične prednosti, ali i ograničenja. U nastavku je prikazana usporedba ovih pristupa, uz primjere njihove primjene, kao i ključne prednosti i izazove s kojima se susreću prilikom implementacije.

4.1. Optimizacija energetske učinkovitosti komponenata baznih postaja



Slika 4.1. Distribucija potrošnje unutar bazne postaje [54]

Energetska učinkovitost baznih postaja ključna je za smanjenje ukupne potrošnje energije mobilnih mreža, posebno s obzirom na rastuće zahtjeve koje nameću 5G mreže. Optimizacija energetske učinkovitosti na razini baznih postaja obuhvaća niz ključnih komponenti (Slika 4.1), od kojih su najvažnije radiofrekvencijska pojačala (engl. *radio frequency power amplifier, RF PA*) i jedinice za obradu signala. RF pojačala su odgovorna za najveći udio potrošnje energije unutar baznih postaja jer se koriste za pojačavanje signala do razine potrebne za njegov prijenos prema korisnicima. BBU jedinice, s druge strane, upravljaju obradom i digitalizacijom signala prije nego što se oni prenesu na RF razinu, te su ključne za osiguranje učinkovite komunikacije između baznih postaja i mobilnih uređaja. Iako su njihovi zadaci različiti, obje komponente

moгу značajno doprinijeti ukupnoj potrošnji energije bazne postaje i stoga predstavljaju u praksi glavne elemente bazne postaje za optimizaciju potrošnje energije.

Osim optimizacije na hardverskoj razini, energetska učinkovitost baznih postaja može se dodatno poboljšati primjenom naprednih softverskih tehnika i algoritama koji omogućuju inteligentno upravljanje mrežnim resursima. Također, primjena strojnog učenja i drugih metoda umjetne inteligencije može omogućiti prilagodbu radnih parametara u stvarnom vremenu, čime se dodatno povećava učinkovitost upravljanja potrošnjom energije mobilne mreže. Kroz integraciju naprednih tehnologija i pristupa, optimizacija energetske učinkovitosti na razini pojedinačnih komponenti baznih postaja ne samo da smanjuje potrošnju energije, već može omogućiti telekom operatorima da udovolje rastućim zahtjevima za održivošću, istovremeno osiguravajući visoku kvalitetu usluge i dugoročnu operativnost mreža nove generacije.

4.1.1. Radiofrekvencijska pojačala

Radiofrekvencijska pojačala predstavljaju jednu od najvažnijih komponenti bazne postaje u pogledu optimizacije potrošnje energije jer njihova potrošnja energije značajno nadmašuje potrošnju drugih dijelova sustava. Osnovna funkcija RF PA je pojačavanje radijskog signala do razine snage potrebne za prijenos signala prema prijemuniku emitiranjem RF signala u prostor [95]. Performanse RF PA izravno utječu na učinkovitost cijelog odašiljača, što čini ovu komponentu ključnom za optimizaciju energetske učinkovitosti u 5G mrežama. S obzirom na rastuće zahtjeve za većom energetsom učinkovitošću i smanjenjem troškova, istraživanje u ovom području postaju sve važnija. Istraživanje u radu [96] detaljno ispituje razvojne trendove RF PA, uključujući globalizaciju razvoja PA, međuinstitucionalnu suradnju kod primjene PA, te inovacije u arhitekturi PA. Ovakav kombinirani pristup razvoju RF PA doprinosi bržem napretku i poboljšanju tehnologije za 5G bežične komunikacijske sustave.

Performanse RF PA izravno utječu na učinkovitost svakog odašiljača, stoga nova 5G mobilna mreža zahtijeva nove arhitekture PA s poboljšanom učinkovitošću bez ugrožavanja linearnosti PA. Studija prikazana u radu [97] je usredotočena na inovativne dizajne RF PA koji rješavaju izazove odašiljanja na višim frekvencijama i s većim širinama frekvencijskog pojasa uz potrebu za osiguranjem veće energetske učinkovitosti baznih postaja u 5G mrežama. Ove arhitekture naglašavaju uporabu *Doherty* pojačala, praćenja omotnice (engl. *envelope tracking, ET*) i tehnika predistorzije kako bi se poboljšala linearnost i smanjila potrošnja energije PA. Evolucija RF PA arhitektura odražava potrebu za uravnoteženjem performansi, troškova i energetske učinkovitosti u bežičnim komunikacijskim sustavima nove generacije.

Uz tradicionalne tehnike optimizacije, sve veći interes privlače i napredne metode poput korištenja umjetne inteligencije. Naime, u kontekstu optimizacije energetske učinkovitosti RF PA u 5G mrežama, rad [98] predstavlja inovativan pristup korištenjem dubokih neuronskih mreža (engl. *deep neural networks, DNN*) za kompenzaciju nelinearnosti i memorijskih efekata pojačala. U radu je predložen okvir za učenje u kojem DNN preuzima ulogu modeliranja karakteristika pojačala te generiranja digitalne predistorzije (engl. *digital predistortion, DPD*) kako bi se smanjili negativni efekti nelinearnosti i širenja spektra (engl. *spectral regrowth*). Ovaj pristup rezultirao je značajnim poboljšanjima u odnosu na tradicionalne metode, uključujući smanjenje širenja spektra za 34% u slučajevima teških distorzija. Učinkovitost ovog pristupa čini ga ključnim za unapređenje energetske učinkovitosti baznih postaja u 5G mrežama.

4.1.2. Jedinice za obradu signala

Jedinice za obradu signala (BBU) su ključne komponente bazne postaje koje upravljaju obradom signala i digitalnom komunikacijom između bazne postaje i mobilnih uređaja. BBU jedinice obrađuju podatke prije nego što se oni pretvore u radijske frekvencije i prenesu putem antena. Zbog svoje složenosti i stalne aktivnosti, energetska učinkovitost BBU jedinica postaje kritična za smanjenje ukupne potrošnje energije baznih postaja, osobito u kontekstu mreža nove generacije.

Tehnologija polja programabilnih logičkih sklopova (engl. *Field Programmable Gate Array, FPGA*) igra ključnu ulogu u optimizaciji energetske učinkovitosti BBU jedinica koje sadrže FPGA sklopove. FPGA tehnologija omogućuje ubrzavanje specifičnih zadataka obrade podataka i signala uz fleksibilnost da se konfiguracija mijenja prema potrebama. Upotreba FPGA tehnologije omogućava dinamičku rekonfiguraciju i paralelnu obradu, čime se optimizira potrošnja energije tijekom različitih radnih uvjeta i prilagođava rad prema trenutnim potrebama mreže. Ova tehnologija doprinosi značajnom smanjenju potrošnje energije unutar BBU jedinica, što je osobito važno u arhitekturama poput *Cloud-Radio Access Network (C-RAN)* sustava, gdje je energetska učinkovitost od presudne važnosti [23], [99].

Ključne tehnike za povećanje energetske učinkovitosti BBU jedinica uključuju dinamičko skaliranje napona i frekvencije (engl. *Dynamic Voltage and Frequency Scaling, DVFS*) i dinamičko upravljanje napajanjem (engl. *Dynamic Power Management, DPM*) [93]. DVFS tehnika omogućuje prilagodbu napona i frekvencije procesora prema trenutnim potrebama obrade podataka, smanjujući potrošnju energije kada su zahtjevi za procesnim resursima niski.

DPM tehnika s druge strane, prebacuje procesor u stanje mirovanja kada nije aktivan, čime dodatno smanjuje potrošnju energije. Kombinacija ovih tehnika optimizira resurse BBU jedinica, osobito u uvjetima promjenjivog prometa, što je ključno za smanjenje operativnih troškova i ugljičnog otiska opreme korištene u mobilnim mrežama.

Na softverskoj razini, napredni algoritmi za upravljanje resursima i prediktivno prilagođavanje resursa prema očekivanom prometu mogu dodatno poboljšati energetske učinkovitost BBU jedinica [100], [101], [102]. Primjena strojnog učenja omogućava prilagodbu radnih parametara u stvarnom vremenu, na temelju analize povijesnih podataka i trenutnih uvjeta u mreži. Ovi algoritmi omogućuju inteligentno upravljanje rada BBU jedinica, što rezultira optimizacijom potrošnje energije i poboljšanjem ukupne energetske učinkovitosti baznih postaja.

Tablica 4.2. Pregled tehnika mirovanja i njihovih osnovnih metoda

Reference	Osnovne metode	Opis
[103]	Povezivanje korisnika, raspodjela resursa	Optimizacija povezivanja korisnika s baznim postajama radi smanjenja potrošnje energije i održavanja kvalitete usluge tijekom mirovanja.
[104], [105]	Automatizirano upravljanje, prilagodba konfiguracija baznih postaja	Automatizirano upravljanje mrežnim resursima bez ljudske intervencije, podržavajući način mirovanja i optimizaciju energetske učinkovitosti.
[106]	Prilagodba snage odašiljanja, veličina ćelija	Prilagođavanje veličine ćelija u skladu s prometnim uvjetima, podešavanjem snage odašiljanja kako bi se smanjila potrošnja energije i poboljšala učinkovitost mreže.
[107]	Predikcija prometa, prilagodba stanja mirovanja	Korištenje povijesnih podataka za predviđanje budućih prometnih obrazaca i optimizaciju stanja mirovanja baznih postaja.
[108], [109], [110], [111], [112]	Različite vrste baznih postaja, suradnja baznih postaja, optimizacija energetske učinkovitosti	Primjena tehnika mirovanja u mrežama koje se sastoje od različitih vrsta baznih postaja radi optimizacije energetske učinkovitosti i održavanja visoke kvalitete usluge.
[113]	Kooperativne komunikacije, upravljanje snagom, isključivanje baznih postaja, održavanje kvalitete usluge	Primjena kooperativnih strategija između baznih postaja kako bi se optimizirala energetska učinkovitost. Selektivno isključivanje baznih postaja tijekom perioda niskog prometa i preusmjeravanje prometa na preostale aktivne postaje omogućuje uštede energije bez narušavanja kvalitete usluge.

4.2. Ušteda energije korištenjem tehnika mirovanja

Načini mirovanja omogućuje komponentama mreže, poput cijelih ili dijelova baznih postaja, da prijeđu u stanje niske potrošnje energije kada nije potrebno da rade sa punim

kapacitetom raspoloživih resursa [114]. Ove tehnike, koja omogućuje značajno smanjenje potrošnje energije isključivanjem neiskorištenih resursa baznih postaja, što postaje ključno za smanjenje energetske potrošnje, posebno u razdobljima niskog prometa u određenim dijelovima mobilne mreže [115], [116]. S obzirom na rastuće zahtjeve za energetske učinkovitost u mrežama nove generacije, primjena tehnika mirovanja postaje sve važnija.

Različiti tehnike (Tablica 4.2.) mogu se koristiti za implementaciju načina mirovanja u baznim postajama. Autori u radu [94] ističu nekoliko ključnih pristupa, uključujući različite metode povezivanje korisnika (engl. *user association*) s mrežom, samoorganizirajuće mreže, zumiranje ćelija (engl. *cell zooming*) te predikciju prometa uz implementaciju heterogenih mreža (Tablica 4.2.). Uspješna primjena ovih tehnika zahtijeva koordinaciju između baznih postaja, omogućujući preusmjeravanje resursa s baznih postaja koje ulaze u mirovanje na susjedne aktivne bazne postaje. Kontroler baznih postaja igra ključnu ulogu u ovom procesu, osiguravajući prijenos resursa radio kanala i održavanje potrebne kvalitete usluge. Međutim, kod svake od primjena optimizacije potrošnje energije tehnikama mirovanja, važno je praćenje omjer signala i šuma (engl. *signal-to-noise ratio*, *SNR*) na korisničkim i mrežnim uređajima, jer varijacije mogu utjecati na korisničko iskustvo, osobito u scenarijima visokog opterećenja [113].

Kada dijelovi ili cjelokupne bazne postaje prelaze u mirovanje, korisnici se preusmjeravaju na aktivne bazne postaje kako bi se osigurala kontinuirana pokrivenost i izbjeglo pogoršanje kvalitete usluge. Optimalno povezivanje korisnika, koje se temelji na njihovim lokacijama, kvaliteti primljenog signala i prometnom opterećenju, ključno je za učinkovitost režima mirovanja [103]. SON koncept predstavljen u tehničkoj specifikaciji [117] omogućuje automatsko upravljanje mrežom i prilagodbu konfiguracija baznih postaja bez ljudske intervencije. Ovaj pristup ne samo da podržava način mirovanja, već i poboljšava predikciju lokacija korisnika i optimizaciju mreže, što rezultira povećanjem energetske učinkovitosti [104], [105].

Koncept zumiranja ćelija sličan je konceptu SON-a, ali nudi višu razinu fleksibilnosti. Ovo je tehnika na razini mrežnog sloja koja prilagođava veličinu ćelije u skladu s prometnim uvjetima podešavanjem nagiba i visine antene ili snage odašiljanja signala [106], [118]. Za razliku od uključivanja i isključivanja baznih postaja, ovaj pristup omogućuje fleksibilnije upravljanje prometnim opterećenjem i smanjenje potrošnje energije. Kada promet u određenoj ćeliji poraste, njezina se odašiljačka snaga može povećati kako bi se povećao kapacitet i

izbjegla zagušenja, dok susjedne prometom manje opterećene ćelije, mogu smanjivati svoju odašiljačku snagu i na taj način doprinosti uštedi energije mreže. Ako je potrebno, može doći do isključenja dijela ili cijele bazne postaje, što čini zumiranje ćelija generalizacijom načina mirovanja baznih postaja [94].

Predikcija prometa ključna je za uspješno upravljanje mirovanjem baznih postaja. Na temelju povijesnih podataka, bazne postaje mogu predvidjeti buduće prometne obrasce, omogućujući im preciznije prilagodbe stanja mirovanja. Ova tehnika pomaže u održavanju točnosti predikcija i prilagodbi na promjenjive uvjete u mreži. Korištenje metoda koje kombiniraju prostorne i vremenske podatke omogućuje mrežama da precizno predviđaju promet i optimiziraju potrošnju energije, što rezultira učinkovitijim upravljanjem mrežnim resursima i značajnim uštedama energije [107].

Tehnike mirovanja osobito su učinkovite u ultra-gustim heterogenim mrežama koje se sastoje od različitih vrsta baznih postaja [119]. Generalno gledajući, heterogene mreže su energetski učinkovitije od mreža koje se oslanjaju isključivo na makro bazne postaje, zbog niže potrošnje energije malih baznih postaja [108]. Međutim, iako male bazne postaje (mikro, piko i femto) imaju znatno nižu potrošnju energije u usporedbi s makro baznim postajama, njihov broj u heterogenim mrežama novih generacija je višestruko veći. Ova velika količina manjih baznih postaja može znatno povećati ukupnu potrošnju energije cjelokupne mreže [109]. Stoga je primjena tehnika mirovanja od ključne važnosti jer omogućuje dinamičko isključivanje neaktivnih baznih postaja tijekom razdoblja niskog prometa, čime se postiže značajna ušteda energije unatoč velikom broju baznih postaja [114], [116].

Različite studije istražuju strategije mirovanja za optimizaciju potrošnje energije u mrežama, pri čemu se posebna pažnja posvećuje očuvanju kvalitete usluge. Jedan od pristupa uključuje konfiguriranje načina mirovanja baznih postaja u ultra-gustim mrežama, gdje se selektivnim isključivanjem baznih postaja tijekom razdoblja niskog prometa može značajno smanjiti potrošnja energije je prikazan u [110]. Izazovi takvog pristupa se ogledaju u ispunjavanju zahtjeva koji se odnose na pažljivo upravljanje povezivanjem korisnika i pravednom raspodjelom mrežnih resursa. Dodatno, kolaborativne sheme za heterogene mreže predlažu suradnju makro i mikro baznih postaja u cilju optimizacije uštede energije uz minimalan utjecaj na korisničko iskustvo, koristeći predvidljivost potražnje za uslugama [111]. Upotreba algoritama temeljenih na Markovljevom modelu također se pokazala učinkovitom u

ponovnom raspoređivanju korisnika i alokaciji resursa kada određene bazne postaje prelaze u način mirovanja, što dodatno poboljšava energetske učinkovitost mreže [112].

Primjena tehnika mirovanja u kombinaciji s naprednim algoritima i koordinacijom između baznih postaja omogućuje smanjenje potrošnje energije uz očuvanje visoke kvalitete usluge. Kao rezultat, mreže postaju održivije, fleksibilnije i prilagođene sve složenijim uvjetima 5G i budućih 6G mreža.

Tablica 4.3. Pregled recentnih istraživanja o optimizaciji energetske učinkovitosti baznih postaja uz primjenu tehnika mirovanja i strojnog učenja

Referenca	Fokus istraživanja	Pristup/metoda	Rezultati
[120]	Optimizacija potrošnje energije u ultra-gustim mrežama uz 5G zahtjeve	Strojno učenje za upravljanje načinima mirovanja baznih postaja	Smanjenje potrošnje energije putem isključivanja ključnih komponenti, uključujući RF pojačala i komponente za obradu digitalnog signala; optimizacija potrošnje energije ovisno o prometu i zahtjevima za kašnjenjem
[121]	Optimizacija potrošnje energije i dijeljenja energije među malim baznim postajama koje se napajaju obnovljivim izvorima energije	Strojno učenje (<i>Imitation Learning, Q-Learning, Deep Q-Learning</i>)	Smanjenje potrošnje energije iz mreže od 31% do 58% u stambenim zonama i od 34% do 68% u uredskim zonama; smanjenje operativnih troškova do 35% u stambenim i 44% u uredskim zonama nakon 10 godina
[122]	Optimizacija energetske potrošnje baznih postaja u 5G mrežama uz očuvanje kvalitete usluge	Q-learning algoritam za višerazinsku strategiju mirovanja (engl. <i>Advanced Sleep Mode, ASM</i>)	Smanjenje potrošnje energije putem postupnog deaktiviranja komponenti baznih postaja; određivanje optimalnih vrijednosti za kompromis između potrošnje energije i kvalitete usluge; značajno smanjenje potrošnje energije pri niskom opterećenju
[123]	Optimizacija energetske učinkovitosti u bežičnim mrežama kroz upravljanje baznim postajama	Strojno učenje za predviđanje aktivacije baznih postaja po principu uključena/isključena bazna postaja i povezivanja korisnik-bazna postaja	Pristup štedi 99% vremena optimizacije; predviđa nekritične bazne postaje koje se mogu uključivati/isključivati i asocijacije korisnika sa baznim postajama za poboljšanje energetske učinkovitosti mreže
[124]	Optimizacija energetske potrošnje baznih postaja uz istovremeno očuvanje okoliša	Primjena strojnog učenja i tehnika GWO za optimalno upravljanje mirovanja baznih postaja s ciljem uštede energije	Značajno smanjenje potrošnje energije baznih postaja kroz kombinaciju GWO, AI i procedura mirovanja; optimizacija energetske učinkovitosti u bežičnim mrežama
[125]	Primjena tehnika strojnog učenja za poboljšanje energetske učinkovitosti u 5G i 6G mrežama	Pregled tehnika strojnog učenja za optimizaciju rada mreže i smanjenje potrošnje energije	Identificirane metode strojnog učenja koje mogu značajno doprinijeti smanjenju energetske potrošnje i podržati održivi razvoj 5G i 6G mreža

4.2.1. Optimizacija načina mirovanja upotrebom umjetne inteligencije

Strojno učenje, kao dio šireg područja primjene umjetne inteligencije (engl. *artificial intelligence, AI*), nudi značajan potencijal za poboljšanje energetske učinkovitosti baznih postaja pomoću optimizacije načina mirovanja dijelova ili cijelih baznih postaja. Različite tehnike (Tablica 4.3.), poput pojačanog učenja (engl. *reinforcement learning*) i neuronskih mreža (engl. *neural networks*), omogućuju precizno predviđanje vremena kada bazne postaje mogu biti stavljene u način mirovanja bez narušavanja kvalitete usluge.

U kontekstu smanjenja potrošnje energije u ultra-gustim mrežama (engl. *ultra-dense network, UDN*) s 5G zahtjevima, korištenje tehnika strojnog učenja pokazalo se vrlo učinkovitim. U radu [120] predloženo je rješenje koje koristi upravljanje načinima mirovanja baznih postaja primjenom pojačanog učenja kako bi se postigao optimalan balans između energetske učinkovitosti i kvalitete usluge. Kroz različite razine mirovanja moguće je isključiti ključne komponente baznih postaja, uključujući RF pojačala te komponente za obradu digitalnog signala (engl. *digital baseband*), čime se postižu značajne uštede energije, posebno u scenarijima s niskim opterećenjem prometa. Ovaj pristup omogućava prilagodbu potrošnje energije ovisno o trenutnom prometu i zahtjevima za kašnjenjem, čime se optimizira rad baznih postaja u 5G mrežama.

Studija u radu [121] koristi različite tehnike strojnog učenja (kao što su engl. *Imitation Learning, Q-Learning* i *Deep Q-Learning*) te predlaže sustav za optimizaciju načina mirovanja i dijeljenje energije među malim baznim postajama napajanim obnovljivim izvorima energije. Imitacijsko učenje (engl. *Imitation Learning*) omogućuje modelima da uče oponašajući odluke stručnjaka. Q-učenje (engl. *Q-Learning*) je metoda pojačanog učenja u kojoj agent uči optimalnu strategiju kroz interakciju s okolinom, dok duboko Q-učenje (engl. *Deep Q-Learning*) primjenjuje duboke neuronske mreže za donošenje odluka u složenim okruženjima. Rezultati pokazuju značajne uštede energije i smanjenje operativnih troškova, što ovu strategiju čini pogodnom za buduće mreže s visokim energetske zahtjevima.

Dodatno, autori u radu [122] su pokazali da *Q-learning* pristup optimizira napredne načine mirovanja baznih postaja 5G mreža, omogućujući inteligentno deaktiviranje komponenti baznih postaja na temelju dinamike prometnog opterećenja, čime se značajno smanjuje potrošnja energije. Studija u radu [123] koristi neuronske mreže za predviđanje koje bazne postaje mogu biti isključene, a koje korisničke veze treba premjestiti na druge aktivne bazne postaje, čime se postiže slična učinkovitost kao kod matematičke optimizacije, ali uz mnogo

manju računalnu složenost i vrijeme izvođenja. Također, kombinacija algoritama strojnog učenja s tehnikama kao što je GWO (engl. *Grey Wolf Optimizer*) pokazuje izvrsne rezultate u smanjenju potrošnje energije baznih postaja kada se koristi za upravljanje procedurama mirovanja baznih postaja [124]. Strojno učenje omogućuje prilagodljive operativne načine rada i optimalno raspoređivanje resursa, što može rezultirati značajnim povećanjem energetske učinkovitosti baznih postaja u sve složenijim mrežnim uvjetima 5G i budućih 6G mreža [125].

4.3. Optimizacija radio prijenosa i resursa

Optimizacija radio prijenosa i uporabe radio resursa bazne postaje ključna je za postizanje energetske učinkovitosti i poboljšanje performansi u suvremenim mobilnim mrežama. Glavni cilj ovih optimizacija jest smanjiti potrošnju energije bazne postaje uz maksimizaciju učinkovitosti korištenja radio frekvencijskog spektra.

Tablica 4.4. Sažetak ključnih tehnika i izazova u optimizaciji radio prijenosa i resursa

Reference	Područje	Ključne značajke
[126], [127], [128], [129], [130]	Optimizacija odašiljačke snage	Temeljne tehnike uključuju kontrolu snage i dinamičku prilagodbu odašiljačke snage baznih postaja, što rezultira značajnim energetskim uštedama. Napredni pristupi koriste duboko učenje za predviđanje omjera signala prema šumu i interferenciji.
[126], [130], [131], [132], [133], [134], [135]	MIMO i mMIMO tehnologija	MIMO koristi višestruke antene za istodobni prijenos više signala, čime povećava kapacitet mreže i smanjuje potrošnju energije. Optimizacija odašiljačke snage u mMIMO sustavima ključna je za energetski učinkovite 5G mreže.
[136], [137], [138], [139], [140], [141], [142]	Kognitivni radio i kooperativne tehnike	Kognitivni radio omogućuje inteligentnu prilagodbu prijenosnih parametara prema spektralnim uvjetima. Suradničko prosljeđivanje smanjuje potrebu za visokim prijenosnim snagama, dok dinamička alokacija resursa optimizira upotrebu spektra.
[143], [135], [142]	Inovativne mrežne arhitekture	Masovno distribuirani sustavi antena s optičkim vlaknima te primjena dubokog učenja u mMIMO sustavima i heterogenim sustavima baziranim na računarstvu u oblaku (engl. <i>heterogeneous cloud radio access network, H-CRAN</i>) poboljšavaju raspodjelu snage i resursa, smanjuju interferenciju i potrošnju energije, te povećavaju energetske učinkovitost.

Optimizacije potrošnje energije se mogu postići prilagodbom odašiljačke snage signala baznih postaja, optimizacijom alokacije resursa te konfiguracijom mreže prema trenutačnim uvjetima i zahtjevima korisnika (Tablica 4.4.) [144]. Optimizacija odašiljačke snage ključan je aspekt energetske učinkovitosti u mobilnim mrežama, a njezino postizanje obuhvaća niz naprednih pristupa za upravljanje radio prijenosom i resursima mobilne mreže. Među tim pristupima ističe se MIMO tehnologija, koja omogućuje povećanje kapaciteta mreže uz

istovremeno smanjenje potrošnje energije. Kognitivni radio (engl. *cognitive radio*, CR) dodatno pridonosi energetske učinkovitosti inteligentnim prilagođavanjem snage i resursa prema frekvencijskim spektralnim uvjetima. Suradničko prosljeđivanje (engl. *cooperative relaying*) omogućuje raspodjelu prijenosa podataka među više korisničkih uređaja koji su u mogućnosti izravno bežično komunicirati, smanjujući potrebu za prijenosnim snagama odašiljanim na visokim odašiljačkim snagama. Nadalje, tehnike poput kanalnog kodiranja i dinamičke alokacije resursa osiguravaju optimalnu upotrebu spektra, minimizirajući energetske gubitke.

Optimizacija radio prijenosa i resursa u suvremenim bežičnim mrežama suočava se s nizom izazova koji zahtijevaju pažljivo balansiranje između različitih aspekata mrežnih performansi. Iako ove tehnike mogu značajno poboljšati energetske učinkovitost i iskorištavanje spektra, često su povezane s kompromisima. U uvjetima visokog opterećenja mreže, optimizacija može dovesti do degradacije kvalitete usluge ili povećanog kašnjenja u prijenosu podataka [130]. Također, promjene u prijenosnoj snazi i korištenju spektra mogu uzrokovati neželjene učinke na susjedne ćelije, potencijalno narušavajući njihov podatkovni kapacitet i propusnost [145]. Stoga je ključno osigurati da implementacija ovih tehnika bude pažljivo upravljana kako bi se postigla optimalna ravnoteža između energetske učinkovitosti i pouzdanosti mreže, bez negativnog utjecaja na korisničko iskustvo. U konačnici, daljnje istraživanje i razvoj ovih tehnika mogu značajno doprinijeti smanjenju energetske potrošnje u budućim telekomunikacijskim mrežama.

4.3.1. Optimizacija odašiljačke snage

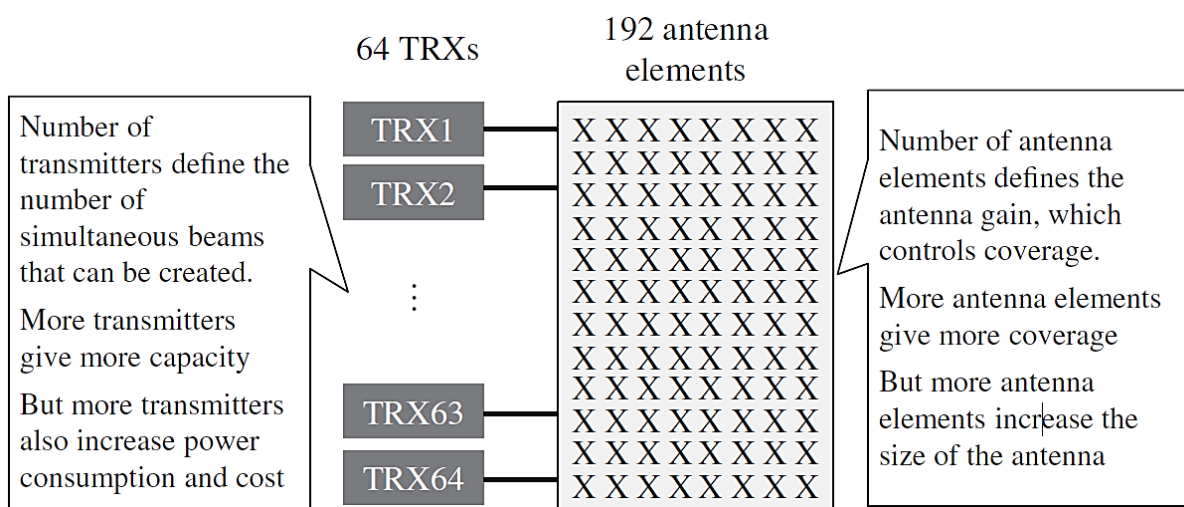
Optimizacija potrošnje energije kroz kontrolu razine odašiljačke snage (engl. *transmit power*) bazne postaje predstavlja temeljnu tehniku za optimizaciju prijenosa podataka u radio pristupnom (RAN) dijelu mreže, kojom se odašiljačka snaga prilagođava dometu, pokrivenosti i količini korisničkih uređaja u području koje odašiljanjem signala pokriva određena bazna postaja [126]. Napredniji oblik ovog pristupa, dinamička prilagodba odašiljačke snage, dodatno poboljšava učinkovitost kontinuiranim optimiziranjem razine odašiljačke snage u realnom vremenu, prilagođavajući se trenutnom broju korisnika i prometnom opterećenju u mreži [127]. Ove tehnike su posebno učinkovite u urbanim sredinama, gdje je prosječna udaljenost korisnika od bazne postaje manja, a količina podatkovnog prometa veća. Važno je naglasiti da ova rješenja ne zahtijevaju nadogradnju hardverskih komponenti bazne postaje, čime se olakšava sama praktična implementacija.

Napredni pristupi zasnovani na primjeni umjetne inteligencije (AI), poput kontrole odašiljačke snage temeljene na dubokom učenju, uvode novu dimenziju u optimizaciju odašiljačke snage. Rad [128] predlaže mehanizam koji koristi vremenske serije za predviđanje omjera signala prema šumu i interferenciji (engl. *signal to interference & noise ratio*, SINR) te prilagođava prijenosnu snagu kako bi se postigla minimalna potrošnja energije uz održavanje potrebne kvalitete usluge. Ovaj pristup pokazao je značajne uštede energije u uvjetima promjenjivog mrežnog opterećenja, što je ključno za dugoročnu održivost mobilnih mreža.

Optimizacija odašiljačke snage također ima ključnu ulogu u D2D komunikaciji. Korištenje teorije nesuradničkih igara (engl. *non-cooperative game theory*) i frakcijskog programiranja za optimizaciju alokacije snage u D2D komunikaciji, omogućuje znatno smanjenje potrošnje energije uz održavanje minimalne kvalitete usluge [129]. Ovaj pristup je od ključne važnosti za održavanje visokih performansi i energetske učinkovitosti u budućim 5G mrežama.

4.3.2. Upotreba MIMO tehnologije

MIMO tehnologija odašiljanja signala koristi višestruke ulazne i izlazne antene za istodobni prijenos više nezavisnih signala preko istog spektralnog opsega, čime se značajno povećava kapacitet mreže bez potrebe za dodatnim frekvencijskim resursima. Korištenjem prostorne raznolikosti, MIMO tehnologija poboljšava pouzdanost prijenosa podataka i smanjuje potrošnju energije, omogućujući učinkovit prijenos u okruženjima s visokom gustoćom prometa. Studija [126] pokazuje da kombinacija standardnih i kooperativnih MIMO tehnika može omogućiti značajne uštede energije bez ugrožavanja performansi mobilne mreže.



Slika 4.2. Principi masivnog MIMO-a s više predajnika i više antena [18]

Nadalje, mMIMO (Slika 4.2.) predstavlja evoluciju MIMO tehnologije, koristeći stotine antena za dodatno povećanje kapaciteta i energetske učinkovitosti mreže. mMIMO omogućuje bolju prilagodbu signala specifičnim korisnicima i uvjetima, čime se dodatno poboljšava ukupna kvaliteta usluge, posebno u okruženjima s izrazito visokom gustoćom prometa. Slika 4.2. prikazuje odnos između broja primopredajnika (engl. *transceiver*, *TRX*) i kapaciteta u mMIMO sustavu. Veći broj TRX-ova povećava kapacitet mreže, ali također povećava potrošnju energije i troškove, čime se ilustrira ključni kompromis u dizajnu mMIMO sustava. Optimizacija odašiljačke snage unutar mMIMO sustava ključna je za postizanje energetske učinkovitosti u modernim 5G mrežama. Autori u radu [130] predlažu model temeljen na *Zero-Forcing (ZF) beamforming* tehnologiji, koji prilagođava odašiljačku snagu baznih postaja prema uvjetima kanala unutar MIMO sustava. Ovaj pristup omogućuje značajno smanjenje potrošnje energije uz održavanje kvalitete usluge.

Daljnja istraživanja fokusirana su na optimizaciju odašiljačke snage baznih postaja u MIMO sustavima temeljenu na nesavršenim informacijama o stanju kanala (engl. *Imperfect CSI*). Autori u radu [132] predlažu algoritam temeljen na adaptivnoj optimizaciji rojem čestica (engl. *particle swarm optimization*, *PSO*) za upravljanje prijenosnom snagom korisnika, čime se energetska učinkovitost poboljšava za više od 10% u usporedbi s tradicionalnim metodama.

U kontekstu primjene MIMO tehnologije u 5G mrežama, rad [135] predstavlja inovativan pristup korištenjem dubokog učenja za optimizaciju alokacije snage u mMIMO sustavima. Predložena metoda koristi duboke neuronske mreže za određivanje optimalne raspodjele snage na temelju položaja korisnika, čime se postiže učinkovita i brza alokacija snage s manjom računalnom složenosti. Ovaj pristup omogućava prilagodbu raspodjele snage u stvarnom vremenu, što dovodi do poboljšane energetske učinkovitosti i performansi mreže, što ga čini ključnim za unapređenje primjene MIMO tehnologije u 5G mrežama.

Autori studije [131] su istraživali mogućnost korištenja genetskog algoritma za dinamičku prilagodbu broja aktivnih antena ovisno o broju korisnika u svakoj ćeliji kod primjene u mMIMO sustavima. Njihova metoda značajno smanjuje potrošnju energije, što je ključno za održivost i performanse 5G mreža koje koriste MIMO tehnologiju. Nadalje, istraživanje [133] bavi se kompromisom između energetske i spektralne učinkovitosti u mMIMO sustavima. Optimizacijom odašiljačke snage i broja antena, autori pokazuju da je moguće postići značajnu uštedu energije uz minimalan utjecaj na spektralnu učinkovitost, što je ključno za osiguranje optimalnih performansi 5G mreža.

Studija [134] istražuje globalnu optimizaciju odašiljačke snage unutar MIMO sustava, pri čemu se uzimaju u obzir ključni faktori kao što su modulacija signala i protokoli kod uspostave i održavanja veze. Istraživanje [134] naglašava važnost kontrole odašiljačke snage bazne postaje kao i dinamičke prilagodbe za postizanje maksimalne energetske učinkovitosti, što je posebno važno za moderni razvoj bežičnih komunikacijskih sustava kao što su 5G i IoT.

Ova istraživanja ističu ključnu ulogu optimizacije odašiljačke snage u postizanju energetske učinkovitosti unutar MIMO sustava, što je od presudne važnosti za održivi razvoj bežičnih komunikacija u eri 5G i IoT tehnologija.

4.3.3. Kognitivni radio i kooperativne tehnike za raspodjelu resursa

Kognitivni radio predstavlja naprednu tehnologiju koja omogućuje bežičnim uređajima, poput baznih postaja, inteligentnu prilagodbu prijenosnih parametara na temelju trenutnih spektralnih uvjeta [146], [147], [148]. Temeljna karakteristika kognitivnog radija je njegova sposobnost osluškivanja spektra (engl. *spectrum sensing*) kojom prepoznaje slobodne dijelove spektra (engl. *spectrum holes*) i koristi ih za prijenos podataka bez ometanja primarnih korisnika [136], [137], [149], [150]. Ova sposobnost omogućuje učinkovitije korištenje dostupnog spektra, povećava fleksibilnost mreže te smanjuje potrošnju energije kroz dinamičko prilagođavanje snage odašiljanja i frekvencije prijenosa u skladu s promjenjivim uvjetima. Kognitivni radio postaje ključna tehnologija za napredne bežične sustave, posebno u uvjetima zasićenog spektra, omogućujući optimalnu alokaciju spektralnih resursa i poboljšanu energetska učinkovitost.

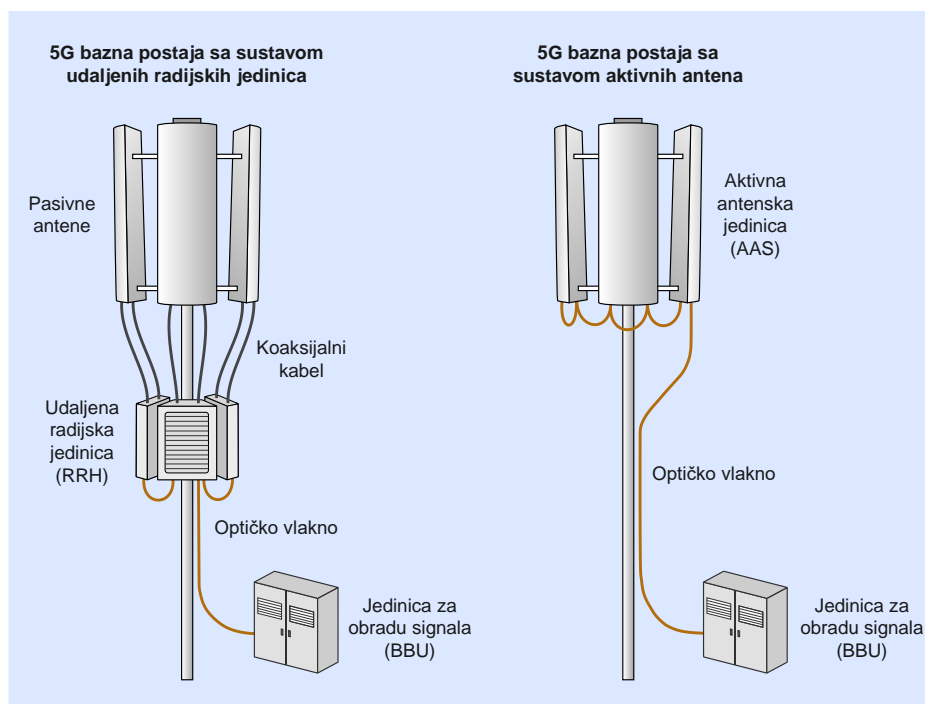
U radu [142] predložena je napredna shema strojnog učenja za energetska učinkovitost u raspodjeli resursa unutar H-CRAN mreža u 5G okruženju. Korištenjem centraliziranog pristupa za upravljanje resursima, ovaj rad optimizira alokaciju resursnih blokova i raspodjelu snage kako bi se smanjila interferencija između slojeva i poboljšala energetska učinkovitost, uz istovremeno očuvanje kvalitete usluge. Primjena *online* učenja omogućuje prilagodbu u stvarnom vremenu, čime se značajno smanjuje potrošnja energije u mreži. Ovaj pristup pokazuje kako kognitivne i kooperativne tehnike mogu biti učinkovito primijenjene za optimizaciju raspodjele resursa u složenim mrežnim okruženjima, kao što su 5G H-CRAN sustavi.

Optimizacija kompromisa između spektralne i energetske učinkovitosti ključna je za postizanje visokih performansi u modernim 5G heterogenim kognitivnim mrežama. Autori u radu [138] predlažu superiorni algoritam generiranja populacije (engl. *Superior Population*

Generation Algorithm, SPGA) za optimalnu raspodjelu resursa, omogućujući ravnotežu između spektralne i energetske učinkovitosti. S druge strane, autori u radu [139] koriste tehniku optimizacije temeljem neizrazite logike (engl. *fuzzy*) kako bi balansirali energetske i spektralne zahtjeve, omogućujući smanjenje potrošnje energije bez ugrožavanja kvalitete usluge.

Rad [140] dodatno istražuje prilagodbu odašiljačke snage u kognitivnim mobilnim mrežama s višestrukim skokovima (engl. *multihop*) u prijenosu podataka. Autori analiziraju različite tehnike za optimizaciju potrošnje energije, uključujući kontrolu odašiljačke snage, alokaciju frekvencija i raspoređivanje veza. Predloženi algoritmi omogućuju prilagodbu odašiljačke snage u realnom vremenu, uzimajući u obzir složenost mrežnog okruženja, što je ključno za poboljšanje energetske učinkovitosti u scenarijima s višestrukim skokovima između čvorova koji komuniciraju.

Kooperativne tehnike, poput suradničkog prosljeđivanja, omogućuju raspodjelu prijenosa podataka među više točaka u mreži, smanjujući tako potrebu za visokim odašiljačkim snagama. Ova metoda omogućuje korisnicima dijeljenje resursa i prilagodbu odašiljačke snage na temelju njihove udaljenosti od baznih postaja, čime se postiže održiv balans između energetske učinkovitosti i kvalitete usluge [145]. Nadalje, dinamička alokacija resursa i kanalno kodiranje osiguravaju optimalnu upotrebu dostupnog frekvencijskog spektra, minimizirajući energetske gubitke te omogućujući visok stupanj prilagodljivosti mreže na varijacije prometa [141].



Slika 4.3. Povezivanje RRU i AAU baznih postaja s BBU putem optičkih vlakana

Optimizacija prijenosa podataka između radio i jezgrenog dijela mobilne mreže može se dodatno poboljšati implementacijom inovativnih mrežnih arhitektura koje se temelje na povezivanju udaljene radijske jedinice (engl. *Remote Radio Unit, RRU*) i aktivne antenske jedinice (engl. *Active Antenna Unit, AAU*) baznih postaja sa BBU i jezgrenim dijelom mreže primjenom tehnologije optičkih vlakana (Slika 4.3.) [75].

Masovno distribuirani sustavi antena povezani optičkim vlaknima s jezgrenim upravljačkim dijelom mreže omogućuju smanjenje potrošnje energije potrebne za prijenos podataka [143]. Ovaj pristup, poznat kao *Broadband Wireless Access with Fiber-Connected Massively Distributed Antennas (BWA-FMDA)*, koristi optička vlakna za povezivanje distribuiranih sustava antena s centraliziranom jedinicom za procesiranje (Slika 4.3.). Time se skraćuje komunikacijska veza u "posljednjem dijelu mreže" (engl. *last mile*) i iskorištava visoka propusnost i niski gubici optičkih vlakana kako bi se povećala spektralna učinkovitost i smanjila ukupna potrošnja energije [143]. Primjena optičkih vlakana smanjuje potrebu za energetske intenzivnim pojačivačima signala i omogućuje učinkovitiji prijenos podataka, što ovu arhitekturu čini održivim rješenjem za bežični pristup u modernim mrežama visoke gustoće.

4.4. Optimizacija potrošnje energije mobilne mreže korištenjem malih ćelija

Implementacija malih ćelija, kao što su mikroćelije, pikoćelije i femtoćelije, pokazala se kao ključna strategija za smanjenje potrošnje energije u suvremenim bežičnim mrežama, posebno u kontekstu 5G mreža. Male ćelije omogućuju pokrivanje manjih zemljopisnih područja s visokim prometom, što smanjuje potrebu za velikom odašiljačkom snagom jer su korisnici bliže baznim postajama [151]. Pristup razvoju mreže postavljanjem tzv. malih baznih postaja s malim ćelijama pokrivanja prostora signalom mreže, ne samo da povećava energetske učinkovitost mreže, već također optimizira korištenje resursa unutar mreže. Studija u radu [152] naglašava da male ćelije omogućuju značajne energetske uštede kroz napredne strategije upravljanja načinima mirovanja i isključivanja dijelova baznih postaja kada nisu u upotrebi. Nadalje, korištenje heterogenih mreža koje kombiniraju makroćelije i male ćelije, otvara mogućnost dodatnog smanjenja potrošnje energije mreže kroz primjenu dinamičkog dodjeljivanja resursa malih ćelija u ovisnosti o varijacijama korisničkog prometa u mobilnim mrežama. Ovakav pristup realizaciji heterogenih mobilnih mreža postaje posebno važan u kontekstu sve veće gustoće mrežnih elemenata (baznih postaja) i rastućih zahtjeva za energetske učinkovitost u 5G mrežama.

Dodatno, rad [153] predlaže okvir energetske učinkovitosti za IoT sustave temeljene na heterogenim mrežama s malim ćelijama, koristeći prilagodbu odašiljačke snage kroz algoritam zumiranja ćelija za smanjenje potrošnje energije. Ova tehnika omogućuje značajno poboljšanje energetske učinkovitosti cijele mreže, posebno u scenarijima visokog prometa i povećanih zahtjeva za obradu podataka. Kombinacija ovih strategija osigurava da male ćelije mogu učinkovito odgovoriti na energetske izazove koje donosi implementacija 5G i IoT mreža.

Nadalje, rad [154] istražuje energetske uštede u ultra-gustim mrežama malih ćelija, gdje se kroz kombinaciju kontrole odašiljačke snage i rasporeda korisnika u mreži postižu optimizacije koje mogu rezultirati poboljšanjima energetske učinkovitosti do 70,7%. Ovaj rad naglašava da pravilno upravljanje resursima unutar mreža s malim ćelijama može značajno smanjiti potrošnju energije i poboljšati ukupnu pouzdanost mreže, što je ključno za uspješnu implementaciju 5G tehnologija u urbanim i gusto naseljenim područjima.

Međutim, uz smanjenje odašiljačke snage bazne postaje, implementacija malih ćelija donosi i izazove povezane s povećanim zahtjevima za računalnom snagom na baznim postajama, posebno kada se primjenjuju napredne tehnologije poput mMIMO i komunikacija primjenom milimetarskih valova. Prema istraživanju, računalna snaga može predstavljati preko 50% ukupne potrošnje energije baznih postaja s malim ćelijama, što naglašava potrebu za optimizacijom ne samo prijenosne, već i računalne snage kako bi se postigla maksimalna energetska učinkovitost [79].

Dodatno, implementacija malih ćelija u heterogene 5G mreže suočava se s izazovima vezanim uz koordinaciju interferencije između ćelija te upravljanje mrežnim resursima. Autori u radu [155] ističu kako uvođenje malih ćelija može dovesti do povećane složenosti upravljanja mrežom zbog pojave međusobnih interferencija, što zahtijeva primjenu naprednih tehnika kao što su koordinacija interferencije te samoorganizirajuće mreže (SON). Ovi izazovi zahtijevaju pažljivo planiranje i implementaciju kako bi se osigurala ne samo energetska učinkovitost, već i stabilnost i kvaliteta usluge u mrežama buduće generacije. Nadalje, rad [156] ističe važnost korištenja različitih tehnika za poboljšanje energetske učinkovitosti malih ćelijskih mreža, kao što su način mirovanja baznih postaja, prikupljanje energije te uravnoteženje opterećenja (engl. *load balancing*), uz istovremeno rješavanje izazova povezanih s učinkovitim korištenjem spektra i prostornim resursima. Kombinacija ovih pristupa pruža sveobuhvatan okvir za optimizaciju energetske učinkovitosti malih ćelija u složenim mrežnim okruženjima.

4.5. Implementacija obnovljivih izvora energije

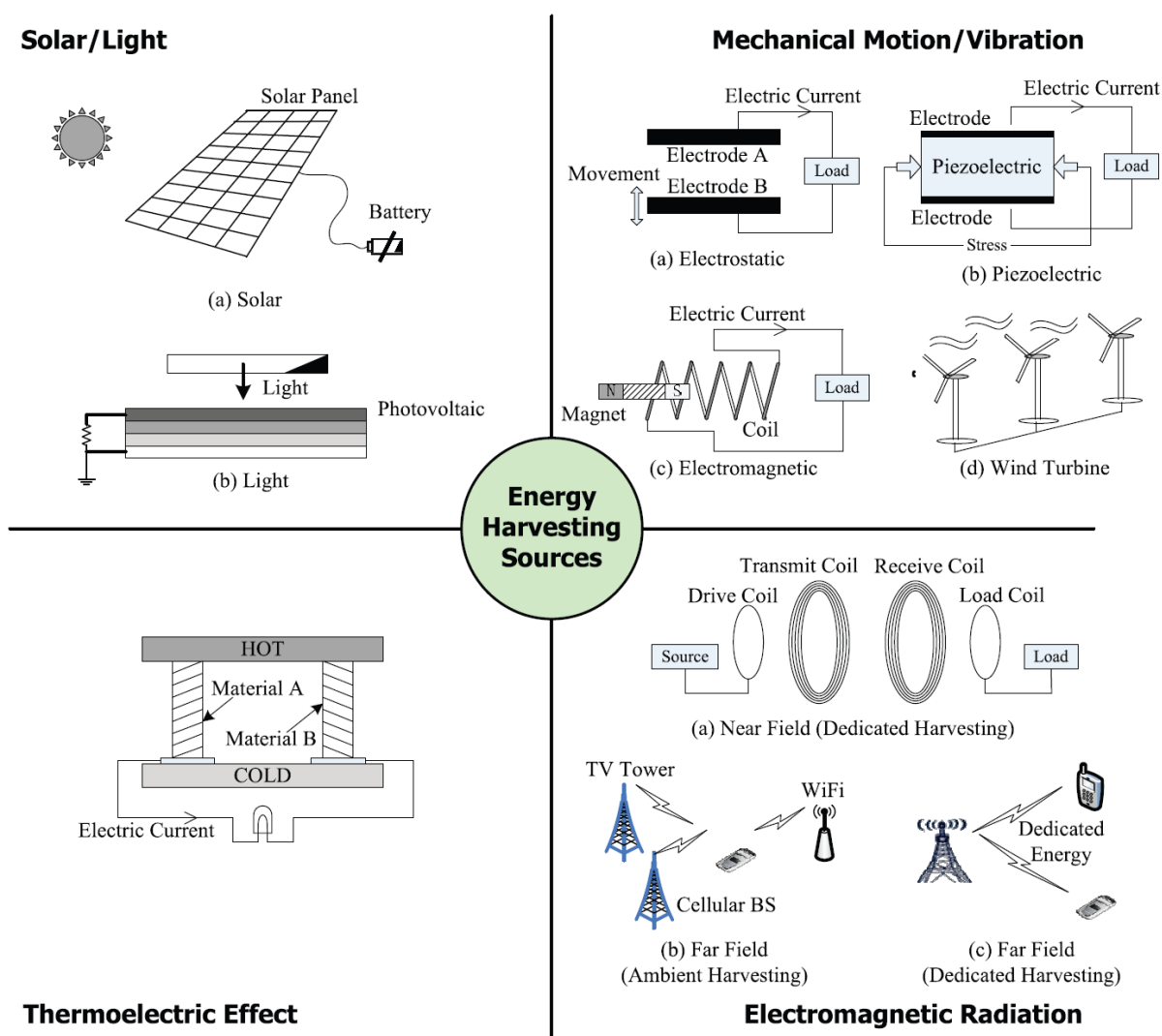
Poseban izazov u napajanju energijom imaju udaljene lokacije baznih postaja koje se ne mogu direktno priključiti na elektroenergetsku mrežu. Takve lokacije uobičajeno se napajaju energijom iz dizel generatora kojima se gorivo kao energent dostavlja periodički i iste predstavljaju energetske najneučinkovitije i ekološki najštetnije sustave napajane energijom baznih postaja [157]. Kao rješenje za napajanje takvih lokacija baznih postaja, sve se više u praksi implementira koncept napajanja lokacije baznih postaja energijom iz obnovljivih izvora [157], [158]. Implementacija obnovljivih izvora energije, poput geotermalnih, solarnih i energije vjetra, predstavlja važan korak prema smanjenju ovisnosti o tradicionalnim, fosilnim izvorima energije i smanjenju ukupne potrošnje energije u bežičnim komunikacijskim mrežama. Bazne postaje koje za napajanje energijom koriste obnovljive izvore energije mogu značajno doprinijeti smanjenju emisije stakleničkih plinova, čime se pridonosi ciljevima održivog razvoja i smanjenju ekološkog otiska telekomunikacijske industrije [159].

Solarna energija posebno je korisna u udaljenim područjima gdje lokacije baznih postaja nemaju pristup električnoj mreži, ili je isti ograničen ili skup. Vjetro turbine također nude rješenja za autonomne energetske sustave baznih postaja u regijama koje imaju povoljne uvjete za korištenje vjetra kao obnovljivog izvora energije. Međutim, priroda ovih izvora znači da oni nisu uvijek pouzdani, jer ovise o vremenskim uvjetima. Zbog tog je potrebno na lokaciji baznih postaja primjena baterija za pohranu viškova energije i korištenje pohranjene energije u periodima kada nema proizvodnje energije iz obnovljivih izvora. To stvara izazove za održavanje kontinuiteta napajanja energijom lokaliteta baznih postaja koje koriste obnovljive izvore energije [94]. Kada dođe do nedostatka energije iz obnovljivih izvora energije ili iz baterija za pohranu energije, bazne postaje prestaju s radom, što može negativno utjecati na mrežne performanse. Stoga je pravilno planiranje kapaciteta obnovljivih izvora energije kao i resursa za pohranu energije od presudne važnosti za rad lokacija baznih postaja napajanih obnovljivim izvorima energije.

4.5.1. Tehnologije prikupljanja i pohrane energije

Za prevladavanje izazova vezanih uz napajanje lokacija baznih postaja iz obnovljivih izvora energije, predložene su različite tehnike prikupljanja energije. Prikupljanje energije može dolaziti iz različitih izvora (Slika 4.4.), uključujući obnovljive izvore poput solarne i vjetrove energije, kao i iz RF signala koje emitiraju okolni predajnici. Prikupljena energija

može se koristiti za napajanje konvencionalnih baznih postaja, čime se smanjuje potreba za skupljom i ekološki manje održivom energijom iz tradicionalnih izvora.



Slika 4.4. Izvori prikupljanja energije u bežičnim komunikacijskim sustavima [160]

Slika 4.4. prikazuje četiri kategorije izvora prikupljanja obnovljive energije za napajanje mrežnih i korisničkih uređaja u bežičnim komunikacijskim sustavima [160] i to: solarnu energiju, energiju mehaničkog kretanja/vibracija, termo-električnu energiju i energiju elektromagnetskog zračenja. Ove tehnologije omogućuju razvoj autonomnih i održivih lokacija baznih postaja koji smanjuju ovisnost o tradicionalnim izvorima energije.

4.5.2. Primjena u 5G i IoT mrežama kroz inovativne arhitekture

Tehnologije prikupljanja i upravljanja energijom ključne su za produljenje trajanja baterija IoT uređaja te smanjenje ovisnosti o tradicionalnim izvorima energije u 5G mrežama. Autori u

radu [161] predlažu arhitekturu mreže za prikupljanje energije definirane softverom (engl. *Software Defined Energy Harvesting Networks, SD-EHN*). Ova arhitektura koristi softverski definirane mreže kako bi dinamički upravljala tokovima podataka i energije unutar 5G mreža, omogućujući efikasno korištenje obnovljivih izvora energije poput solarne i vjetroenergije. Implementacija ove tehnologije smanjuje potrebu za konvencionalnim energetske izvora i doprinosi smanjenju emisije stakleničkih plinova.

S obzirom na rastuće zahtjeve za energetskom i spektralnom učinkovitošću u 5G mrežama, autori u radu [162] predlažu integrirani pristup prikupljanju energije i upravljanju frekvencijskim spektrom. Ova nova paradigma omogućuje učinkovito upravljanje energetskim i spektralnim resursima u 5G mrežama, što je ključno za postizanje održivih i energetski učinkovitih komunikacija te smanjenje ovisnosti o tradicionalnim izvorima energije. Predložena arhitektura i mehanizmi upravljanja energijom i spektrom omogućuju dinamičko upravljanje resursima u različitim mrežnim slojevima, uključujući D2D mreže, mreže malih ćelija te makro ćelijske mreže, čime se značajno poboljšava ukupna učinkovitost 5G mreža.

Autori u radu [163] istražuju različite tehnike prikupljanja energije, uključujući solarne, elektromagnetske, termalne i mehaničke izvore, te njihovu primjenu u IoT uređajima. Ove tehnike omogućuju samoodržive mreže koje mogu raditi bez čestih zamjena baterija, što je ključno za dugoročno održivo upravljanje IoT uređajima u 5G sustavima. Integracija ovih tehnologija podržava ciljeve smanjenja ekološkog otiska i omogućuje pouzdane i trajne komunikacijske mreže, što ih čini ključnim dijelom strategija za buduće zelene komunikacije.

4.5.3. Planiranje kapaciteta solarnih i vjetroelektrana

Učinkovito planiranje kapaciteta solarnih i vjetroelektrana uz integraciju baterijskih sustava ključno je za osiguranje kontinuiteta napajanja baznih postaja na udaljenim lokacijama. S obzirom na povremenost i nepredvidljivost proizvodnje energije iz obnovljivih izvora, pravilno dimenzioniranje ovih sustava od presudne je važnosti za održavanje stabilnosti opskrbe energijom. Integracija baterijskih sustava omogućava pohranu viškova energije u periodima visoke proizvodnje, što osigurava neprekinutu opskrbu tijekom perioda smanjene proizvodnje.

Autori u radu [164] istražuju strategije optimizacije hibridnih obnovljivih energetske sustava, uključujući fotonaponske (engl. *photovoltaic, PV*) sustave, vjetroelektrane i baterije, naglašavajući važnost preciznog dimenzioniranja i pravilnog upravljanja kapacitetima kako bi se povećala pouzdanost napajanja i smanjili operativni troškovi. Posebno se ističe potreba za

pažljivim planiranjem kapaciteta baterija radi smanjenja fluktuacija u opskrbi energijom te osiguravanja stabilne opskrbe čak i tijekom perioda smanjene proizvodnje iz obnovljivih izvora.

U skladu s ovim nalazima, rad [165] pruža detaljan pregled trenutnog stanja dizajna i implementacije solarno napajanih baznih postaja, s posebnim naglaskom na izazove u dimenzioniranju fotonaponskih panela i baterija. Istraživanje naglašava važnost optimizacije veličine ovih komponenti kako bi se minimizirala učestalost prekida napajanja i osigurala pouzdana opskrba energijom čak i u uvjetima smanjene insolacije ili loših vremenskih uvjeta. Autori također predlažu različite konfiguracije sustava, uključujući kombinaciju solarnih panela i dizelskih generatora, što može osigurati redundanciju i smanjiti rizik od prekida napajanja, posebno u regijama s ograničenim pristupom mreži.

Nadalje, rad [166] pruža detaljan uvid u modeliranje sustava napajanja koji se oslanjaju na kombinaciju solarnih i vjetroelektrana s baterijskim sustavima. Posebno se naglašavaju izazovi povezani s povremenošću proizvodnje energije iz obnovljivih izvora i potreba za dostatnim kapacitetom baterija kako bi se osigurala kontinuirana opskrba energijom. Ovo istraživanje također ističe prednosti korištenja kombiniranih sustava u ruralnim i teško dostupnim područjima, gdje nije moguć priključak na mrežu, čime se dodatno osigurava stabilnost napajanja baznih postaja.

Pored ovih aspekata, istraživanje [167] analizira tehničku izvodljivost hibridnog sustava napajanja koji koristi solarnu i vjetroenergiju zajedno s adijabatskim sustavom za pohranu energije za napajanje udaljenih baznih postaja. Autori naglašavaju važnost pravilnog dimenzioniranja fotonaponskih panela, vjetroturbina i kapaciteta sustava za pohranu energije kako bi se osigurala pouzdana opskrba energijom i smanjila vjerojatnost gubitka napajanja. Rezultati pokazuju da konfiguracija sustava s većim brojem fotonaponskih panela ili većim kapacitetom zračnog spremnika može značajno smanjiti rizik od prekida napajanja, čime se poboljšava stabilnost cijelog sustava.

4.6. Primjena NOMA tehnike za poboljšanje energetske učinkovitosti mobilnih mreža

Za razliku od tradicionalnih tehnika koje svakom korisniku dodjeljuju različite frekvencijske resurse, NOMA omogućuje višestrukim korisnicima dijeljenje istih resursa koristeći različite razine snage prijenosa, ovisno o uvjetima prijenosa i položaju korisnika u mreži. Ovakav pristup smanjuje ukupnu potrošnju energije jer se snaga odašiljanja može

fleksibilno prilagođavati potrebama svakog korisnika [168]. Dodatno, korištenjem SIC tehnike korisnici s povoljnijim uvjetima prijenosa mogu dekodirati signale i eliminirati interferenciju uzrokovanu signalima korisnika s većom alokacijom snage, čime se poboljšava ukupna efikasnost prijenosa. Stoga, NOMA ne samo da povećava spektralnu učinkovitost dopuštajući višestrukim korisnicima da istovremeno koriste isti resurs, već i optimizira energetska učinkovitost mreže smanjenjem interferencije između korisnika na istoj frekvenciji [169]. Kao rezultat toga, ova optimizacija resursa rezultira manjom ukupnom potrošnjom energije potrebnom za prijenos podataka, što je ključno za moderne mobilne mreže s velikim brojem povezanih uređaja.

Povećanje energetske učinkovitosti u mobilnim mrežama postaje ključni cilj s obzirom na sve veće zahtjeve za prijenosom podataka i ograničene energetske resurse. Primjerice, u radu [170] istražuje se optimizacija resursa za NOMA heterogene mreže u kontekstu 5G komunikacijskih sustava kako bi se postigla veća energetska učinkovitost. Autori predlažu pristupe za raspodjelu resursa i optimizaciju snage za silaznu vezu NOMA heterogene mreže, uključujući metode za raspodjelu korisnika (engl. *user scheduling*) i alokaciju snage. Rezultati ovih istraživanja pokazuju da predloženi pristupi mogu značajno povećati energetska učinkovitost NOMA heterogenih mreža u odnosu na tradicionalne metode poput OFDMA sustava. Studija [170] također naglašava kako NOMA tehnika može poboljšati energetske performanse smanjenjem interferencije među korisnicima i optimizacijom dodjele snage u mrežama s heterogenom arhitekturom.

Nadalje, primjena NOMA tehnike u mobilnim mrežama povećava energetska učinkovitost dinamičkom optimizacijom resursa. U radu [171] predloženi su algoritmi za dodjelu podkanala i snage u silaznoj vezi koja koristi NOMA tehniku višestrukog pristupa, uzimajući u obzir zahtjeve kvalitete usluge, stabilnost reda čekanja na dodjelu kanala i ograničenja snage prijenosa. Simulacije pokazuju da ovi algoritmi značajno poboljšavaju energetska učinkovitost i uravnotežuju kašnjenje, pružajući smjernice za energetska učinkovite strategije u budućim 5G i 6G mrežama [171].

Kombinacija NOMA tehnike i tehnologije simultanog bežičnog prijenosa informacija i energije (engl. *Simultaneous Wireless Information and Power Transfer, SWIPT*) pruža učinkovito rješenje za povećanje energetske učinkovitosti u bežičnim mrežama nove generacije, što je istraženo u radu [172]. Autori predlažu optimizacijski okvir koji zajednički upravlja alokacijom snage i vremenskim prospajanjem (engl. *Time Switching, TS*) kako bi se

maksimizirala energetska učinkovitost uz zadovoljenje ključnih ograničenja koji uključuju maksimalnu snagu prijenosa, minimalnu stopu prijenosa podataka i minimalnu energiju prikupljenu po terminalu. Rezultati simulacija potvrđuju da se kombiniranjem SWIPT i NOMA može postići značajno poboljšanje energetske učinkovitosti u usporedbi s tradicionalnim OMA sustavima [172].

Još jedan inovativan pristup je primjena NOMA tehnike u mrežama sa mogućnošću prikupljanje energije u svrhu poboljšanja energetske učinkovitosti u bežičnim komunikacijama. U radu [173] istražuju se optimizacija propusnosti i energetske učinkovitosti u NOMA mrežama s kapacitetima za prikupljanje energije. Autori predlažu algoritme za praćenje putanje (engl. *path-following algorithms*) koji optimiziraju alokaciju resursa uzimajući u obzir prikupljanje energije i ograničenja snage, s ciljem maksimizacije energetske učinkovitosti i poboljšanja propusnosti. Rezultati pokazuju da predloženi pristup nadmašuje tradicionalne metode raspodjele snage, u smislu energetske učinkovitosti i ukupnih mrežnih performansi [173].

Također, korištenje tehnika dubokog učenja za optimizaciju energetske učinkovitosti u MIMO-NOMA sustavima predstavlja značajan korak naprijed u dizajnu energetski učinkovitih bežičnih mreža. U radu [174] predložena je komunikacijska duboka neuronska mreža (engl. *communication deep neural network, CDNN*) za rješavanje problema optimizacije alokacije snage u MIMO-NOMA sustavima. Rezultati pokazuju da predloženi CDNN okvir nadmašuje konvencionalne metode optimizacije, omogućujući bolju ravnotežu između potrošnje energije i performansi mreže [174].

Upotreba naprednih tehnika dubokog pojačanog učenja (engl. *Deep Reinforcement Learning, DRL*) u optimizaciji resursa u uzlaznim NOMA sustavima može značajno poboljšati energetska učinkovitost mreža. U radu [175] predložen je dvoslojni DRL algoritam za rješavanje problema zajedničke dodjele podkanala i alokacije snage kako bi se maksimizirala energetska učinkovitost uz očuvanje kvalitete usluge svih korisnika. Simulacijski rezultati pokazuju da predloženi DRL algoritam postiže bolju energetska učinkovitost u usporedbi s drugim metodama, posebno pod različitim ograničenjima snage prijenosa, čime se poboljšavaju ukupne performanse mreže [175].

Zaključno, primjena NOMA tehnike pokazuje značajan potencijal za poboljšanje energetske učinkovitosti mobilnih mreža nove generacije. Omogućavanjem dijeljenja frekvencijskih resursa među korisnicima uz optimizaciju prijenosne snage, NOMA može

značajno smanjiti potrošnju energije u mrežama s intenzivnom potražnjom podatkovnog prometa. Premda NOMA još nije u potpunosti standardizirana, istraživanja ukazuju na to da njezina integracija s tehnologijama poput SWIPT-a, prikupljanja energije i dubokog učenja može dodatno unaprijediti učinkovitost i performanse bežičnih mreža. Stoga, NOMA predstavlja perspektivno rješenje za buduće 5G i 6G mreže, s potencijalom za daljnje smanjenje energetske potrošnje te optimizaciju mrežnih resursa.

4.7. Primjena tehnologije mrežnog rezanja na poboljšanje energetske učinkovitosti mobilnih mreža

Tehnologija mrežnog rezanja predstavlja ključnu komponentu za postizanje energetske učinkovitosti u 5G i budućim 6G mrežama. Omogućuje fleksibilnu i dinamičku alokaciju resursa kreiranjem virtualnih mrežnih segmenata prilagođenih specifičnim potrebama korisnika i aplikacija. Time se omogućuje optimizacija korištenja mrežnih kapaciteta, smanjenje prekomjerne potrošnje energije i poboljšanje performansi u scenarijima visoke gustoće prometa.

Primjena tehnologije mrežnog rezanja ključna je za optimizaciju energetske učinkovitosti u mobilnim mrežama nove generacije. Rad [176] predlaže okvir za energetski učinkovito i sigurno mrežno rezanje koji omogućuje optimizaciju resursa uz minimalnu potrošnju energije u 5G mrežama. Predložene metode uključuju napredne tehnike upravljanja resursima i sigurnošću kako bi se operatorima omogućilo fleksibilno upravljanje mrežnim odsječcima. Time mobilni operatori mogu prilagoditi resurse specifičnim potrebama korisnika uz smanjenje energetske otiske mreže, što značajno doprinosi ukupnoj učinkovitosti mreže.

Tehnologija mrežnog rezanja posebno se ističe u kontekstu pametnih gradova i Interneta stvari. U radu [177], autori predlažu sustav automatskog mrežnog rezanja koji koristi strojno učenje za prilagodbu mrežnih resursa specifičnim zahtjevima IoT uređaja u pametnim gradovima. Ovaj sustav automatski raspoređuje mrežne kapacitete, smanjuje interferenciju te optimizira korištenje energije, što rezultira značajnim uštedama. Automatizirano mrežno rezanje postaje ključno za podršku različitim IoT aplikacijama i uslugama, dok istovremeno značajno smanjuje ukupnu energetske potrošnju mobilnih mreža.

Na industrijskoj razini, primjena mrežnog rezanja donosi posebne prednosti u industrijskom Internetu stvari (IIoT). U radu [178], autori naglašavaju kako mrežno rezanje omogućuje prilagodbu mrežnih resursa industrijskim aplikacijama poput pametnih tvornica, pametne energije i pametnog transporta. Ovaj model koristi umjetnu inteligenciju za dinamičko

upravljanje resursima, omogućujući optimalnu raspodjelu resursa u stvarnom vremenu, čak i u složenim industrijskim scenarijima. Fokus je na optimizaciji energetske učinkovitosti, pri čemu inteligentno upravljanje resursima pomaže smanjiti potrošnju energije i poboljšati ukupnu učinkovitost sustava.

Optimizacija energetske učinkovitosti kroz mrežno rezanje unutar C-RAN arhitekture istražena je u radu [179]. Autori predlažu model koji se temelji na zajedničkoj alokaciji komunikacijskih i računalnih resursa unutar cijelog lanca mrežnih funkcija, od radio pristupa do obrade podataka u oblaku. Rezultati simulacije pokazuju da pravilno upravljanje resursima može značajno smanjiti potrošnju energije, osobito u uvjetima visoke opterećenosti mreže, dok se održava visoka kvaliteta usluge. Ovaj model optimizacije naglašava važnost mrežnog rezanja kao ključne tehnike za učinkovito upravljanje resursima u 5G i budućim 6G mrežama.

Računarstvo u magli (engl. *fog computing*), kao jedan od naprednih koncepta u mobilnim mrežama koji premješta računalne resurse bliže korisnicima, također koristi tehnologiju mrežnog rezanja za optimizaciju energetske učinkovitosti. U radu [180], autori predlažu dinamičko mrežno rezanje unutar sustava računarstva u magli, pri čemu regionalni orkestrator koordinira raspodjelu opterećenja između čvorova u magli. Sustav koristi energiju prikupljenu iz okoliša za pružanje računalnih usluga lokalnim korisnicima, čime se dodatno smanjuje potrošnja energije. Predloženi model koristi algoritam temeljen na djelomično opažljivom Markovljevom procesu odlučivanja (engl. *belief-state partially observable Markov decision process, B-POMDP*), omogućujući optimizaciju resursa u dinamičnim uvjetima. Evaluacija ovog sustava, provedena na stvarnim podacima baznih postaja, pokazala je značajna poboljšanja u kapacitetu obrade opterećenja, s gotovo dvostruko većom količinom obrađenih podataka u određenim scenarijima.

Konačno, rad [181] istražuje adaptivne strategije upravljanja energijom u mrežama temeljenim na mrežnom rezanju. Autori razvijaju model cjelobrojnog linearnog programiranja (engl. *Integer Linear Programming, ILP*) koji optimizira potrošnju energije, uzimajući u obzir različite energetske zahtjeve i izvore energije. Predložene strategije, poput vremenskog prebacivanja i degradacije kvalitete usluge, omogućuju prilagodbu mreže prema trenutačnim potrebama, što dodatno smanjuje potrošnju energije i povećava učinkovitost mreže.

Zaključno, tehnologija mrežnog rezanja pokazuje se kao ključna za postizanje energetske učinkovitosti u budućim mobilnim mrežama. Kroz dinamičku alokaciju resursa, prilagodbu različitim uslugama i aplikacijama te korištenje naprednih metoda upravljanja energijom,

mrežno rezanje omogućuje optimizaciju potrošnje energije u uvjetima visokog prometa i složenih zahtjeva korisnika. Radovi predstavljeni u ovom poglavlju jasno ilustriraju kako se mrežno rezanje može koristiti u različitim okruženjima, uključujući pametne gradove, IoT i IIoT sustave, uz primjenu naprednih algoritama i tehnologija poput strojnog učenja i prikupljanja energije iz okoliša. Ova tehnika ne samo da smanjuje potrošnju energije, već omogućuje i fleksibilnost, pouzdanost i održivost mreža nove generacije, što je od presudne važnosti za razvoj 5G i 6G mreža.

5. BUDUĆI IZAZOVI I PRILIKE

S ubrzanim razvojem 5G mreža i potražnjom za sve većim prijenosnim brzinama i prijenosom sve većih količina podataka, optimizacija potrošnje energije bežičnih komunikacijskih mreža postaje ključan izazov za njihovu dugoročnu održivost. Predviđa se da će 5G mreže do njihove pune implementacije morati povećati energetska učinkovitost za 100 do 1000 puta u odnosu na 4G mreže prethodne generacije. Ispunjenje ovog zahtjeva se očekuje kroz implementaciju 5G mreže temeljenu na heterogenoj infrastrukturu baznih postaja, uz zadovoljavanje prijenosa podataka stalno rastućeg broja 5G korisničkih uređaja [79]. Stoga je izazov utjecaja kontinuiranog porasta broja korisničkih uređaja u 5G mreži na energetska učinkovitost 5G mreža jedan od značajnih istraživačkih izazova. Od posebnog je značaja procjena utjecaja porasta broja korisnika na energetska učinkovitost 5G heterogenih mreža, kada iste koriste različite pristupe alokaciji novih 5G baznih postaja i upravljanju raspodjelom radio resursima 5G mreže sa ciljem poboljšanja energetske učinkovitosti 5G mreža.

Nadalje, jedan od ključnih budućih izazova u implementaciji mobilnih mreže je integracija lokalnog predmemoriranja podataka (engl. *caching*) u mobilnim rubnim mrežama (engl. *mobile edge networks, MEN*). Predmemoriranje podataka na rubu mreže, posebno u malim baznim postajama i korisničkim uređajima, postaje ključno za smanjenje energetske potrošnje i poboljšanje performansi mreže [182]. Međutim, dinamičke promjene u količini prijenosa informacijskih sadržaja, mobilnost korisnika i potreba za inteligentnim tehnikama u odlučivanju o rasporedu predmemoriranja predstavljaju značajne implementacijske izazove. Razvoj naprednih algoritama za optimizaciju predmemoriranja u mobilnim rubnim mrežama će biti neophodan sa ciljem smanjenja potrošnja energije bez ugrožavanja kvalitete usluge.

Značajnu priliku za poboljšanje energetske učinkovitosti mobilnih mreža nudi tehnika mrežnog rezanja. Primjenom ove tehnike, moguće je učinkovitije korištenje mrežnih resursa prilagođeno potrebama različitih korisničkih slučajeva (engl. *use case*), što doprinosi poboljšanju energetske učinkovitosti koja je karakteristična za određeni dio mreže. Moguća poboljšanja energetske učinkovitosti primjenom tehnika mrežnog rezanja se ogledaju u optimizaciji dodjele mrežnih resursa u ovisnosti o stvarnim zahtjevima za resurse određenog dijela mreže, mogućnosti stavljanja dijela mreže u režim mirovanja u periodima kada nema korisnika ili korisničkog prometa, optimizaciji dijeljena resursa mreže između različitih dijelova mreže kroz virtualizaciju mrežnih elementa te izoliranje i grupiranje dijelova mreže sa različitim energetske potrošnjama. Stoga primjena tehnika mrežnog rezanja u cilju

poboljšanja energetske učinkovitosti mobilne mreže predstavlja značajno neistraženo područje u pogledu mogućnosti poboljšanja energetske učinkovitosti mobilnih mreža.

Nadalje, metode raspoređivanja mrežnih resursa u radio pristupnom dijelu mreže moraju biti poboljšane kako bi sukladno dinamici prometnog opterećenja optimizirale potrošnju energije prema varijacijama ukupnog prometa. Pronalaženje optimalnog kompromisa između odašiljačke i procesne računalne snage baznih postaja, ključno je za postizanje energetske učinkovitosti baznih postaja, posebno s obzirom na učinke različitih tehnologija prijenosa u bežičnim mrežama. Primjena softverski definiranih mreža (SDN) pruža potencijalno rješenje za ovaj izazov, omogućujući dinamičku kontrolu i optimizaciju mrežnih resursa [183]. Međutim, potrebno je dodatno istražiti mogućnosti i ograničenja SDN-a u kontekstu energetske učinkovitosti.

Jedan od nedovoljno istraženih izazova u procjeni energetske učinkovitosti u IoT mrežama je uključivanje kašnjenja u prijenosu podataka. Uzimanjem u obzir ovih kašnjenja moguće je postići realističnije modele i preciznije procjene ukupne učinkovitosti mreže. U radu [184] autori istražuju kako optimizacija energetske učinkovitosti može biti značajno poboljšana kroz uravnoteženje između energetske potrošnje i kašnjenja u mrežama s rubnim računarstvom s višestrukim pristupom (engl. *Multi-access edge computing MEC*). Predloženi algoritam optimizacije uspješno rješava izazove u scenarijima mobilnosti korisnika, nestacionarnih zahtjeva za obradom i promjenljivih stanja bežičnih kanala (engl. *wireless fading channels*). Simulacije pokazuju da ovaj pristup omogućava bolju izvedbu u pogledu energetske učinkovitosti i upravljanja kašnjenjima u odnosu na druge metode.

Međutim, unatoč brojnim istraživanjima vezanim uz poboljšanje energetske učinkovitosti bežičnih mreža, ne postoji jedinstveni pristup koji bi odjednom obuhvatio sve aspekte ove složene problematike. Iako su inicijative poput projekta *Green Touch* [185] napravile značajan napredak u osvješćivanju o potrebi smanjenja energetske potrošnje mobilnih mreža, potreban je daljnji razvoj sveobuhvatnih rješenja koja će objediniti različite aspekte rada mobilnih mreža sa ciljem poboljšanja energetske učinkovitosti mreža. Rad [186] naglašava važnost integracije novih tehnologija i strategija upravljana mrežnim resursima u cilju smanjenja energetske potrošnje.

Dodatno, u radu [187] istražuju se kompromisi između energetske i spektralne učinkovitosti u 5G mrežama s više operatora. Autori analiziraju optimizacijske okvire koji omogućuju učinkovitu raspodjelu resursa između više operatora, uzimajući u obzir heterogene

ograničenja kao što su različiti zahtjevi korisnika i različiti operativni uvjeti. Fokus je na postizanju ravnoteže između maksimalne energetske učinkovitosti i spektralne učinkovitosti, što je ključno za dugoročnu održivost mobilnih mreža. Ova analiza naglašava izazove s kojima se suočavaju 5G mreže u smislu upravljanja resursima, posebno u okruženjima s visokim prometom i složenim uvjetima. Predloženi modeli optimizacije pridonose boljoj alokaciji resursa, smanjujući potrošnju energije bez ugrožavanja kvalitete usluge, što je od ključne važnosti za budući razvoj mobilnih mreža.

U radu [188] istražena je primjena tehnika frakcijske ponovne upotrebe frekvencija (engl. *Fractional Frequency Reuse, FFR*) i frakcijske kontrole snage (engl. *Fractional Power Control, FPC*) u hibridnim mrežama malih ćelija s punodupleksnim (engl. *full-duplex*) i poludupleksnim (engl. *half-duplex*) načinom rada. Ove metode doprinose smanjenju interferencije među ćelijama te poboljšanju spektralne i energetske učinkovitosti u heterogenim mrežnim okruženjima. Optimizacija resursa u visoko gusto naseljenim mrežama, posebno onima s malim ćelijama, predstavlja ključni izazov za buduće 5G i 6G mreže, a predloženi pristup doprinosi tom napretku.

S obzirom na ubrzani rast implementacije malih baznih postaja (malih ćelija) u 5G mrežama, problem interferencijskih smetnji među ćelijama postaje sve izraženiji. Tradicionalne ortogonalne tehnike modulacije signala kao što je OFDM i OFDMA možda neće biti dovoljne za rješavanje izazova vezanih uz interferenciju među ćelijama, što će zahtijevati razvoj novih modulacijskih tehnika. Jedna od obećavajućih metoda je NOMA tehnika višestrukog pristupa. Očekuje se da primjena NOMA tehnike u 5G mrežama, a pogotovo u 6G mrežama može doprinijeti poboljšanju energetske učinkovitosti mobilnih mreža. Mogućnost optimizacije alokacije odašiljačke snage prema pojedinačnim korisnicima, u skladu s kvalitetom njihovog radio signala, sama po sebi doprinosi smanjenju potrošnje energije baznih postaja. Međutim, kombiniranje NOMA tehnike sa drugim metodama raspodjele radio resursa bazne postaje predstavlja novo veliko buduće istraživačko područje [168].

Stohastička geometrija pokazala se kao prikladan statistički model za analizu i optimizaciju mrežnih performansi u heterogenim bežičnim mrežama. Iako je ovaj pristup već pružio uvid u rad heterogenih mreža, potrebna su dodatna istraživanja kako bi se ovaj alat prilagodio za precizniju procjenu energetske učinkovitosti mobilnih mreža. U radu [189] naglašava se važnost daljnjeg razvoja stohastičke geometrije za bolje razumijevanje i optimizaciju energetske učinkovitosti u kompleksnim mrežnim okruženjima.

Nadalje, istraživanja mehanizama mrežnog samoučenja primjenom umjetne inteligencije u kontekstu poboljšanja energetske učinkovitosti su još uvijek u ranim fazama. Budući da lokalno predmemoriranje podataka postaje sve važnije za smanjenje opterećenja bežičnih mreža, potrebni su inovativni pristupi koji će iskoristiti potencijal strojnog učenja za optimizaciju energetske učinkovitosti bežičnih mreža [190]. Također primjena umjetne inteligencije u razvoju algoritama za dinamičko upravljanje radio resursima baznih postaja u 5G heterogenim mrežama sukladno vremenskim i prostornim varijacijama mrežnog prometa, predstavlja jedan od najvažnijih istraživačkih pravaca prema poboljšanju energetske učinkovitosti 5G mreža.

Navedene različite tehnike za poboljšanje energetske učinkovitosti mobilnih mreža bi trebale imati ključnu ulogu u postizanju održivih i energetski učinkovitih mobilnih mreža u budućnosti, pri čemu iste zahtijevaju značajna istraživanja i daljnji razvoj.

6. ZAKLJUČAK

S obzirom na stalno rastuću potražnju za bežičnim uslugama i eksponencijalno povećanje broja povezanih uređaja u mobilnim mrežama, energetska učinkovitost mobilne mreže postaje ključni faktor za dugoročnu održivost tehnološkog razvoja novih generacija mobilnih mreža. Stoga su u ovom radu temeljito istražene ključne strategije i tehnološka rješenja koja doprinose poboljšanju energetske učinkovitosti mobilnih mreža, s posebnim naglaskom na evoluciju mobilnih mreža prema 5G i nadolazećoj 6G mobilnih mreža.

U radu je opisana motivacija za provođenje istraživanja koja mogu doprinijeti poboljšanju energetske učinkovitosti mobilnih mreža. Također je opisana generacijska evolucija mobilnih mreža, sa posebnim naglaskom na trendove razvoja i standardizacije 5G i 6G mreža. Detaljno je analizirana energetska učinkovitost mobilnih mreža kroz definiranje metrika energetske učinkovitosti mreže, ključnih čimbenika koji utječu na energetska učinkovitost mobilnih mreža i baznih postaja kao najvećeg potrošača energije u mobilnim mrežama te analizu utjecaja tehnologije softverski definiranih mreža (SDN) na energetska učinkovitost mreža.

Također su u radu detaljno analizirani pristupi za optimizaciju potrošnje energije mobilnih mreža. Posebna pažnja posvećena je radio pristupnom dijelu (RAN) mobilne mreže koji se ističe kao najveći potrošač energije unutar mobilnih mreža. Predloženi pristupi za optimizaciju potrošnje energije uključuju unapređenje sklopovskih komponenti kao što su radiofrekvencijskih pojačala i jedinica za obradu signala baznih postaja, razvoj učinkovitih algoritama i protokola za provođenje naprednih tehnika upravljanja resursima radio dijela mobilnih mreža. U tom kontekstu, analizirane su napredne metode za poboljšanje energetske učinkovitosti mreže kao što su dinamičko upravljanje radio resursima mreže i odašiljačkom snagom baznih postaja, primjena tehnika mirovanja i zumiranja ćelija te implementacija heterogenih mobilnih mreža sa baznim postajama malih ćelija.

Unatoč značajnim prednostima koje donosi 5G tehnologija u smislu kapaciteta i performansi mobilne mreže, u ovom radu je pokazano da postoje izazovi koji se odnose na dugoročnu održivost u smislu potrošnje energije mobilnih mreža. Ti izazovi se prvenstveno ogledaju u povećanju potrošnje energije mobilne mreže prouzrokovane sve većom gustoćom mrežne opreme koja se prvenstveno ogleda u sve većem broju instaliranih baznih postaja. Buduće 6G mreže obećavaju dodatna poboljšanja energetske učinkovitosti, posebice kroz masovnu primjenu umjetne inteligencije i tehnika prikupljanja energije iz okoline za poboljšanje energetske učinkovitosti. Ove tehnologije omogućit će daljnje smanjenje potrošnje

energije, ali njihova uspješna implementacija zahtijevat će usklađivanje tehnoloških inovacija s ekološkim i ekonomskim zahtjevima. Stoga će primjena umjetne inteligencija i strojnog učenje u mobilnim mrežama imat će ključnu ulogu u optimizaciji mrežnih operacija, omogućujući inteligentno upravljanje korištenjem resursima mreže u stvarnom vremenu sukladno varijacijama prometa, a sve sa ciljem optimiziranja potrošnje energije mreže bez kompromitiranja kvalitete usluge.

Ovaj rad također ističe važnost balansiranja tehnološkog napretka s ciljevima održivog razvoja. Na globalnoj razini, telekomunikacijski sektor mora se prilagoditi sve strožim ekološkim standardima i regulativama koje zahtijevaju smanjenje emisija stakleničkih plinova i optimizaciju potrošnje energije. Buduće 6G mreže, koje će se oslanjati na napredne AI sustave i tehnologije prikupljanja energije, predstavljaju korak naprijed u postizanju ovih ciljeva, ali također donose nove izazove u implementaciji i upravljanju.

U konačnici, u radu se na različite načine ističe potreba za kontinuiranim razvojem i implementacijom inovativnih algoritama, tehnologija i modela koje će osigurati dugoročnu održivost mobilnih mreža u smislu optimizacije potrošnje energije mobilne mreže. Buduća istraživanja trebala bi se fokusirati na daljnje usavršavanje postojećih tehnologija, kao i na istraživanje novih, kako bi se postigla optimalna energetska učinkovitost mobilnih mreža. Optimizacija energetske učinkovitosti mobilnih mreža treba istovremeno osigurati zadovoljavanje rastućih zahtjeva za sve većim podatkovnim brzinama i kapacitetima mobilnih mreža, kao i za omogućavanje povezanosti sve većeg broja mobilnih korisnika. Balansiranje tehnološkog napretka s ekološkim i ekonomskim ciljevima koje telekom operatori moraju zadovoljavati, bit će od presudne važnosti za budućnost telekomunikacijskog sektora, koji se suočava s izazovima održivog razvoja u sve složenijem globalnom okruženju.

Na osnovu ovdje provedenih analiza trenutnog stanja područja istraživanja, planiran je doktorat koji će se fokusirati na rješavanje nekih od aktualnih istraživačkih problema. Fokus doktorata će biti na:

- Analizi utjecaja porasta broja korisničkih uređaja na buduću potrošnju energije i energetska učinkovitost 5G mobilnih mreža.
- Analizu metoda za dinamičko upravljanje radio resursima 5G baznih postaja sa ciljem poboljšanja energetske učinkovitosti 5G mobilnih mreža.

LITERATURA

- [1] F. Jejdling, „Ericsson Mobility Report“, Stockholm, Sweden, lip. 2024.
- [2] F. Jejdling, „Ericsson Mobility Report“, Stockholm, Sweden, stu. 2023.
- [3] ETSI, „ES 203 228 (V1.3.1) Environmental Engineering (EE); Assessment of mobile network energy efficiency“, lis. 2020.
- [4] R. Kumar, S. K. Gupta, H. C. Wang, C. S. Kumari, i S. S. V. P. Korlam, „From Efficiency to Sustainability: Exploring the Potential of 6G for a Greener Future“, 2023. doi: 10.3390/su152316387.
- [5] Fraunhofer IIS, „6G Energy Efficiency and Sustainability“, 2023. Pristupljeno: 17. kolovoz 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://www.iis.fraunhofer.de/content/dam/iis/en/doc/lv/Whitepaper6GSustainability.pdf>
- [6] J. Hu, Q. Wang, i K. Yang, „Energy Self-Sustainability in Full-Spectrum 6G“, *IEEE Wirel Commun*, sv. 28, izd. 1, 2021, doi: 10.1109/MWC.001.2000156.
- [7] N. Hu, Z. Tian, X. Du, i M. Guizani, „An Energy-Efficient In-Network Computing Paradigm for 6G“, *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, sv. 5, izd. 4, 2021, doi: 10.1109/TGCN.2021.3099804.
- [8] W. Wu, Z. Xu, S. Zenchenko, i W. Strielkowski, „Does sustainable digital economy have implications for climate change? Novel evidence in the context of sustainable energy technologies“, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, sv. 60, 2023, doi: 10.1016/j.seta.2023.103524.
- [9] A. Suslina, K. Savin, i I. Suslina, „Greening Telecom: Harnessing the Power of Artificial Intelligence for Sustainable Communications“, u *Studies in Computational Intelligence*, 2024. doi: 10.1007/978-3-031-50381-8_94.
- [10] E. Kolta i T. Hatt, „A blueprint for green networks“, 2022.
- [11] S. Maiti i S. Juneja, „Energy Efficiency Techniques in 5G/6G Networks: Green Communication Solutions“, u *Lecture Notes in Networks and Systems*, 2024. doi: 10.1007/978-981-99-9524-0_31.
- [12] T. Huang, W. Yang, J. Wu, J. Ma, X. Zhang, i D. Zhang, „A Survey on Green 6G Network: Architecture and Technologies“, *IEEE Access*, sv. 7, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2957648.
- [13] UNFCCC, „EU Agrees 40% Greenhouse Gas Cut by 2030“. Pristupljeno: 18. srpanj 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://unfccc.int/news/eu-agrees-40-greenhouse-gas-cut-by-2030>
- [14] L. Shields, „Greenhouse Gas Emissions Reduction Targets and Market-based Policies“. Pristupljeno: 20. srpanj 2024. [Na internetu]. Dostupno na:

<https://www.ncsl.org/energy/greenhouse-gas-emissions-reduction-targets-and-market-based-policies>

- [15] S. Dang, O. Amin, B. Shihada, i M. S. Alouini, „What should 6G be?“, *Nat Electron*, sv. 3, izd. 1, 2020, doi: 10.1038/s41928-019-0355-6.
- [16] Tecore Networks, „5G Networks - Evolve to the Next Generation of Wireless“. Pristupljeno: 27. kolovoz 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://tecore.com/5g/>
- [17] T. Hayashi, „Evolved Packet Core (EPC) network equipment for Long Term Evolution (LTE)“, *Fujitsu Scientific and Technical Journal*, sv. 48, izd. 1, 2012.
- [18] H. Holma, A. Toskala, i T. Nakamura, *5G Technology: 3GPP New Radio*. 2019. doi: 10.1002/9781119236306.
- [19] E. Dahlman, S. Parkvall, i J. Sköld, *5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology*. 2018. doi: 10.1016/C2017-0-01347-2.
- [20] G. Liu, Y. Huang, Z. Chen, L. Liu, Q. Wang, i N. Li, „5G Deployment: Standalone vs. Non-Standalone from the Operator Perspective“, *IEEE Communications Magazine*, sv. 58, izd. 11, 2020, doi: 10.1109/MCOM.001.2000230.
- [21] J. Lorincz, Z. Klarin, i J. Ožegović, „A comprehensive overview of tcp congestion control in 5g networks: Research challenges and future perspectives“, 2021. doi: 10.3390/s21134510.
- [22] ITU-R, „IMT Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond“, *Mobile, radiotetermination, amateur and related satellite services*, sv. 0, 2015.
- [23] V. Chamola, S. Patra, N. Kumar, i M. Guizani, „FPGA for 5G: Re-configurable hardware for next generation communication“, *IEEE Wirel Commun*, sv. 27, izd. 3, 2020, doi: 10.1109/MWC.001.1900359.
- [24] H. Chen *i ostali*, „Ultra-Reliable Low Latency Cellular Networks: Use Cases, Challenges and Approaches“, *IEEE Communications Magazine*, sv. 56, izd. 12, 2018, doi: 10.1109/MCOM.2018.1701178.
- [25] M. Ali, S. Mumtaz, S. Qaisar, i M. Naeem, „Smart heterogeneous networks: a 5G paradigm“, *Telecommun Syst*, sv. 66, izd. 2, 2017, doi: 10.1007/s11235-017-0291-6.
- [26] 5G Americas, „Understanding mmWave Spectrum for 5G Networks - White Paper“, 2020, Pristupljeno: 21. kolovoz 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://www.5gamericas.org/wp-content/uploads/2020/12/InDesign-Understanding-mmWave-for-5G-Networks.pdf>
- [27] GSMA, „5G Spectrum - GSMA Public Policy Position“, 2022. Pristupljeno: 23. kolovoz 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://www.gsma.com/connectivity-for-good/spectrum/wp-content/uploads/2022/06/5G-Spectrum-Positions.pdf>

- [28] D. Brenner, „Global 5G spectrum update“, 2020. Pristupljeno: 21. kolovoz 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://www.qualcomm.com/media/documents/files/5g-spectrum-update-for-mipi-alliance.pdf>
- [29] J. Lorincz, Z. Klarin, i D. Begusic, „Modeling and Analysis of Data and Coverage Energy Efficiency for Different Demographic Areas in 5G Networks“, *IEEE Syst J*, sv. 16, izd. 1, 2021, doi: 10.1109/JSYST.2021.3074100.
- [30] GSMA, „5G-Advanced Shaping the future of operator services“, 2024.
- [31] Ericsson, „5G EVOLUTION TOWARD 5G ADVANCED: An overview of 3GPP releases 17 and 18“, 2021. Pristupljeno: 21. kolovoz 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://www.ericsson.com/4a92c5/assets/local/reports-papers/ericsson-technology-review/docs/2021/an-overview-of-3gpp-releases-17-and-18.pdf>
- [32] 5G Americas White Paper, „Becoming 5G-Advanced: the 3GPP 2025 Roadmap“, 2022, Pristupljeno: 21. kolovoz 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://www.5gamericas.org/wp-content/uploads/2022/12/Becoming-5G-Advanced-the-3GPP-2025-Roadmap-InDesign.pdf>
- [33] NEC Corporation, „Beyond 5G / 6G Vision Whitepaper“, 2023.
- [34] Ericsson, „5G Advanced: Evolution towards 6G“, 2023. Pristupljeno: 21. kolovoz 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://www.ericsson.com/49ce19/assets/local/reports-papers/white-papers/5g-advanced-evolution-towards-6g-v2.pdf>
- [35] C. Buratti, L. Clavier, i A. F. Molisch, „Chapter 10 - Perspectives“, u *Inclusive Radio Communications for 5G and Beyond*, 2021.
- [36] C. X. Wang, J. Wang, S. Hu, Z. H. Jiang, J. Tao, i F. Yan, „Key Technologies in 6G Terahertz Wireless Communication Systems: A Survey“, *IEEE Vehicular Technology Magazine*, sv. 16, izd. 4, 2021, doi: 10.1109/MVT.2021.3116420.
- [37] „ITU-R M.2160-0 (11/2023) M Series: Mobile, radiodetermination, amateur and related satellite services Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2030 and beyond“, 2023. Pristupljeno: 22. kolovoz 2024. [Na internetu]. Dostupno na: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.2160-0-202311-I%21%21PDF-E.pdf
- [38] 3GPP, „TR 38.812 Study on Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) for NR“, 2018.
- [39] Y. Chen *i ostali*, „Toward the Standardization of Non-Orthogonal Multiple Access for Next Generation Wireless Networks“, 2018. doi: 10.1109/MCOM.2018.1700845.
- [40] A. Benjebbour, A. Li, K. Saito, Y. Saito, Y. Kishiyama, i T. Nakamura, „NOMA: From concept to standardization“, u *2015 IEEE Conference on Standards for Communications and Networking, CSCN 2015*, 2016. doi: 10.1109/CSCN.2015.7390414.

- [41] S. Sen, N. Santhapuri, R. R. Choudhury, i S. Nelakuditi, „Successive interference cancellation: A back-of-the-envelope perspective“, u *Proceedings of the 9th ACM Workshop on Hot Topics in Networks, Hotnets-9*, 2010. doi: 10.1145/1868447.1868464.
- [42] Y. Saito, Y. Kishiyama, A. Benjebbour, T. Nakamura, A. Li, i K. Higuchi, „Non-orthogonal multiple access (NOMA) for cellular future radio access“, u *IEEE Vehicular Technology Conference*, 2013. doi: 10.1109/VTCSpring.2013.6692652.
- [43] O. M. K. Al-Dulaimi, A. M. K. Al-Dulaimi, M. O. Alexandra, i M. K. H. Al-Dulaimi, „Strategy for Non-Orthogonal Multiple Access and Performance in 5G and 6G Networks“, *Sensors*, sv. 23, izd. 3, 2023, doi: 10.3390/s23031705.
- [44] L. You, D. Yuan, L. Lei, S. Sun, S. Chatzinotas, i B. Ottersten, „Resource optimization with load coupling in multi-cell NOMA“, *IEEE Trans Wirel Commun*, sv. 17, izd. 7, 2018, doi: 10.1109/TWC.2018.2830386.
- [45] X. Xu, Y. Liu, X. Mu, Q. Chen, H. Jiang, i Z. Ding, „Artificial Intelligence Enabled NOMA Toward Next Generation Multiple Access“, *IEEE Wirel Commun*, sv. 30, izd. 1, 2023, doi: 10.1109/MWC.003.2200239.
- [46] S. Aneesh i A. N. Shaikh, „A device to device driven approach towards optimizing energy efficiency for 6G networks“, *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, sv. 34, izd. 3, str. 1682–1689, lip. 2024, doi: 10.11591/ijeecs.v34.i3.pp1682-1689.
- [47] D. Laselva, S. Hakimi, M. Lauridsen, B. Khan, D. Kumar, i P. Mogensen, „On the Potential of Radio Adaptations for 6G Network Energy Saving“, 2024.
- [48] D. Negi, F. Prakash, i A. Gupta, „Influence of AI and MAS in Enhancing Energy Efficiency of 6G Communications“, u *2024 International Conference on Communication, Computer Sciences and Engineering (IC3SE)*, 2024, str. 234–238. doi: 10.1109/IC3SE62002.2024.10593501.
- [49] J. Lorincz, L. Chiaraviglio, i F. Cuomo, „A measurement study of short-time cell outages in mobile cellular networks“, *Comput Commun*, sv. 79, 2016, doi: 10.1016/j.comcom.2015.12.006.
- [50] GSMA, „Mobile Net Zero State of the Industry on Climate Action 2021“, 2021. Pristupljeno: 17. kolovoz 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://www.gsma.com/solutions-and-impact/connectivity-for-good/external-affairs/wp-content/uploads/2021/04/Mobile-Net-Zero-State-of-the-Industry-on-Climate-Action.pdf>
- [51] C. Freitag, M. Berners-Lee, K. Widdicks, B. Knowles, G. S. Blair, i A. Friday, „The real climate and transformative impact of ICT: A critique of estimates, trends, and regulations“, 2021. doi: 10.1016/j.patter.2021.100340.
- [52] Global e-Sustainability Initiative (GeSI), „SMARTer2030-ICT Solutions for 21st Century Challenges“, *Global e-Sustainability Initiative (GeSI)*, 2015.

- [53] Ltd. Huawei Technologies Co., „Green 5G White Paper“, 2020, Pristupljeno: 18. kolovoz 2024. [Na internetu]. Dostupno na: https://www-file.huawei.com/-/media/corp2020/pdf/tech-insights/1/green_5g_white_paper_en_v2.pdf
- [54] M. H. Alsharif, J. Kim, i J. H. Kim, „Green and sustainable cellular base stations: An overview and future research directions“, 2017. doi: 10.3390/en10050587.
- [55] W. Hao, M. Zeng, Z. Chu, S. Yang, i G. Sun, „Energy-Efficient Resource Allocation for mmWave Massive MIMO HetNets with Wireless Backhaul“, *IEEE Access*, sv. 6, 2017, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2783544.
- [56] ETSI, „TS 128 310 - V18.4.0 - LTE; 5G; Management and orchestration; Energy efficiency of 5G (3GPP TS 28.310 version 18.4.0 Release 18)“, 2024. Pristupljeno: 18. kolovoz 2024. [Na internetu]. Dostupno na: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/128300_128399/128310/18.04.00_60/ts_128310v180400p.pdf
- [57] NGMN Alliance, „Green Future Networks - Network Energy Efficiency“, 2021. Pristupljeno: 22. kolovoz 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://www.ngmn.org/wp-content/uploads/211009-GFN-Network-Energy-Efficiency-1.0.pdf>
- [58] P. Kaur, R. Garg, i V. Kukreja, „Energy-efficiency schemes for base stations in 5G heterogeneous networks: a systematic literature review“, 2023. doi: 10.1007/s11235-023-01037-x.
- [59] M. Heskamp, R. Schiphorst, i K. Slump, „Public safety and cognitive radio“, u *Cognitive Radio Communications and Networks*, 2010. doi: 10.1016/b978-0-12-374715-0.00016-2.
- [60] T. Keller, „Adaptive modulation techniques for duplex OFDM transmission“, *IEEE Trans Veh Technol*, sv. 49, izd. 5, 2000, doi: 10.1109/25.892592.
- [61] M. I. Salman, C. K. Ng, i N. K. Noordin, „Energy- and spectral-efficient wireless cellular networks“, u *Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering*, 2012. doi: 10.1007/978-3-642-33368-2_15.
- [62] W. Tan, S. Li, i M. Zhou, „Spectral and energy efficiency for uplink massive MIMO systems with mixed-ADC architecture“, *Physical Communication*, sv. 50, 2022, doi: 10.1016/j.phycom.2021.101516.
- [63] R. P. Devi i N. Prabakaran, „Hybrid Cuckoo Search with Salp Swarm Optimization for Spectral and Energy Efficiency Maximization in NOMA System“, *Wirel Pers Commun*, sv. 124, izd. 1, 2022, doi: 10.1007/s11277-021-09361-8.
- [64] Y. Zhang i A. Årvidsson, „Understanding the characteristics of cellular data traffic“, u *CellNet'12 - Proceedings of the ACM Workshop on Cellular Networks: Operations, Challenges, and Future Design*, 2012. doi: 10.1145/2342468.2342472.

- [65] S. Kemp, „Digital 2023 July Global Statshot Report“. Pristupljeno: 18. kolovoz 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://datareportal.com/reports/digital-2023-july-global-statshot>
- [66] Ericsson, „Exploring how traffic patterns drive network evolution. Extract from the Ericsson Mobility Report“, Stockholm, Sweden, lip. 2023.
- [67] Q. Ou i ostali, „A Method of Dynamic Resource Adjustment for 5G Network Slice“, u *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2021. doi: 10.1007/978-981-15-3753-0_91.
- [68] G. Wu i D. Zeng, „Optimization of network resource management based on software-defined networking in the 5G environment“, *Journal of Supercomputing*, sv. 78, izd. 15, 2022, doi: 10.1007/s11227-022-04547-8.
- [69] S. E. Elayoubi, L. Saker, i T. Chahed, „Optimal control for base station sleep mode in energy efficient radio access networks“, u *Proceedings - IEEE INFOCOM*, 2011. doi: 10.1109/INFCOM.2011.5934881.
- [70] K. Dufková, M. Bjelica, B. Moon, L. Kencl, i J. Y. Le Boudec, „Energy savings for cellular network with evaluation of impact on data traffic performance“, u *2010 European Wireless Conference, EW 2010*, 2010. doi: 10.1109/EW.2010.5483431.
- [71] X. Guo, Z. Niu, S. Zhou, i P. R. Kumar, „Delay-Constrained Energy-Optimal Base Station Sleeping Control“, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, sv. 34, izd. 5, 2016, doi: 10.1109/JSAC.2016.2520221.
- [72] S. R. Samal, „Interference management techniques in small cells overlaid heterogeneous cellular networks“, 2018. doi: 10.13052/jmm1550-4646.1432.
- [73] N. Trabelsi, L. Chaari Fourati, i C. S. Chen, „Interference management in 5G and beyond networks: A comprehensive survey“, 2024. doi: 10.1016/j.comnet.2023.110159.
- [74] F. Baccelli, M. Klein, M. Lebourges, i S. Zuyev, „Stochastic geometry and architecture of communication networks“, *Telecommun Syst*, sv. 7, izd. 1–3, 1997, doi: 10.1023/a:1019172312328.
- [75] J. Lorincz, Z. Klarin, i D. Begusic, „Advances in Improving Energy Efficiency of Fiber–Wireless Access Networks: A Comprehensive Overview“, 2023. doi: 10.3390/s23042239.
- [76] Huawei, „Green 5g: Building a sustainable world“, 2020. Pristupljeno: 18. kolovoz 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://www.huawei.com/en/public-policy/green-5g-building-a-sustainable-world>
- [77] J. Lorincz, A. Capone, i J. Wu, „Greener, energy-efficient and sustainable networks: State-of-the-art and new trends“, 2019. doi: 10.3390/s19224864.
- [78] M. Usama i M. Erol-Kantarci, „A survey on recent trends and open issues in energy efficiency of 5G“, 2019. doi: 10.3390/s19143126.

- [79] X. Ge, J. Yang, H. Gharavi, i Y. Sun, „Energy Efficiency Challenges of 5G Small Cell Networks“, *IEEE Communications Magazine*, sv. 55, izd. 5, 2017, doi: 10.1109/MCOM.2017.1600788.
- [80] Open Networking Foundation, „Software-Defined Networking: The New Norm for Networks [white paper]“, *ONF White Paper*, 2012.
- [81] S. Iyer, „Virtualisation of Network Functions and the SDN“, *Australian Journal of Telecommunications and the Digital Economy*, sv. 2, izd. 2, 2014.
- [82] S. Yadav i S. Nanivadekar, „Hybrid Optimization Assisted Green Power Allocation Model for QoS-Driven Energy-Efficiency in 5G Networks“, *Cybern Syst*, 2023, doi: 10.1080/01969722.2023.2175147.
- [83] R. Moosavi, S. Parsaeefard, M. A. Maddah-Ali, V. Shah-Mansouri, B. H. Khalaj, i M. Bennis, „Energy efficiency through joint routing and function placement in different modes of SDN/NFV networks“, *Computer Networks*, sv. 200, 2021, doi: 10.1016/j.comnet.2021.108492.
- [84] O. M. Ebadati E i H. R. Ebadati E, „Implementing Software-Defined Networks in Heterogeneous 5G Communications to Provide Security and Intelligent Resource Management“, u *Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*, sv. 124, 2022. doi: 10.1007/978-3-030-97610-1_54.
- [85] B. Chen, F. Slyne, i M. Ruffini, „Energy Efficient SDN and SDR Joint Adaptation of CPU Utilization Based on Experimental Data Analytics“, u *IEEE International Conference on Communications*, 2023. doi: 10.1109/ICC45041.2023.10279620.
- [86] J. Lorincz, A. Kukuruzović, i Z. Blažević, „A Comprehensive Overview of Network Slicing for Improving the Energy Efficiency of Fifth-Generation Networks“, 01. svibanj 2024., *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/s24103242.
- [87] L. U. Khan, I. Yaqoob, N. H. Tran, Z. Han, i C. S. Hong, „Network Slicing: Recent Advances, Taxonomy, Requirements, and Open Research Challenges“, *IEEE Access*, sv. 8, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2975072.
- [88] M. Condoluci, F. Sardis, i T. Mahmoodi, „Softwarization and virtualization in 5G networks for smart cities“, u *Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering, LNICST*, 2016. doi: 10.1007/978-3-319-47063-4_16.
- [89] X. Foukas, G. Patounas, A. Elmokashfi, i M. K. Marina, „Network Slicing in 5G: Survey and Challenges“, 2017. doi: 10.1109/MCOM.2017.1600951.
- [90] I. P. Chochliouros i ostali, „Energy efficiency concerns and trends in future 5g network infrastructures“, *Energies (Basel)*, sv. 14, izd. 17, 2021, doi: 10.3390/en14175392.
- [91] GSMA, „Going green: measuring the energy efficiency of mobile networks“, 2024. Pristupljeno: 18. kolovoz 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://data.gsmaintelligence.com/api-web/v2/research-file->

download?id=79791160&file=270224-Measuring-energy-efficiency-of-mobile-networks.pdf

- [92] NGMN Alliance, „Network energy efficiency phase 2“, 2023. Pristupljeno: 18. kolovoz 2024. [Na internetu]. Dostupno na: https://www.ngmn.org/wp-content/uploads/NGMN_Network_Energy_Efficiency_Phase2.pdf
- [93] J. O. Ogbebor, A. L. Imoize, i A. A. A. Atayero, „Energy Efficient Design Techniques in Next-Generation Wireless Communication Networks: Emerging Trends and Future Directions“, 2020. doi: 10.1155/2020/7235362.
- [94] J. Wu, Y. Zhang, M. Zukerman, i E. K. N. Yung, „Energy-efficient base-stations sleep-mode techniques in green cellular networks: A survey“, *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, sv. 17, izd. 2, 2015, doi: 10.1109/COMST.2015.2403395.
- [95] M. Isaksson, „Radio Frequency Power Amplifiers Behavioral Modeling, Parameter-Reduction, and Digital Predistortion“, KTH Royal Institute of Technology in Stockholm, Stockholm, 2007.
- [96] Q. F. Cheng, S. K. Zhu, i H. F. Wu, „Investigating the global trend of RF power amplifiers with the arrival of 5G“, u *2015 IEEE International Wireless Symposium, IWS 2015*, 2015. doi: 10.1109/IEEE-IWS.2015.7164624.
- [97] A. Vasjanov i V. Barzdenas, „A review of advanced CMOS RF power amplifier architecture trends for low power 5G wireless networks“, 2018. doi: 10.3390/electronics7110271.
- [98] P. Y. Chen i ostali, „Learning to Compensate: A Deep Neural Network Framework for 5G Power Amplifier Compensation“, u *IEEE International Conference on Communications*, 2021. doi: 10.1109/ICC42927.2021.9500277.
- [99] P. Visconti, R. Velazquez, C. Del-Valle-Soto, i R. De Fazio, „FPGA based technical solutions for high throughput data processing and encryption for 5G communication: A review“, *Telkommnika (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, sv. 19, izd. 4, 2021, doi: 10.12928/TELKOMNIKA.v19i4.18400.
- [100] N. Amani, H. Pedram, H. Taheri, i S. Parsaeefard, „Energy-efficient resource allocation in heterogeneous cloud radio access networks via BBU offloading“, *IEEE Trans Veh Technol*, sv. 68, izd. 2, 2019, doi: 10.1109/TVT.2018.2882466.
- [101] J. Gao, X. Guan, S. Zhang, i X. Meng, „Resource Allocation Optimization Based on Energy Efficiency in Green Cloud Radio Access Network“, *Wirel Commun Mob Comput*, sv. 2022, 2022, doi: 10.1155/2022/8932961.
- [102] R. Guerra-Gomez, S. Ruiz-Boque, M. Garcia-Lozano, i J. O. Bonafe, „Machine Learning Adaptive Computational Capacity Prediction for Dynamic Resource Management in C-RAN“, *IEEE Access*, sv. 8, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2994258.

- [103] K. Son, H. Kim, Y. Yi, i B. Krishnamachari, „Base station operation and user association mechanisms for energy-delay tradeoffs in green cellular networks“, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, sv. 29, izd. 8, 2011, doi: 10.1109/JSAC.2011.110903.
- [104] S. Bhaumik, G. Narlikar, S. Chattopadhyay, i S. Kanugovi, „Breathe to stay cool: Adjusting cell sizes to reduce energy consumption“, u *Proceedings of the 1st ACM SIGCOMM Workshop on Green Networking, Green Networking '10, Co-located with SIGCOMM 2010*, 2010. doi: 10.1145/1851290.1851300.
- [105] M. F. Hossain, K. S. Munasinghe, i A. Jamalipour, „Toward self-organizing sectorization of LTE eNBs for energy efficient network operation under QoS constraints“, u *IEEE Wireless Communications and Networking Conference, WCNC*, 2013. doi: 10.1109/WCNC.2013.6554748.
- [106] G. Micallef, P. Mogensen, i H. O. Sheck, „Cell size breathing and possibilities to introduce cell sleep mode“, u *2010 European Wireless Conference, EW 2010*, 2010. doi: 10.1109/EW.2010.5483401.
- [107] J. Lin, Y. Chen, H. Zheng, M. Ding, P. Cheng, i L. Hanzo, „A Data-driven Base Station Sleeping Strategy Based on Traffic Prediction“, *IEEE Trans Netw Sci Eng*, 2021, doi: 10.1109/TNSE.2021.3109614.
- [108] P. González-Brevis i ostali, „Base station location optimization for minimal energy consumption in wireless networks“, u *IEEE Vehicular Technology Conference*, 2011. doi: 10.1109/VETECS.2011.5956204.
- [109] P. Long, J. Li, N. Liu, Z. Pan, i X. You, „Energy-Saving Small-Cell Wake Up Strategy for Ultra-Dense Networks Based on User Behavior Prediction“, u *ACM International Conference Proceeding Series*, 2023. doi: 10.1145/3603781.3603824.
- [110] G. Chopra, „An Efficient Base Station Sleeping Configuration for Ultra-dense Networks“, u *2023 International Conference on Emerging Smart Computing and Informatics, ESCI 2023*, 2023. doi: 10.1109/ESCI56872.2023.10100245.
- [111] L. Li i W. Meng, „Collaborative base station sleeping solution design in heterogeneous cellular network“, u *APCC 2022 - 27th Asia-Pacific Conference on Communications: Creating Innovative Communication Technologies for Post-Pandemic Era*, 2022. doi: 10.1109/APCC55198.2022.9943603.
- [112] X. Li i C. Zhang, „Semi-dynamic Markov approximation-based base station sleep with user association for heterogeneous networks“, *IET Communications*, sv. 17, izd. 6, 2023, doi: 10.1049/cmu2.12574.
- [113] F. Han, Z. Safar, W. S. Lin, Y. Chen, i K. J. R. Liu, „Energy-efficient cellular network operation via base station cooperation“, u *IEEE International Conference on Communications*, 2012. doi: 10.1109/ICC.2012.6364370.

- [114] J. Lorincz, A. Capone, i D. Begušić, „Heuristic algorithms for optimization of energy consumption in wireless access networks“, *KSII Transactions on Internet and Information Systems*, sv. 5, izd. 4, 2011, doi: 10.3837/tiis.2011.04.001.
- [115] R. Wang, J. S. Thompson, H. Haas, i P. M. Grant, „Sleep mode design for green base stations“, *IET Communications*, sv. 5, izd. 18, 2011, doi: 10.1049/iet-com.2011.0104.
- [116] J. Lorincz, A. Capone, i D. Begusic, „Impact of service rates and base station switching granularity on energy consumption of cellular networks“, *EURASIP J Wirel Commun Netw*, sv. 2012, izd. 1, 2012, doi: 10.1186/1687-1499-2012-342.
- [117] „3GPP Specification: 3GPP TS 32.521“, 2010. Pristupljeno: 17. kolovoz 2024. [Na internetu]. Dostupno na: [http:// www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/32521.htm](http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/32521.htm)
- [118] J. Lorincz, „Energy-efficient wireless cellular communications through network resource dynamic adaptation“, *International Journal of Business Data Communications and Networking*, sv. 9, izd. 2, 2013, doi: 10.4018/jbdcn.2013040102.
- [119] J. Lorincz i T. Matijevic, „Energy-efficiency analyses of heterogeneous macro and micro base station sites“, u *Computers and Electrical Engineering*, 2014. doi: 10.1016/j.compeleceng.2013.10.013.
- [120] S. Malta, P. Pinto, i M. Fernandez-Veiga, „Using Reinforcement Learning to Reduce Energy Consumption of Ultra-Dense Networks With 5G Use Cases Requirements“, *IEEE Access*, sv. 11, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3236980.
- [121] N. Piovesan, D. Lopez-Perez, M. Miozzo, i P. Dini, „Joint Load Control and Energy Sharing for Renewable Powered Small Base Stations: A Machine Learning Approach“, *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, sv. 5, izd. 1, 2021, doi: 10.1109/TGCN.2020.3027063.
- [122] A. Aggarwal i D. Selvamuthu, „Energy Optimization of a Base Station using Q-learning Algorithm“, u *17th International Conference on Telecommunications, ConTEL 2023*, 2023. doi: 10.1109/ConTEL58387.2023.10198963.
- [123] I. Guerra, B. Yin, S. Zhang, i Y. Cheng, „Optimization of Base Station ON-Off Switching with a Machine Learning Approach“, u *IEEE International Conference on Communications*, 2021. doi: 10.1109/ICC42927.2021.9500412.
- [124] P. Kaur i R. Garg, „Improving Energy Efficiency of 5G Base Stations: A Comprehensive AI-Based Optimization Approach“, u *Lecture Notes in Networks and Systems*, 2023. doi: 10.1007/978-981-99-1699-3_31.
- [125] T. P. Fowdur i B. Doorgakant, „A review of machine learning techniques for enhanced energy efficient 5G and 6G communications“, 2023. doi: 10.1016/j.engappai.2023.106032.
- [126] S. Cui, A. J. Goldsmith, i A. Bahai, „Energy-efficiency of MIMO and cooperative MIMO techniques in sensor networks“, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, sv. 22, izd. 6, 2004, doi: 10.1109/JSAC.2004.830916.

- [127] J. Lorincz, T. Matijevic, i G. Petrovic, „On interdependence among transmit and consumed power of macro base station technologies“, *Comput Commun*, sv. 50, 2014, doi: 10.1016/j.comcom.2014.02.010.
- [128] S. Biswas, A. M. Nasir, i M. F. Hossain, „A deep learning based energy efficient downlink power control mechanism for cellular networks“, u *Proceedings of 2020 11th International Conference on Electrical and Computer Engineering, ICECE 2020*, 2020. doi: 10.1109/ICECE51571.2020.9393086.
- [129] M. A. Charar i Z. Guennoun, „Energy efficient power control for device to device communication in 5G networks“, *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, sv. 10, izd. 4, 2020, doi: 10.11591/ijece.v10i4.pp4118-4135.
- [130] V. Khodamoradi, A. Sali, A. A. Salah, B. M. Ali, R. S. A. R. Abdullah, i I. Krikidis, „Energy efficient base station transmit power adaptation for green 5g massive MIMO systems“, u *IEEE Vehicular Technology Conference*, 2019. doi: 10.1109/VTCSpring.2019.8746310.
- [131] I. Salah, M. M. Mabrook, K. H. Rahouma, i A. I. Hussein, „Energy efficiency optimization in adaptive massive MIMO networks for 5G applications using genetic algorithm“, *Opt Quantum Electron*, sv. 54, izd. 2, 2022, doi: 10.1007/s11082-021-03507-5.
- [132] J. Zhang, H. Deng, Y. Li, Z. Zhu, G. Liu, i H. Liu, „Energy Efficiency Optimization of Massive MIMO System with Uplink Multi-Cell Based on Imperfect CSI with Power Control“, *Symmetry (Basel)*, sv. 14, izd. 4, 2022, doi: 10.3390/sym14040780.
- [133] M. Y. Ali, T. Hossain, i M. M. Mowla, „A Trade-off between Energy and Spectral Efficiency in Massive MIMO 5G System“, u *3rd International Conference on Electrical, Computer and Telecommunication Engineering, ICECTE 2019*, 2019. doi: 10.1109/ICECTE48615.2019.9303551.
- [134] E. McCune, „Energy efficiency maxima for wireless communications: 5G, IoT, and massive MIMO“, u *Proceedings of the Custom Integrated Circuits Conference*, 2017. doi: 10.1109/CICC.2017.7993614.
- [135] L. Sanguinetti, A. Zappone, i M. Debbah, „Deep Learning Power Allocation in Massive MIMO“, u *Conference Record - Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, 2018. doi: 10.1109/ACSSC.2018.8645343.
- [136] S. Haykin, „Cognitive radio: Brain-empowered wireless communications“, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, sv. 23, izd. 2, 2005, doi: 10.1109/JSAC.2004.839380.
- [137] M. U. Muzaffar i R. Sharqi, „A review of spectrum sensing in modern cognitive radio networks“, 2024. doi: 10.1007/s11235-023-01079-1.

- [138] S. Sasikumar i J. Jayakumari, „A novel method for the optimization of Spectral -Energy efficiency tradeoff in 5 G heterogeneous Cognitive Radio Network“, *Computer Networks*, sv. 180, 2020, doi: 10.1016/j.comnet.2020.107389.
- [139] O. I. Khalaf, K. A. Ogudo, i M. Singh, „A fuzzy-based optimization technique for the energy and spectrum efficiencies trade-off in cognitive radio-enabled 5g network“, *Symmetry (Basel)*, sv. 13, izd. 1, 2021, doi: 10.3390/sym13010047.
- [140] M. Li, P. Li, X. Huang, Y. Fang, i S. Glisic, „Energy consumption optimization for multihop cognitive cellular networks“, *IEEE Trans Mob Comput*, sv. 14, izd. 2, 2015, doi: 10.1109/TMC.2014.2320275.
- [141] C. Xiong, G. Y. Li, S. Zhang, Y. Chen, i S. Xu, „Energy-efficient resource allocation in OFDMA networks“, *IEEE Transactions on Communications*, sv. 60, izd. 12, 2012, doi: 10.1109/TCOMM.2012.082812.110639.
- [142] I. Al Qerm i B. Shihada, „Enhanced machine learning scheme for energy efficient resource allocation in 5g heterogeneous cloud radio access networks“, u *IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, PIMRC*, 2017. doi: 10.1109/PIMRC.2017.8292227.
- [143] A. Attar, H. Li, i V. C. M. Leung, „Green last mile: How fiber-connected massively distributed antenna systems can save energy“, *IEEE Wirel Commun*, sv. 18, izd. 5, 2011, doi: 10.1109/MWC.2011.6056694.
- [144] G. Y. Li i ostali, „Energy-efficient wireless communications: Tutorial, survey, and open issues“, *IEEE Wirel Commun*, sv. 18, izd. 6, 2011, doi: 10.1109/MWC.2011.6108331.
- [145] M. M. Butt, B. Schubert, M. Kurras, K. Borner, T. Haustein, i L. Thiele, „On the energy-bandwidth trade-off in green wireless networks: System level results“, u *2012 1st IEEE International Conference on Communications in China Workshops, ICCCW 2012*, 2012. doi: 10.1109/ICCCW.2012.6316482.
- [146] J. Lorincz, I. Ramljak, i D. Begušić, „A survey on the energy detection of ofdm signals with dynamic threshold adaptation: Open issues and future challenges“, 2021. doi: 10.3390/s21093080.
- [147] J. Lorincz, I. Ramljak, i D. Begušić, „A review of the noise uncertainty impact on energy detection with different OFDM system designs“, 2019. doi: 10.1016/j.comcom.2019.09.013.
- [148] J. Lorincz, I. Ramljak, i D. Begušić, „Analysis of the Impact of Detection Threshold Adjustments and Noise Uncertainty on Energy Detection Performance in MIMO-OFDM Cognitive Radio Systems“, *Sensors*, sv. 22, izd. 2, 2022, doi: 10.3390/s22020631.
- [149] J. Lorincz, I. Ramljak, i D. Begušić, „Performance analyses of energy detection based on square-law combining in MIMO-OFDM cognitive radio networks“, *Sensors*, sv. 21, izd. 22, 2021, doi: 10.3390/s21227678.

- [150] J. Lorincz, I. Ramljak, i D. Begusic, „Algorithm for evaluating energy detection spectrum sensing performance of cognitive radio MIMO-OFDM systems“, *Sensors*, sv. 21, izd. 20, 2021, doi: 10.3390/s21206881.
- [151] J. Hoydis, M. Kobayashi, i M. Debbah, „Green small-cell networks“, *IEEE Vehicular Technology Magazine*, sv. 6, izd. 1, 2011, doi: 10.1109/MVT.2010.939904.
- [152] A. Jothimani i A. S. Edward, „Review of energy efficient architectures based on small cell driven 5G networks“, u *AIP Conference Proceedings*, 2020. doi: 10.1063/5.0028714.
- [153] H. Jiang, Z. Xiao, Z. Li, J. Xu, F. Zeng, i D. Wang, „An Energy-Efficient Framework for Internet of Things Underlying Heterogeneous Small Cell Networks“, *IEEE Trans Mob Comput*, sv. 21, izd. 1, 2022, doi: 10.1109/TMC.2020.3005908.
- [154] S. Samarakoon, M. Bennis, W. Saad, M. Debbah, i M. Latva-Aho, „Ultra dense small cell networks: Turning density into energy efficiency“, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, sv. 34, izd. 5, 2016, doi: 10.1109/JSAC.2016.2545539.
- [155] O. Fratu, A. Vulpe, R. Craciunescu, i S. Halunga, „Small cells in cellular networks: Challenges of future HetNets“, *Wirel Pers Commun*, sv. 78, izd. 3, 2014, doi: 10.1007/s11277-014-1906-9.
- [156] Y. Zhang, Y. Xu, Y. Sun, Q. Wu, i K. Yao, „Energy Efficiency of Small Cell Networks: Metrics, Methods and Market“, *IEEE Access*, sv. 5, 2017, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2696025.
- [157] J. Lorincz, I. Bule, i M. Kapov, „Performance analyses of renewable and fuel power supply systems for different base station sites“, *Energies (Basel)*, sv. 7, izd. 12, 2014, doi: 10.3390/en7127816.
- [158] J. Lorincz i I. Bule, „Renewable energy sources for power supply of base station sites“, *International Journal of Business Data Communications and Networking*, sv. 9, izd. 3, 2013, doi: 10.4018/jbdcn.2013070104.
- [159] M. H. Alsharif, R. Kannadasan, A. Jahid, M. A. Albreem, J. Nebhen, i B. J. Choi, „Long-Term Techno-Economic Analysis of Sustainable and Zero Grid Cellular Base Station“, *IEEE Access*, sv. 9, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3071250.
- [160] M. L. Ku, W. Li, Y. Chen, i K. J. Ray Liu, „Advances in Energy Harvesting Communications: Past, Present, and Future Challenges“, *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, sv. 18, izd. 2, 2016, doi: 10.1109/COMST.2015.2497324.
- [161] X. Huang i ostali, „Software Defined Energy Harvesting Networking for 5G Green Communications“, *IEEE Wirel Commun*, sv. 24, izd. 4, 2017, doi: 10.1109/MWC.2017.1600360.
- [162] Y. Liu, Y. Zhang, R. Yu, i S. Xie, „Integrated energy and spectrum harvesting for 5G wireless communications“, *IEEE Netw*, sv. 29, izd. 3, 2015, doi: 10.1109/MNET.2015.7113229.

- [163] H. Heidari, O. Onireti, R. Das, i M. Imran, „Energy Harvesting and Power Management for IoT Devices in the 5G Era“, *IEEE Communications Magazine*, sv. 59, izd. 9, 2021, doi: 10.1109/MCOM.101.2100487.
- [164] J. Yang, Z. Yang, i Y. Duan, „Optimal capacity and operation strategy of a solar-wind hybrid renewable energy system“, *Energy Convers Manag*, sv. 244, 2021, doi: 10.1016/j.enconman.2021.114519.
- [165] V. Chamola i B. Sikdar, „Solar powered cellular base stations: current scenario, issues and proposed solutions“, *IEEE Communications Magazine*, sv. 54, izd. 5, 2016, doi: 10.1109/MCOM.2016.7470944.
- [166] I. F. Bitterlin, „Modelling a reliable wind/PV/storage power system for remote radio base station sites without utility power“, *J Power Sources*, sv. 162, izd. 2 SPEC. ISS., 2006, doi: 10.1016/j.jpowsour.2005.07.011.
- [167] P. Zhao, W. Xu, S. Zhang, J. Wang, i Y. Dai, „Technical feasibility assessment of a standalone photovoltaic/wind/adiabatic compressed air energy storage based hybrid energy supply system for rural mobile base station“, *Energy Convers Manag*, sv. 206, 2020, doi: 10.1016/j.enconman.2020.112486.
- [168] O. Abuajwa i S. Mitani, „Dynamic resource allocation for energy-efficient downlink NOMA systems in 5G networks“, *Heliyon*, sv. 10, izd. 9, svi. 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e29956.
- [169] W. U. Khan, X. Li, A. Ihsan, Z. Ali, B. M. Elhalawany, i G. A. S. Sidhu, „Energy efficiency maximization for beyond 5G NOMA-enabled heterogeneous networks“, *Peer Peer Netw Appl*, sv. 14, izd. 5, 2021, doi: 10.1007/s12083-021-01176-5.
- [170] H. Zhang, F. Fang, J. Cheng, K. Long, W. Wang, i V. C. M. Leung, „Energy-Efficient Resource Allocation in NOMA Heterogeneous Networks“, *IEEE Wirel Commun*, sv. 25, izd. 2, 2018, doi: 10.1109/MWC.2018.1700074.
- [171] H. Zhang i ostali, „Energy Efficient Dynamic Resource Optimization in NOMA System“, *IEEE Trans Wirel Commun*, sv. 17, izd. 9, 2018, doi: 10.1109/TWC.2018.2844359.
- [172] J. Tang i ostali, „Energy Efficiency Optimization for NOMA with SWIPT“, *IEEE Journal on Selected Topics in Signal Processing*, sv. 13, izd. 3, 2019, doi: 10.1109/JSTSP.2019.2898114.
- [173] A. A. Nasir, H. D. Tuan, T. Q. Duong, i M. Debbah, „NOMA Throughput and Energy Efficiency in Energy Harvesting Enabled Networks“, *IEEE Transactions on Communications*, sv. 67, izd. 9, 2019, doi: 10.1109/TCOMM.2019.2919558.
- [174] H. Huang, Y. Yang, Z. Ding, H. Wang, H. Sari, i F. Adachi, „Deep Learning-Based Sum Data Rate and Energy Efficiency Optimization for MIMO-NOMA Systems“, *IEEE Trans Wirel Commun*, sv. 19, izd. 8, 2020, doi: 10.1109/TWC.2020.2992786.

- [175] Y. Zhang, X. Wang, i Y. Xu, „Energy-Efficient Resource Allocation in Uplink NOMA Systems with Deep Reinforcement Learning“, u *2019 11th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing, WCSP 2019*, 2019. doi: 10.1109/WCSP.2019.8927898.
- [176] O. Akin, U. C. Gulmez, O. Sazak, O. U. Yagmur, i P. Angin, „GreenSlice: An Energy-Efficient Secure Network Slicing Framework“, *Journal of Internet Services and Information Security*, sv. 12, izd. 1, 2022, doi: 10.22667/JISIS.2022.02.28.057.
- [177] F. Zhou i ostali, „Automatic Network Slicing for IoT in Smart City“, *IEEE Wirel Commun*, sv. 27, izd. 6, 2020, doi: 10.1109/MWC.001.2000069.
- [178] Y. Wu, H. N. Dai, H. Wang, Z. Xiong, i S. Guo, „A Survey of Intelligent Network Slicing Management for Industrial IoT: Integrated Approaches for Smart Transportation, Smart Energy, and Smart Factory“, 2022. doi: 10.1109/COMST.2022.3158270.
- [179] M. Masoudi, O. T. Demir, J. Zander, i C. Cavdar, „Energy-Optimal End-to-End Network Slicing in Cloud-Based Architecture“, *IEEE Open Journal of the Communications Society*, sv. 3, 2022, doi: 10.1109/OJCOMS.2022.3162116.
- [180] Y. Xiao i M. Krunz, „Dynamic network slicing for scalable fog computing systems with energy harvesting“, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, sv. 36, izd. 12, 2018, doi: 10.1109/JSAC.2018.2871292.
- [181] C. Tipantuña i X. Hesselbach, „Adaptive energy management in 5G network slicing: Requirements, architecture, and strategies“, *Energies (Basel)*, sv. 13, izd. 15, 2020, doi: 10.3390/en13153984.
- [182] L. B. Mohammed, A. Anpalagan, i M. Jaseemuddin, „Energy and Latency Efficient Caching in Mobile Edge Networks: Survey, Solutions, and Challenges“, 2023. doi: 10.1007/s11277-023-10187-9.
- [183] C. Liang, Y. He, F. R. Yu, i N. Zhao, „Energy-efficient resource allocation in software-defined mobile networks with mobile edge computing and caching“, u *2017 IEEE Conference on Computer Communications Workshops, INFOCOM WKSHPS 2017*, 2017. doi: 10.1109/INFCOMW.2017.8116363.
- [184] H. Hu, W. Song, Q. Wang, R. Q. Hu, i H. Zhu, „Energy Efficiency and Delay Tradeoff in an MEC-Enabled Mobile IoT Network“, *IEEE Internet Things J*, sv. 9, izd. 17, 2022, doi: 10.1109/JIOT.2022.3153847.
- [185] U. Barth i ostali, „GreenTouch Roadmap: Strategic Research Areas and Project Portfolio“, 2012. Pristupljeno: 23. kolovoz 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://www.bell-labs.com/greentouch/uploads/documents/GreenTouch%20Strategic%20Research%20Areas%20and%20Project%20Portfolio.pdf>
- [186] A. Clemm i C. Westphal, „Challenges and Opportunities in Green Networking“, u *Proceedings of the 2022 IEEE International Conference on Network Softwarization*:

Network Softwarization Coming of Age: New Challenges and Opportunities, NetSoft 2022, 2022. doi: 10.1109/NetSoft54395.2022.9844020.

- [187] O. Aydin, E. A. Jorswieck, D. Aziz, i A. Zappone, „Energy-Spectral Efficiency Tradeoffs in 5G Multi-Operator Networks with Heterogeneous Constraints“, *IEEE Trans Wirel Commun*, sv. 16, izd. 9, 2017, doi: 10.1109/TWC.2017.2716948.
- [188] A. D. Firouzabadi, A. M. Rabiei, i M. Vehkaperä, „Fractional Frequency Reuse in Random Hybrid FD/HD Small Cell Networks with Fractional Power Control“, *IEEE Trans Wirel Commun*, sv. 20, izd. 10, 2021, doi: 10.1109/TWC.2021.3075987.
- [189] A. Shabbir, S. Rizvi, M. M. Alam, F. Shirazi, i M. M. Su’ud, „Optimizing energy efficiency in heterogeneous networks: An integrated stochastic geometry approach with novel sleep mode strategies and QoS framework“, *PLoS One*, sv. 19, izd. 2 February, 2024, doi: 10.1371/journal.pone.0296392.
- [190] L. B. Mohammed, „Latency efficient cache placement using learning techniques in mobile edge networks“, 2022.

POPIS OZNAKA I KRATICA

1G	1st Generation Mobile Network
2G	2nd Generation Mobile Network
3G	3rd Generation Mobile Network
3GPP	3rd Generation Partnership Project
4G	4th Generation Mobile Network
5G	5th Generation Mobile Network
5GC	5G Core Network
6G	6th Generation Mobile Network
AAU	Active Antenna Unit
AI	Artificial Intelligence
AMPS	Advanced Mobile Phone System
AR	Augmented Reality
B5G	Beyond 5G
BH	Backhaul
BBU	Baseband Unit
B-POMDP	Belief-State Partially Observable Markov Decision Process
BS	Base Station
BWA-FMDA	Broadband Wireless Access with Fiber-Connected Massively Distributed Antennas
CDMA	Code Division Multiple Access
CDMA2000	Code Division Multiple Access 2000
CO ₂	Carbon Dioxide
CO _{2e}	Carbon Dioxide Equivalent
CN	Core Network
CoA	Coverage Area
CoA _{des}	Designated Coverage Area
CoA _{geo}	Geographical Coverage Area
CoA _{Qdes}	Coverage Quality Factor
CR	Cognitive Radio
C-RAN	Cloud-Radio Access Network
CSI	Channel State Information
D2D	Device-to-Device Communication

DL	Downlink
DV	Data Volume
EB	Exabyte
EC_{MN}	Mobile Network Energy Consumption
EDGE	Enhanced Data rates for GSM Evolution
$EE_{MN,CoA}$	Mobile Network coverage Energy Efficiency
$EE_{MN,DV}$	Mobile Network data Energy Efficiency
eMBB	Enhanced Mobile Broadband
EN-DC	Evolved Non-Standalone Dual Connectivity
eNodeB	Evolved Node B
EPC	Evolved Packet Core
FDD	Frequency Division Duplexing
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FFR	Fractional Frequency Reuse
FPC	Fractional Power Control
FWA	Fixed Wireless Access
GeSI	Global e-Sustainability Initiative
GHG	Greenhouse Gas
gNodeB	Next Generation Node B
GSM	Global System for Mobile Communications
H-CRAN	Heterogeneous-Cloud Radio Access Network
HRLLC	Hyper-Reliable Low Latency Communication
IAB	Integrated Access and Backhaul
ICT	Information and Communication Technology
ILP	Integer Linear Programming
IIoT	Industrial Internet of Things
IM	Index Modulation
IMT2000	International Mobile Telecommunications 2000
IMTS	Improved Mobile Telephone Service
IoE	Internet of Everything
IoT	Internet of Things
IS-95	Interim Standard 95
J	Joule

LTE	Long Term Evolution
LTE-A	Long Term Evolution-Advanced
M2M	Machine-to-Machine Communication
mMIMO	Massive Multiple Input Multiple Output
mMTC	Massive Machine Type Communications
MDT	Minimization of Drive Tests
MIMO	Multiple Input Multiple Output
mIoT	Massive Internet of Things
MEN	Mobile Edge Networks
ML	Machine Learning
mMIMO	Massive Multiple Input Multiple Output
MR	Mixed Reality
MTS	Mobile Telephone System
MUSIM	Multiple Universal Subscriber Identity Module
MUST	Multi-User Superposed Transmission
NOMA	Non-Orthogonal <i>Multiple</i> Access
NR	New Radio
NS	Network Slice
NSA	Non-Standalone
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
OMA	Orthogonal Multiple Access
PA	Power Amplifier
PSTN	Public Switched Telephone Network
PTT	Push-to-Talk
PV	Photovoltaic
QoS	Quality of Service
RAN	Radio Access Network
RB	Resource Block
RF	Radio Frequency
RRU	Remote Radio Unit
SA	Standalone
SE	Spectral Efficiency
SIC	Successive Interference Cancellation

SINR	Signal to Interference & Noise Ratio
SISO	Single Input Single Output
SNR	Signal to Noise Ratio
SON	Self-Organizing Networks
SPGA	Superior Population Generation Algorithm
TDD	Time Division Duplexing
TDMA	Time Division Multiple Access
THz	Terahertz
TDMA	Time Division Multiple Access
TD-SCDMA	Time Division Synchronous Code Division Multiple Access
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UE	User Equipment
UL	Uplink
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
URLLC	Ultra-Reliable Low Latency Communications
USIM	Universal Subscriber Identity Module
VR	Virtual Reality
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WWW	World Wide Wireless Web
XR	Extended Reality

SAŽETAK

U radu je analizirana optimizacija potrošnje energije u bežičnim komunikacijskim mrežama, s posebnim naglaskom na mobilne mreže pete generacije (engl. *fifth generation, 5G*) i buduće mreže šeste generacije (engl. *sixth generation, 6G*). S obzirom na eksponencijalni rast broja povezanih uređaja i potrebu za pružanjem različitih usluga, energetska učinkovitost identificirana je kao ključan izazov za mobilne operatore. Radijski pristupni dio mreže (engl. *Radio Access Network, RAN*) prepoznat je kao najveći potrošač energije, što je dovelo do istraživanja metoda za optimizaciju potrošnje energije u tom dijelu mreže. U radu su obuhvaćene brojne tehnike i pristupi za poboljšanje energetske učinkovitosti, uključujući dinamičko upravljanje resursima u radijskom pristupnom dijelu mreže (RAN), optimizaciju odašiljačke snage baznih postaja, primjenu tehnika mirovanja i implementaciju heterogenih mreža s baznim postajama malih ćelija. Također su razmotrene tehnologije softverski definiranog umrežavanja (engl. *Software-Defined Networking, SDN*) i virtualizacije mrežnih funkcija (engl. *Network Function Virtualization, NFV*), koje omogućuju fleksibilno upravljanje mrežnim resursima i povećanje energetske učinkovitosti kroz primjenu tehnike mrežnog rezanja (engl. *network slicing*). Prikazana je i tehnika neortogonalnog višestrukog pristupa (engl. *Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA*) koja se očekuje kao ključna tehnologija za poboljšanje spektralne i energetske učinkovitosti u budućim 6G mrežama. Također se razmatra kako će buduće 6G mreže integrirati umjetnu inteligenciju (engl. *Artificial Intelligence, AI*) i tehnologije prikupljanja energije (engl. *Energy Harvesting, EH*) za daljnje smanjenje potrošnje energije i osiguranje dugoročne održivosti. Implementacija ovih tehnologija zahtijevat će pažljivo usklađivanje s ekološkim i ekonomskim zahtjevima. Daljnje istraživanje i razvoj inovativnih tehnologija ključni su za osiguranje dugoročne održivosti mobilnih mreža. Postizanje ovog cilja zahtijeva uravnoteženje tehnološkog napretka s ciljevima održivog razvoja, kako bi se zadovoljili rastući zahtjevi za povezanošću uz minimalan utjecaj na okoliš. Rezultati ovog sveobuhvatnog pregleda pružaju temelj za daljnji razvoj energetske učinkovitih i ekološki održivih mreža, što je od presudne važnosti za budućnost telekomunikacijskog sektora.