

Pregled primjene koncepta mrežnog rezanja za poboljšanje energetske učinkovitosti mobilnih mreža

Josip Lorincz¹, Amar Kukuruzović¹, Zoran Blažević¹

¹Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje (FESB), Rudera Boškovića 32, 21000 Split, Hrvatska

Sažetak: Uvođenje pete generacije (engl. fifth generation – 5G) mobilnih mreža dovodi do povećanja potrošnje energije i većih operativnih troškova mobilnih mrežnih operatora (engl. mobile network operator – MNO). Posljedično, optimizacija energetske učinkovitosti 5G mreža ključna je, kako u smislu smanjenja troškova MNO-a, tako i u smislu negativnog utjecaja emisija ugljičnog dioksida (CO₂). Standardizacija rada 5G mobilne mreže je rezultirala razvojem različitih 5G mrežnih implementacija koje uključuju koncept 5G mrežnog rezanja (engl. network slicing). Ovaj koncept omogućuje stvaranje više neovisnih logičkih 5G mreža unutar iste fizičke 5G mrežne infrastrukture. Budući da se samo neophodni resursi u 5G mrežama koriste kako bi se realizirao određeni 5G mrežni rez (engl. network slice), jedan od značajnih aspekata implementacije 5G mrežnog rezanja je i mogućnost poboljšanja energetske učinkovitosti 5G i budućih mreža šeste generacije (engl. sixth generation – 6G). Ovaj pregledni rad analizira koncept 5G mrežnog rezanja te energetske zahtjeve i doprinos poboljšanju energetske učinkovitost različitih praktičnih slučajeva upotrebe mrežnog rezanja. Kako bi se pokazalo na koji način učinkovito mrežno rezanje može optimizirati potrošnju energije 5G mreža, analizirani su scenariji upotrebe (engl. use case) 5G mreže s različitim pristupima i konceptima raspodjele resursa u domenama prostora, vremena i frekvencije te primjenom umjetne inteligencije. Rezultati sveobuhvatne analize pokazuju da različite implementacije i pristupi mrežnom rezanju otvaraju put mogućim daljnjim smanjenjima potrošnje energije 5G mreža kao i emisija ugljičnog dioksida u budućnosti.

Ključne riječi: 5G, 6G, mrežno rezanje, energetska učinkovitost, softverski definirana mreža (SDN), virtualna mrežna funkcija (VNF), 3GPP, mobilni mrežni operator

1 Rad je prilagođen i dopunjen verzija rada objavljenog pod CC-BY licencom u znanstvenom časopisu Sensors: Lorincz Josip, Kukuruzović Amar, Blažević Zoran, „A Comprehensive Overview of Network Slicing for Improving the Energy Efficiency of Fifth-Generation Networks“, Sensors, Vol. (issue): 2024 (24), 2024. p.p: 1-34, DOI: 10.3390/s24103242

1. Uvod

Mobilne mreže pete generacije (engl. *fifth generation* – 5G) transformiraju digitalni svijet na način da donose korisnicima nove i revolucionarne usluge, značajno veće brzine prijenosa podataka te međusobno povezivanje raznih mrežnih i korisničkih uređaja. Pored izazova koji se odnose na osiguravanje potrebne količine resursa potrebnih za potpunu realizaciju samostalnih 5G mreža kao i cijene implementacije 5G mreža, uvođenje ove napredne tehnologije mobilnih mreža također donosi izazove koji su povezani s povećanom potrošnjom energije mobilnih mreža. Povećana potrošnja energije je posljedica povećanja broja instaliranih baznih postaja (engl. *base station* – BS) u 5G mreži i potrebe za većim kapacitetima baznih postaja koje su nužne radi osiguravanja prijenosa sve veće količine podataka sve većim brzinama putem širokopojasnih kanala. Povećana potrošnja energije mobilne mreže ima nekoliko negativnih posljedica. Prva se odnosi na negativne aspekte za okoliš uslijed povećanja emisija ugljičnog dioksida (CO₂). Prema dostupnim podacima, telekomunikacijska industrija odgovorna je za približno 2% ukupnih globalnih emisija CO₂ [1]. Osim toga, negativan aspekt povećane potrošnje energije očituje se u povećanim operativnim troškovima mobilnih operatora, što u mnogim slučajevima dovodi do povećanja cijena telekomunikacijskih usluga. Procjenjuje se da će do 2030. godine, u najboljem scenariju, 8% globalne potražnje za električnom energijom dolaziti iz sektora informacijske i komunikacijske tehnologije (engl. *information and communications technology* – ICT) [1].

Navedeni čimbenici ukazuju na to da je težnja prema boljoj energetskej učinkovitosti (engl. *energy efficiency* – EE) u mobilnim mrežama jedan od ključnih ciljeva u planiranju, implementaciji i radu 5G mobilnih mreža. S obzirom na to, poboljšanje energetske učinkovitosti mobilne mreže podrazumijeva optimizaciju resursa koji mogu smanjiti potrošnju energije, ublažiti emisiju stakleničkih plinova (CO₂) te uključiti obnovljive izvore energije u napajanje mrežnih elemenata [2]. Očekuje se da će se nakon potpune globalne implementacije 5G mreža do 2030. godine, u odnosu na mobilne mreže prethodne generacije (4G), brzina prijenosa podataka povećati za faktor 1000, dok će se istovremeno potrošnja energije mreže smanjiti za faktor 2. Kako bi se postigla takva poboljšanja energetske učinkovitosti, koja su 2000 puta veća po prenesenom bitu u usporedbi s energetskej učinkovitošću prethodnih generacija mobilnih mreža, potrebno je implementirati različita rješenja za optimizaciju potrošnje energije 5G mreža [3]. Jedno od istaknutih rješenja posvećenih optimizaciji korištenja resursa 5G mreže je tehnika poznata kao “mrežno rezanje” (engl. *network slicing*), koja se ponegdje opisuje i kao “mrežno segmentiranje”. Mrežno rezanje u 5G mrežama omogućuje stvaranje i postojanje više neovisnih logičkih 5G mreža unutar iste fizičke mrežne infrastrukture. Koncept mrežnog rezanja pruža veliku fleksibilnost za specifične implementacije mobilnih mreža, što može pridonijeti smanjenju troškova implementacije usluga, proširenju ponude usluga te osiguranju boljeg iskorištavanja resursa mobilnih mrežnih operatora (engl. *mobile network operators* – MNO). U tom

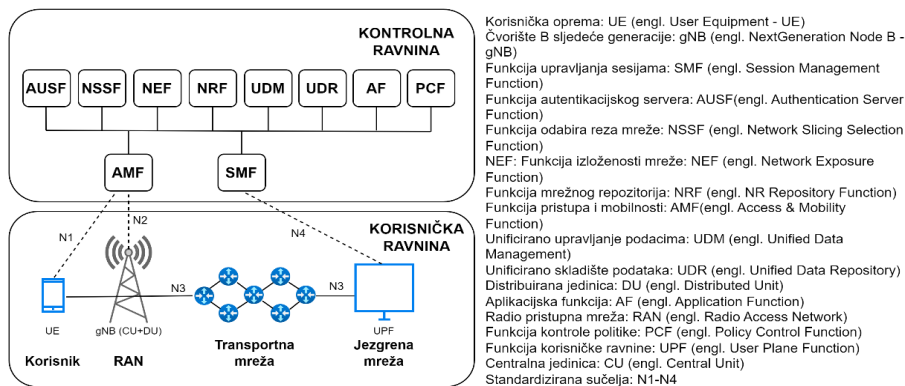
kontekstu, postavlja se pitanje može li implementacija koncepta mrežnog rezanja u 5G mrežama doprinijeti poboljšanju energetske učinkovitosti mobilne mreže? Cilj ovog preglednog rada je pružiti odgovor na to pitanje, kroz provođenje opsežne analize mogućnosti poboljšanja energetske učinkovitosti 5G mobilnih mreža primjenom tehnike mrežnog rezanja (NS).

1.1 Uvod u 5G mrežno rezanje

Arhitektura 5G mobilnih mreža omogućuje na zajedničkoj fizičkoj infrastrukturi 5G mreže, stvaranje, održavanje i deaktiviranje jedne ili više neovisnih logičkih mreža poznatih kao mrežni rezovi (segmenti) (engl. *network slices* – NSs). Svaki neovisni 5G mrežni rez ima svoje vlastite zahtjeve za resursima mreže, s ciljem zadovoljenja zahtjeva za kvalitetom usluge svake aplikacije, skupine korisnika, scenarija uporabe ili određenog tržišta koje NS opslužuje. U okviru koncepta mrežnog rezanja, svaki pojedinačni mrežni rez tvori zasebnu virtualnu mrežu koja objedinjuje korištenje određene skupine mrežnih resursa i funkcija. Opisani mrežni rezovi djeluju autonomno, od svoje inicijalizacije do deaktivacije te imaju različite zahtjeve na kvalitetu usluge (engl. *quality of service* – QoS) koju moraju osigurati korisnicima mrežnog reza, pri čemu zahtjevi mogu uključivati i optimalnu potrošnje energije. Osim toga, mrežne rezove karakteriziraju neovisni mehanizmi upravljanja i kontrole koji su prilagođeni specifičnim zahtjevima korisnika, operatora, aplikacije, usluge ili određenog tržišta koje opslužuje mrežni rez [4]. Na Slici 1 prikazana je 5G samostalna mreža s elementima mreže na kontrolnoj i korisničkoj ravni.

Prethodno navedeno implicira da u praktičnoj realizaciji 5G mreža postoje i nesamostalne implementacije 5G mobilnih mreža (engl. *non-standalone*) koje se praktično realiziraju kroz integraciju postojećih 4G mobilnih mreža i 5G radijske pristupne mreže (engl. *radio access network* – RAN). Nasuprot tome, samostalna 5G mreža (engl. *standalone*) prikazana na Slici 1 djeluje neovisno o mrežnim elementima mobilne mreže prethodne generacije (4G), koristeći 5G elemente radijske pristupne mreže (RAN) kao i izvorno u oblaku (engl. *cloud*) locirane elemente 5G jezgrene mreže. Ovo je glavni razlog zašto nesamostalne 5G mreže nemaju mogućnost implementacije koncepta mrežnog rezanja, te su izvan opsega ovog rada.

Slika 1 prikazuje 5G mrežu koja se sastoji od korisničke ravnine, koja obuhvaća korisničku opremu (engl. *user equipment* – UE), radijsku pristupnu mrežu (RAN), transportnu mrežu (engl. *transport network* – TN) i jezgrenu mrežu (engl. *core network* – CN) koja sadrži i funkciju korisničke ravnine (engl. *user plane function* – UPF). Korisnička ravnina uključuje funkcionalnosti osiguravanja tokova podataka s kraja na kraj mreže (engl. *end-to-end data flow*), enkapsulaciju podataka (engl. *data encapsulation*) i sam prijenos podataka (engl. *data transfer*).



Slika 1: 5G samostalna mreža s elementima mreže na kontrolnoj i korisničkoj ravnini [5], [6]

S druge strane, kontrolna ravnina obuhvaća prijenos informacija o kontroli i upravljanju mrežom te uzima u obzir sve funkcionalnosti koje nisu povezane s transportom korisničkog sadržaja (Slika 1). Primjerice, kontrolna ravnina upravlja administracijom komunikacijskih sesija, provjerava prava pristupa mrežnim uslugama, distribuira i provodi pravila usluga u mreži te pohranjuje korisničke podatke.

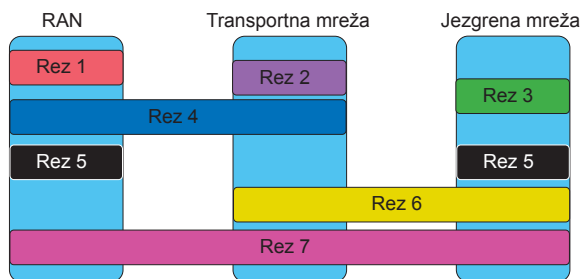
Mrežno rezanje se može primijeniti na neke od elemenata (komponenti) mreže na način da se uspostavljaju zasebni fizički entiteti mreže karakteristični za svaki mrežni rez (NS), ili se može omogućiti dijeljenje jednog fizičkog entiteta mreže između više mrežnih rezova. Uobičajeno je u praktičnim implementacijama mrežnog rezanja 5G mreže da se funkcija pristupa i mobilnosti (engl. *access and mobility function* – AMF) dijeli između nekoliko mrežnih rezova, dok su funkcija upravljanja sesijama (engl. *session management function* – SMF) i UPF obično dodijeljeni svakom mrežnom rezu zasebno (Slika 1). Razlog zašto se AMF dijeli među mrežnim rezovima jest smanjenje razmjene signalizacijskih poruka između mreže i korisničkih uređaja (engl. *user devices* – UD), kada se korištene usluge protežu preko različitih mrežnih rezova. Uz AMF, funkcija unificiranog (jedinstvenog) upravljanja podacima (engl. *unified data management* – UDM) i funkcija odabira mrežnog reza (engl. *network slicing selection function* – NSSF) također se dijele među više mrežnih rezova, s ciljem pojednostavljenja složenosti upravljanja istima.

Iako transportna mreža (TN) obično pripada mobilnom mrežnom operatoru, u praksi se mogu vidjeti različite alokacije elemenata infrastrukture transportne mreže (TN) između mrežnih rezova 5G mreže. Slika 2 prikazuje primjere dosega mrežnih rezova u 5G mrežama. Prema Slici 2, mrežno rezanje se može primijeniti zasebno na svaki element arhitekture 5G mobilne mreže ili se može ostvariti kao kombinacija nekih dijelova ili svih elemenata samostalne 5G mreže. Ako mrežno rezanje obuhvaća dio jezgrene mreže (CN), dio transportne mreže (TN) i dio radio pristupnog (RAN) dijela

mreže (kao što je prikazano za mrežni rez 7 na Slici 2), takvo rezanje se naziva mrežno rezanje s kraja-na-kraj (engl. *end-to-end (E2E) network slicing*).

1.2 Pregled glavnih doprinosa rada

U pogledu poboljšanja energetske učinkovitosti (engl. *energy efficiency* – EE) mobilnih mreža, implementacija bilo koje vrste mrežnog rezanja osim s kraja-na-kraj (E2E) mrežnog rezanja nije sveobuhvatno rješenje za postizanje ambicioznih ciljeva usmjerenih na poboljšanje energetske učinkovitosti 5G mreža. Takvo se rezanje može smatrati improvizacijom u specifičnim slučajevima upotrebe ili prijelaznim rješenjem do uspostave s kraja-na-kraj mrežnog rezanja. Primjeri takvih koncepata mrežnog rezanja prikazani su na Slici 2 kao rez 1 (rezanje na razini RAN-a), rez 2 (rezanje na razini TN-a), rez 3 (rezanje na razini CN-a), itd. Povećani troškovi energije i ekološka svijest doveli su do razvoja koncepta energetski osviještenog ugrađivanja virtualnih mreža (engl. *energy-aware virtual network embedding* – EA-VNE) [7], [8], [9], čiji je cilj optimizacija upotrebe energije mreže alokacijom zahtjeva virtualne mreže prema fizičkim mrežnim resursima. Budući da implementacija E2E mrežnog rezanja i EA-VNE podrazumijeva uspostavu brojnih virtualnih mreža na zajedničkoj fizičkoj infrastrukturi 5G mreže, tehnologije poput virtualizacije mrežnih funkcija (engl. *network function virtualization* – NFV) i softverski definiranih mreža (engl. *software defined network* – SDN) postaju ključni za realizaciju 5G mrežnog rezanja [10]. Osim ovih tehnologija, važni koncepti koji omogućuju realizaciju mrežnog rezanja su rubno i računalstvo u oblaku (engl. *edge and cloud computing*) [11]. Svi ovi koncepti bit će analizirani u ostatku rada kao metode za poboljšanje energetske učinkovitosti 5G mreža kroz implementaciju mrežnog rezanja.



Slika 2: Primjeri dosega mrežnih rezova u 5G mrežama [5]

Dakle, doprinos ovog rada je istaknuti prednosti primjene mrežnog rezanja kao sredstva za poboljšanje energetske učinkovitosti 5G mreža. Na temelju pregleda objavljene literature, bit će pokazano da tema poboljšanja energetske učinkovitosti 5G mreža

kroz primjenu mrežnog rezanja nije dovoljno obrađena, zbog čega ovaj rad ima za cilj dati sveobuhvatan prikaz mogućnosti primjene 5G mrežnog rezanja za poboljšanje energetske učinkovitosti mobilnih mreža.

Kako bi se pokazalo kako učinkovita primjena mrežnog rezanja može optimizirati potrošnju energije 5G mreža, u radu će se analizirati razni scenariji primjene 5G mrežnog rezanja, pristupi i koncepti alokacije mrežnih resursa u prostornoj, vremenskoj i frekvencijskoj domeni, uključujući implementacije mrežnog rezanja temeljene na primjeni umjetne inteligenciji (engl. *artificial intelligence* – AI). Rad također diskutira ideje za daljnja istraživanja u području poboljšanja energetske učinkovitosti 5G mreža kroz implementaciju mrežnog rezanja.

Ostatak ovog rada organiziran je na sljedeći način. Sekcija 2 pruža opći opis utjecaja mrežnog rezanja na energetske učinkovitost 5G mreža te predstavlja ideje za moguća daljnja istraživanja koja se odnose na poboljšanje energetske učinkovitosti 5G mreža kroz implementaciju mrežnog rezanja. U Sekciji 3 rada, analizira se utjecaj primjene različitih koncepata mrežnog rezanja na poboljšanje energetske učinkovitosti radio pristupnog dijela mobilne mreže (RAN). Sekcija 4 sadrži zaključak rada.

2. Mogućnosti poboljšanja energetske učinkovitosti mreže primjenom mrežnog rezanja

U ovoj sekciji rada opisana su operativna stanja mrežnih rezova i pripadajući resursi koji se koriste u postupcima mrežnog rezanja, pristupi poboljšanju energetske učinkovitosti mrežnih rezova u 5G mrežama, alokacija resursa u rezanju 5G mreže, implementacija mrežnih rezova metodom podmrežavanja mreže i metode ograničavanja potrošnje energije mrežnih rezova.

2.1 Operativna stanja mrežnih rezova i pripadajući resursi

Provođenje procjenjivanja razine energetske učinkovitosti cijele mobilne mreže ili određenog mrežnog reza realizira se temeljem uspostavljenih ključnih pokazatelja izvedbe (engl. *key performance indicator* – KPI) koji ukazuju na razinu energetske učinkovitosti mreže. Međutim, za postizanje bolje energetske učinkovitosti mobilne mreže, ključna je mogućnost da mobilni mrežni operatori upravljaju mrežnim resursima koji tvore mrežne rezove na energetske učinkovit način, uz istodobno održavanje odgovarajuće kvalitete usluge (QoS) u mreži. U kontekstu mrežnog rezanja, standard 3GPP (engl. *third-generation partnership project*) TS 23.501 [12] definira tri pojma: mrežna funkcija (engl. *network function* – NF), mrežni rez i instanca mrežnog reza. Mrežna funkcija (NF) je funkcija obrade u mreži koja definira funkcionalno ponašanje mrežnog reza i koja može biti implementirana kao vitalizirana funkcija instalirana

na odgovarajućoj platformi (npr. infrastrukturi u oblaku), kao softverska aplikacija koja se izvršava na dodijeljenom sklopovlju (hardveru) ili kao mrežni element koji djeluje s pripadajućim hardverom. Dok je mrežni rez logička mreža koja pruža specifične mrežne karakteristike i mogućnosti, instanca mrežnog reza predstavlja skup mrežnih funkcija (NF) i pripadajućih resursa (potrebnih, primjerice za umrežavanje, pohranu ili računalne operacije) koji zajedno čine implementirani mrežni rez.

Postoje dva operativna stanja resursa mrežnog reza koja su standardizirana u [13] od strane 3GPP standardizacijskog tijela, u kojima se mogu naći dijelovi RAN mreže, instanca mrežnog reza, mrežna funkcija (NF) i cjelokupni mrežni rez. Ta stanja su energetski štedljivo stanje i operativno (aktivno) stanje (koje nije energetski štedljivo stanje). Dakle, osnovno načelo bilo kojeg mehanizma za uštedu energije primjenom mrežnog rezanja 5G mreža je prijelaz tijekom rada mrežnog reza ili njegovog dijela iz energetski neštedljivog stanja u energetski štedljivo stanje i obrnuto. Taj prijelaz mora biti popraćen načelom da drugi mrežni resursi koji ostaju raditi u neštedljivom stanju (kao što su drugi mrežni rez(ovi), NF, RAN, određeni element mrežnog reza koji radi u štedljivom stanju, itd.) trebaju prihvatiti radno opterećenje resursa dijela mrežnog reza ili cjelokupnog mrežnog reza koji je u energetski štedljivom stanju.

Nadalje, kada pojedini elementi mrežnog reza ili cjelokupni mrežni rez budu u energetski štedljivom stanju, to ne smije rezultirati degradacijom korisničke kvalitete usluge (QoS) mrežnog reza te se mora spriječiti preopterećenje preostalih aktivnih mrežnih rezova ili elemenata mrežnog reza koji rade u neštedljivom stanju [13]. S obzirom na prethodno spomenuta dva stanja energetske uštede, definirane su temeljne procedure za ulazak i izlazak iz stanja štedljivog i neštedljivog načina rada. Sljedeće sekcije rada daju objašnjenja metoda vezanih za poboljšanje energetske učinkovitosti mobilnih mreža primjenom 5G mrežnog rezanja.

2.2 pristupi poboljšanju energetske učinkovitosti mrežnih rezova u 5G mrežama

Energetska učinkovitost 5G mreže se može poboljšati smanjenjem potrošnje električne energije mrežnih resursa 5G mreže koji osiguravanju funkcionalnosti mrežnog(ih) reza(ova). Ovo smanjenje potrošnje električne energije također dovodi do smanjenja operativnih troškova MNO-a. Takvo poboljšanje energetske učinkovitosti mrežnih rezova u 5G mrežama se općenito može postići na tri načina koji su kategorizirani kao redizajn mrežne opreme, dinamička dodjela mrežnih resursa i pametno mirovanje (engl. *smart sleeping*) [14]. Ova tri pristupa mogu se primijeniti u mrežnom rezanju 5G mreža zasebno ili kombinirano.

U ovom radu neće se analizirati redizajn mrežne opreme, budući da to izlazi izvan opsega ovog rada. Redizajn mrežne opreme uključuje korištenje energetski učinko-

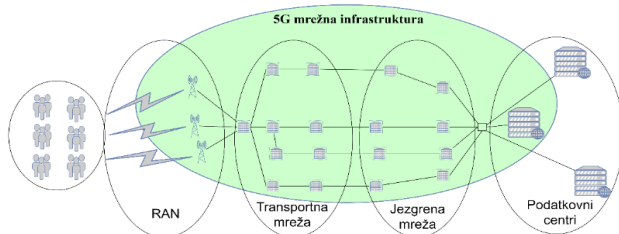
vitih materijala i komponenti za razvoj energetske učinkovitije hardverske opreme te smanjenje sklopovske složenosti mrežnih uređaja, što osigurava postizanje iste razine performansi uz manji broj elektroničkih elemenata, a što posljedično smanjuje njihovu potrošnju energije. Međutim, dinamička prilagodba dodjele mrežnih resursa i pametno mirovanje, kao istaknuti pristupi za poboljšanje energetske učinkovitosti 5G mrežnih rezova, bit će analizirani u preostalim dijelovima ovog rada. Dinamička dodjela mrežnih resursa uključuje skaliranje resursa mrežnih rezova na način da se resursi koji u određenom trenutku nisu nužni za pružanje usluga ne koriste. Kod pristupa pametnog mirovanja, određeni elementi mrežnih rezova se isključuju (odnosno stavljaju u stanje mirovanja) kako bi se postigle uštede energije te se ponovo pokreću kada se ukaže potreba [15], [16].

Kao što je već prethodno spomenuto, ključni koncepti koji omogućuju realizaciju mrežnog rezanja su programski definirane mreže (SDN), virtualizacija mrežnih funkcija (VNF) i računalstvo u oblaku. Koncept SDN odvaja upravljačku razinu od fizičkih mrežnih elemenata, te se upravljanje istima odvija s jednog centraliziranog mjesta. Centralizacija upravljanja mrežnim rezovima s jedne lokacije omogućuje učinkovitiju kontrolu mrežnih resursa u usporedbi s pristupom gdje svaki element mrežnog reza ima vlastitu upravljačku ravninu. Ovo dovodi do pozitivnog učinka na ukupnu potrošnju energije cijelog mrežnog reza, a to se posljedično odražava i na smanjenje ukupne potrošnje energije cijele mreže. Stoga, osim učinkovitog upravljanja mrežom, koncept mrežnog rezanja može doprinijeti smanjenju ukupne potrošnje energije mobilne mreže, budući da se energija ne troši na rad upravljačke ravnine na nivou svakog fizičkog elementa mreže.

Pored navedenoga, implementacija VNF tehnologije za realizaciju mrežnog rezanja također ima pozitivan utjecaj na energetske učinkovitost mrežnih rezova. Taj utjecaj ogleda se u mogućnosti implementacije više mrežnih rezova na jednom fizičkom mrežnom uređaju putem virtualizacije mrežnih resursa (VNF), čime se postižu ekvivalentni učinci kao kod realizacije mrežnih rezova na odvojenim fizičkim mrežnim uređajima. U tom kontekstu, implementacija VNF zahtijeva virtualne veze između elemenata mrežnih rezova, koje imaju manje energetske potrebe u usporedbi s fizičkim vezama. Također, računalstvo u oblaku, kao jedan od koncepta koji omogućuje implementaciju mrežnog rezanja, može osigurati još učinkovitije korištenje resursa mreže. Kod računalstva u oblaku, učinkovitija uporaba procesora, sustava za pohranu podataka i sustava hlađenja podatkovnih centara (engl. *data center* – DC), smanjuje generiranje topline ili pregrijavanje u podatkovnim centrima, što opet pozitivno utječe na ukupnu energetske učinkovitost mobilne mreže. Važno je napomenuti da podatkovni centri u oblaku kao izvore energije mogu koristiti obnovljive izvore energije, što na kraju smanjuje troškove za mobilne mrežne operatore (MNO) i doprinosi smanjenju potrošnje energije iz neobnovljivih izvora.

2.2.1 Alokacija resursa za realizaciju 5G mrežnih rezova

U slučaju klasičnih 5G mreža realiziranih bez mrežnog rezanja (Slika 3), različiti korisnici mogu generirati različite vrste prometa, počevši od onih s visokim do onih s niskom kvalitetom usluge (QoS). U takvoj konfiguraciji cijela 5G mreža koristi značajno više resursa nego što je potrebno, budući da je mobilna mreža dimenzionirana u odnosu na zadovoljavanje najviših parametara kvalitete usluge (QoS) i kapaciteta mreže. Međutim, u stvarnim mrežama često puta je količina prometa koja prolazi kroz mrežu uglavnom manja od maksimalnih količina za koje je mreža dimenzionirana, a veliki dio mrežnih resursa i dalje aktivno radi te je na niskim razinama iskorištenosti. Ovo često dovodi do bespotrebne potrošnje energije mrežnih elemenata koji su podopterećeni, pri čemu navedena potrošnja doprinosi porastu ukupne potrošnje mobilne mreže. Iako su pojedini mrežni elementi (engl. *network element* – NE) u 5G mrežama općenito energetski učinkovitiji od mrežnih elemenata prethodnih generacija (bolja potrošnja energije po jedinici prenesenog prometa), povećanje broja instaliranih mrežnih elemenata 5G mreže dovodi do povećanja ukupne potrošnje energije 5G mreže u usporedbi s mrežama prethodnih generacija. Navedeno povećava operativne troškove mobilnih mrežnih operatora (MNO). Na primjer, jedna makro bazna postaja (BS) u 5G mreži, iako osigurava značajno veće kapacitete u odnosu na makro BS u mrežama prethodnih generacija, zahtijeva gotovo 70% više energije nego makro BS koja u istom kućištu kombinira tehnologije druge (2G), treće (3G) i četvrte generacije (4G) [17].



Slika 3: Tradicionalna 5G mrežna arhitektura bez implementacije mrežnog rezanja [5]

Iako su mogućnosti poboljšanja energetske učinkovitosti 5G mreža ograničene, primjena mrežnog rezanja može doprinijeti njihovom poboljšanju. Jedan od glavnih pristupa za poboljšanje energetske učinkovitosti mobilnih mreža kroz implementaciju koncepta mrežnog rezanja, je dodjela mrežnih resursa uz pomoć orkestratora, koji je sastavni dio entiteta za upravljanje i orkestraciju (engl. *management and orchestration* – MANO) mreže. MANO je odgovoran za prevođenje različitih modela usluga i slučajeva uporabe (engl. *use cases*) u operativne mrežne rezove. MANO obavlja

dinamičke zadatke upravljanja, uključujući pokretanje, završavanje i praćenje rada mrežnih rezova i njegovih virtualnih mrežnih funkcija (VNF). To je nužno za postizanje skaliranja resursa mrežnih rezova u stvarnom vremenu ili saniranja potencijalnih problema u mreži koji mogu nastati tijekom rada mrežnih rezova. Mrežni rezovi se mogu kreirati i orkestrirati na temelju mekanog (engl. *soft*) ili tvrdog (engl. *hard*) mrežnog rezanja. Kod mekanog mrežnog rezanja, mrežno rezanje može dijeliti neke mrežne resurse s drugim mrežnim rezovima, dok kod tvrdog mrežnog rezanja mrežni rezovi moraju biti potpuno izolirani jedni od drugih.

Stoga su dva temeljna mehanizma koja se koriste za alokaciju mrežnih resursa izolacija mrežnih rezova i orkestracija. Na primjer, kod tvrde izolacije mrežnih rezova, mrežni rez B ne može koristiti resurse dodijeljene mrežnom rezu A, čime se sprječava povećanje potrošnje energije mrežnog reza A. Pritom mrežne funkcije za mrežne rezove A i B mogu biti realizirane na istom fizičkom mrežnom elementu, ali se mora precizno znati koliko energije svaka VNF na tom fizičkom elementu troši za mrežni rez A, a koliko za mrežni rez B. Orkestracija (MANO) može dinamički dodavati ili smanjivati resurse mrežnih rezova na inteligentan način ili uz pomoć umjetne inteligencije (AI).

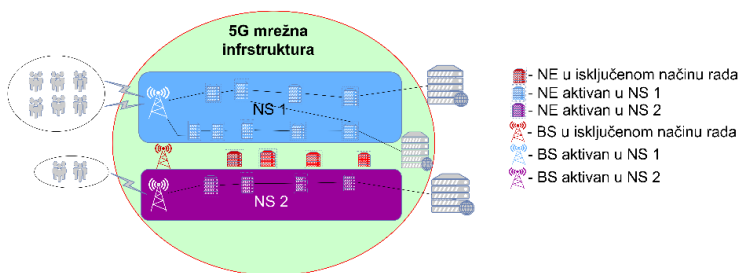
Grupiranjem korisnika koji imaju slične ili iste karakteristike generiranog mrežnog prometa i dodjeljivanjem odgovarajućih resursa samo specifičnim vrstama mrežnog prometa ili usluga, uz korištenje mehanizama izolacije mrežnih rezova i orkestracije kao i stavljanjem određenih mrežnih elemenata u način mirovanja putem preraspodjele mrežnih resursa, mrežno rezanje može utjecati na dinamiku korištenja mrežnih elemenata i iskoristivost njihovih kapaciteta.

Stoga se kao način mjerenja energetske učinkovitosti mobilne mreže uvode KPI-evi energetske učinkovitosti koji se definiraju kao omjer performansi mrežnog resursa i potrošene energije. Za povećanje ovih KPI-eva koji predstavljaju mjeru energetske učinkovitosti mobilne mreže, moguće je ili povećavati performanse mrežnog reza za istu potrošnju energije i/ili smanjivati ukupnu potrošnju energije za ostvarivanje istih performansi mrežnog reza. Pri tome metode dinamičke prilagodbe mrežnih resursa i preraspodjele resursa prvenstveno utječu na povećanje ili smanjenje performansi mrežnog reza, dok način pametnog mirovanja utječe na smanjenje potrošene energije.

2.2.2 Primjer alokacije mrežnih rezova za poboljšane energetske učinkovitosti mreže

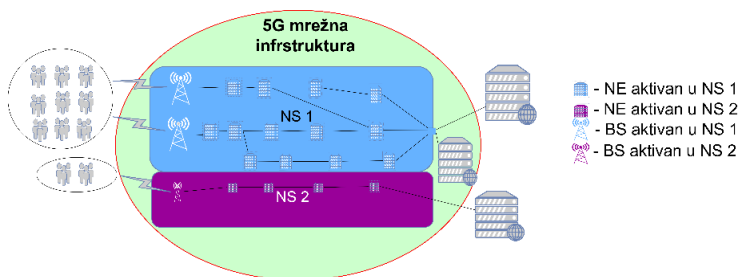
Spomenuti pristupi za poboljšanje energetske učinkovitosti mobilne mreže primjenom metode mrežnog rezanja prikazani su u primjeru na Slikama 4, 5 i 6. Slika 4 predstavlja primjer mobilne mreže s dva mrežna reza, gdje su korisnici grupirani u mrežne rezove prema vrsti komunikacijske usluge koju koriste u mreži. Mrežna konfiguracija tih rezova je takva da se mora osigurati potrebna QoS koju korisnici zahti-

jevaju. Kao što se može vidjeti na Slici 4, tijekom uspostave mrežnih rezova moguće je da neki mrežni elementi neće biti uopće korišteni, budući da oba mrežna reza zadovoljavaju specificirane parametre QoS s dodijeljenim mrežnim resursima. Na Slici 4 prikazani neiskorišteni resursi 5G mreže nisu trenutno potrebni za pružanje usluga koje su omogućene putem mrežnih rezova. Budući da mrežni elementi mogu prelaziti iz aktivnog u isključeni mod (engl. *sleep mode*) rada, potrošnja energije u cijeloj 5G mreži bit će smanjena u usporedbi s tradicionalnom 5G mrežom realiziranom bez primjene mrežnog rezanja (koja je prikazana na Slici 3). Stoga, kroz orkestraciju mrežnih rezova i upravljanje istima, prilagodba 5G mrežnih resursa potrebama definirane usluge koju pruža mrežni rez, postiže se dodavanjem ili smanjenjem resursa mreže u cilju očuvanja potrebne kvalitete usluge (QoS) te uz poboljšanje energetske učinkovitosti mreže.



Slika 4: Alokacija mrežnih elemenata za dva mrežna reza u 5G mobilnoj mreži [5]

Ako dođe do povećanja prometa u nekom mrežnom rezu, na primjer, u mrežnom rezu NS 1 (Slika 5), dodatni resursi se angažiraju putem orkestratora (MANO) u svrhu zadovoljavanja svih prometnih zahtjeva i zahtjeva za kvalitetom usluge (QoS). Slika 5 prikazuje alokaciju novih mrežnih resursa 5G mreže za mrežni rez NS 1 u kojemu je došlo do povećanja prometa u odnosu na inicijalno stanje potreba za prijenosom prometa prikazanim na Slici 4.



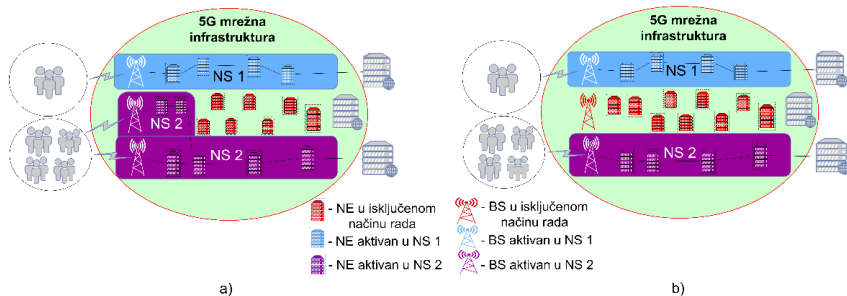
Slika 5: Alokacija novih mrežnih elemenata 5G mreže za mrežni rez NS 1 [5]

Budući da se zbog porasta prometa u mrežnom rezu NS1 prenosi mnogo veći volumen prometa, mrežni elementi koji su potrebni za rad mrežnog reza NS1 se povećavaju (Slika 5) u odnosu na inicijalno stanje (Slika 4). Međutim, ovaj dodatni angažman mrežnih resursa dovest će i do povećanja potrošnje energije mreže zbog dodatno aktiviranih mrežnih elemenata (resursa). To vodi do zaključka da prilagodba mrežnih resursa u mrežnom rezanju može doprinijeti povećanju energetske učinkovitosti mobilne mreže, jer u razdoblju manjeg prometa 5G mreže prikazanog na Slici 4, mreža troši manje energije u usporedbi s 5G mrežom prikazanom na Slici 3 ili mrežom prikazanom na Slici 5. Manja potrošnja energije posljedica je korištenja manje resursa mreže za osiguravanje rada mrežnih rezova.

Osim toga, u situaciji kada dolazi do smanjenja prometa ili potražnje za uslugama u nekom drugom mrežnom rezu u usporedbi s konfiguracijom u kojoj su resursi mrežnog reza potpuno aktivirani (na način prikazan na Slici 5), mehanizmi prilagodbe MANO entiteta mogu djelovati kako bi smanjili korištenje resursa 5G mreže. U takvoj situaciji, resursi oslobođeni mehanizmima prilagodbe mogu biti u dva stanja: ili ih koristi drugi mrežni rez zbog povećane potražnje za prometom u tom mrežnom rezu, kao što je prikazano na Slici 6a, ili se stavljaju u stanje mirovanja, kao što je prikazano na Slici 6b. U oba slučaja, energetska učinkovitost 5G mreže bit će poboljšana u usporedbi s učinkovitošću klasične 5G mreže bez mrežnih rezova (prikazane na Slici 3), budući da će se barem neki elementi sveukupnih resursa 5G mreže nalaziti u stanju mirovanja, a samim tim i u stanju uštede energije.

2.2.3 Implementacija mrežnog rezanja putem podmreža određenog dijela mreže

U prethodnim primjerima prikazano je tvrdo mrežno rezanje, gdje su pojedini resursi mreže dodijeljeni samo jednom mrežnom rezu na korištenje. Ovakav vid komunikacije opslužuje jedan mrežni rez koristeći resurse pristupne, transportne i jezgrene mreže, zbog čega resursi mrežnog reza ne mogu biti dijeljeni između različitih mrežnih rezova. Stoga je svaki mrežni rez namijenjen pružanju određene usluge korisnicima, pri čemu koristi isključivo vlastite mrežne resurse, bez dijeljenja tih resursa s drugim mrežnim rezovima. Ovaj pristup stvaranju rezane mreže (engl. *sliced network*) jedan je od mogućih pristupa implementaciji 5G mrežnog rezanja. Međutim, pored opisanog pristupa standard 3GPP TS 28.530 [18] navodi da različiti mrežni rezovi mogu koristiti zajedničku podmrežu u pristupnom (RAN i TN) ili jezgrenom (CN) dijelu 5G mreže. Na Slici 7 je kao primjer prikazan pristupni i jezgreni dio 5G mreže koji čine specifične mrežne rezove. U ovom slučaju, različiti dijelovi podmreža koji tvore pojedini mrežni rez mogu se koristiti u različitim dijelovima 5G mreže (pristupnom ili jezgrenom).



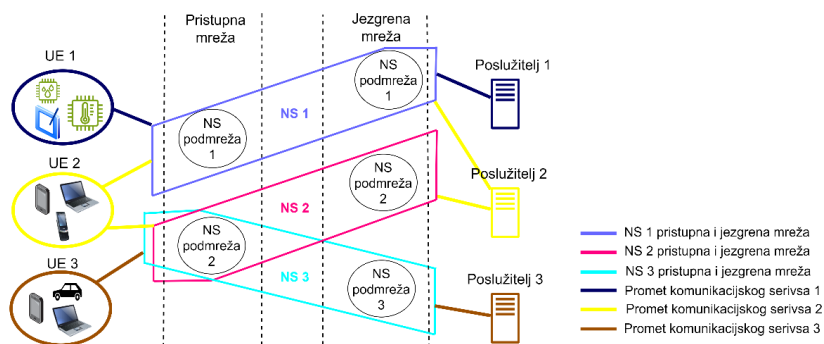
Slika 6: Alokacija mrežnih elemenata u 5G mreži s dva mrežna reza za slučaj: (a) povećanja prometa u mrežnom rezu NS 2; (b) smanjenja prometa u mrežnom rezu NS 2 [5]

U slučaju primjera na Slici 7, postoje tri mrežna reza (NS1, NS2 i NS3) s tri komunikacijske usluge na poslužiteljima 1, 2 i 3, koje su ponuđene trima različitim skupinama krajnjih korisnika (UE1, UE2 i UE3). Usluge se realiziraju kroz mrežne rezove NS1, NS2 i NS3, a njihove odgovarajuće podmreže protežu se preko različitih dijelova pristupne i jezgrene mreže (Slika 7). 3GPP standardizacija predstavlja mogućnost da više od jednog mrežnog reza istovremeno koristi jednu podmrežu u pristupnom ili jezgrenom dijelu mreže (npr. NS2 i NS3 koriste istu podmrežu u 5G pristupnoj mreži, kao što je ilustrirano na Slici 7). Ovaj primjer mekog mrežnog rezanja otvara daljnje mogućnosti za smanjenje potrošnje energije u 5G mreži. Dva ili više mrežnih rezova koji dijele iste mrežne resurse omogućavaju bolje iskorištavanje resursa 5G mreže i otvaraju mogućnost stavljanja više elemenata u isključeno stanje u cilju uštede energije.

Zanimljiv slučaj korištenja takvog mekog mrežnog rezanja za postizanje poboljšanja energetske učinkovitosti 5G mreže je prikazan na jednom od primjera sa Slike 7. Ovdje komunikacijska usluga koju poslužitelj 2 nudi grupi korisnika UE2, koristi jezgrene i pristupne resurse dva mrežna reza (NS1 i NS2). U slučaju scenarija u kojem se mala količina prometa prenosi putem NS2 tijekom određenog vremenskog razdoblja, postoji potencijal za postizanje uštede energije postavljanjem elemenata jezgrene podmreže NS2 u isključeno stanje, dok se komunikacijska usluga, ostvarena putem NS2 između UE2 i poslužitelja 2, može realizirati preko pristupne i jezgrene podmreže NS1. U ovom slučaju, mrežni resursi jezgrene i pristupne podmreže NS1, trebaju prilagoditi svoje kapacitete kako bi osigurali odgovarajuću kvalitetu usluge (QoS) za prijenos dodatnog prometa NS2 kao i za prijenos postojećeg prometa NS1. Ovo otvara novo polje istraživanja posvećeno razvoju algoritama za dinamičku aktivaciju i deaktivaciju dijelova jezgrenih ili transportnih/pristupnih mreža koje opslužuju određene mrežne rezove u skladu s varijacijama u intenzitetu prometa određenih vrsta usluga koje su specifične za pojedini mrežni rez. U sljedećem odjeljku predstavljani su neki od mogućih pristupa poboljšanju energetske učinkovitosti 5G mreže kroz dinamičku prilagodbu mrežnih resursa pri mrežnom rezanju.

2.3 Ograničavanje potrošnje energije reza mreže

Poboljšanje energetske učinkovitosti rezane 5G mreže može se postići ograničavanjem i preraspodjelom potrošnje energije za određene usluge mrežnog reza ili za cijeli mrežni rez, na način da mobilni mrežni operator (MNO) definira kao fiksni KPI maksimalnu potrošnju energije za iste. Slike 8a i 8c prikazuju primjer MNO politike potrošnje energije bez ograničenja potrošnje za tri usluge jednog mrežnog reza i tri mrežna reza, respektivno.



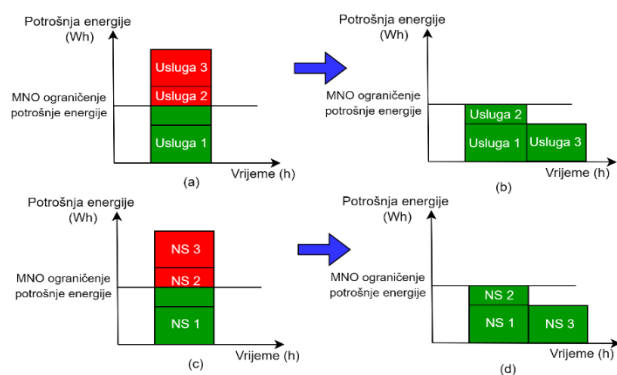
Slika 7: Realizacija različitih komunikacijskih usluga kroz istovremeno dijeljenje mrežnih resursa od strane više različitih mrežnih rezova [5], [18]

Međutim, u slučaju ograničenja ukupne potrošnje energije koje definira MNO, usluge ili mrežni rezovi se mogu realizirati uz blagu degradaciju kvalitete usluge (QoS) na prihvatljive razine za te iste usluge ili mrežne rezove (što je prikazano kao primjer na Slikama 8b i 8d). Ovaj pristup uštedi energije koji se temelji na degradaciji kvalitete usluge (QoS) može se implementirati za one usluge ili mrežne rezove koji ne zahtijevaju visoku pouzdanost ili imaju nisko kašnjenje u prijenosu prometa te mogu odgoditi obradu podataka. Također, postoje i pristupi prema kojima QoS može biti degradiran za neke usluge samo tijekom kratkog vremenskog razdoblja. Ako ovakvo degradirani QoS potraje, isti može postati neprihvatljiv, a maksimalni prag potrošnje energije treba prilagoditi aktivacijom dodatnih mrežnih resursa koji će održavati prihvatljivu razinu kvalitete QoS. To dovodi do nužnosti razvoja tehnika za dinamičku prilagodbu praga maksimalne potrošnje energije za specifične usluge ili mrežne rezove koji su u skladu s potrebom prilagođavanja specifičnim zahtjevima QoS.

Uz načela degradacije usluge i dinamičkog prilagođavanja maksimalne potrošnje energije, moguće je koristiti algoritme koji odgađaju izvršenje usluge ili preraspodjelu dodjele mrežnih resursa mrežnom rezu izvan razdoblja najveće potrošnje energije, omogućujući tako potpuno izvršenje i degradiranih usluga. Slike 8b i 8d ilustriraju slučaj u kojoj su ograničenja na potrošnju energije usluge ili mrežnog reza primije-

njena na uslugu 2, odnosno NS2, za količinu koja premašuje energetska ograničenje. Slike 8b i 8d još prikazuju i primjer scenarija u kojem je izvršenje usluga 3 i rada NS3 vremenski pomaknuto u razdoblje izvan praga maksimalne potrošnje energije. Ovaj pristup vremenskog pomaka izvršenja usluga i rada mrežnog reza se implementira u praksi na način da su korisnici svjesni kako izvršenje njihove usluga može biti pomaknuto u određenim vremenskim periodima. Prihvatanje prethodne mogućnosti vremenskog pomaka, zauzvrat može osigurati niže troškove usluge korisnicima, budući da MNO smanjuje troškove vezane uz potrošnju energije. Stoga je razvoj inovativnih algoritama za vremensko pomicanje izvršenja usluge ili preraspodjelu dodjele mrežnih resursa mrežnim rezovima izvan razdoblja maksimalne potrošnje energije također mogući način za optimizaciju potrošnje energije 5G mreža.

S druge strane, u praktičnim implementacijama mrežnih rezova i odgovarajućih usluga, postoje korisničke usluge kojima treba dati prioritet u smislu izvršenja. Ovo se postiže tako što će MNO odrediti prioritete izvršavanja usluga ili prioritete aktivacije mrežnih rezova, čime odlučuje koji od njih imaju prednost u korištenju resursa 5G mreže. U tom slučaju mogu se postaviti prioritete, kako bi se odredilo koja usluga ili mrežni rez ima prednost, u pogledu potrošnje energije, a posljedično i u korištenju mrežnih resursa. Ostale usluge ili mrežni rezovi nižeg prioriteta mogu doživjeti privremenu degradaciju ili privremeno vremensko pomicanje izvršenja zbog nemogućnosti angažiranja dovoljnih resursa 5G mreže. Međutim, takvi će slučajevi zahtijevati trenutnu akciju kako bi se smanjili negativni utjecaji na QoS u određenim dijelovima 5G mreže. Stoga će ovo uravnoteženje potrošnje energije za svaku uslugu ili za sveukupne mrežne rezove zahtijevati nove pristupe i tehnike koje je potrebno istražiti s ciljem postizanja optimalne raspodjele potrošnje energije između mrežnih rezova.



Slika 8: Pristupi potrošnji energije mrežnih rezova temeljeni na metodi: (a) bez ograničenja maksimalne potrošnje energije po usluzi mreže; (b) uz ograničenja potrošnje energije usluga i planirane potrošnje energije koje definira MNO; (c) bez ograničenja maksimalne potrošnje energije po mrežnom rezu; (d) uz ograničenje potrošnje energije više mrežnih rezova koje definira MNO [5]

3. Poboljšanje energetske učinkovitosti u RAN dijelu 5G mreže

S obzirom na to da se gotovo 70% energije 5G mreže troši u RAN dijelu mreže, odnosno konkretno od strane baznih postaja (BS), često je glavni fokus istraživanja koja se odnose na optimizaciju potrošnje energije 5G mreža usmjeren na tehnike koje omogućuju energetske učinkovitu dodjelu RAN resursa između mrežnih rezova. Prema [19], resursi BS ostaju neiskorišteni tijekom 75–90% vremena njihovog rada, iako povremeno mogu imati značajna prometna opterećenja. Područje poboljšanja energetske učinkovitosti RAN dijela različitih generacija mreža (2G, 3G, 4G i 5G) opsežno je analizirano u literaturi [2], [15], [20], [21]. Stoga se mnoge tehnologije i metode predložene ili korištene za poboljšanje energetske učinkovitosti RAN dijela 5G mreže mogu primjenjivati i u rezanim 5G mrežama. U 5G mrežama, RAN dio mreže može biti dodijeljen određenom mrežnom rezu ili se može dijeliti između različitih mrežnih rezova, što znači da i BS, kao glavni potrošači energije u RAN dijelu mreže, mogu opsluživati samo jedan mrežni rez ili se mogu dijeliti između nekoliko različitih mrežnih rezova. Iako će slučajevi u kojima BS-ovi služe više mrežnih rezova biti dominantni u praksi, situacija u kojoj jedan mrežni rez koristi jednu BS posebno je zanimljiva u slučajevima implementacije mikro, piko ili femto BS-ova u privatnim 5G mrežama koje djeluju kao samostalni mrežni rez.

Sukladno novom standardu poznatom kao novi radio (engl. *new radio* – NR) koji definira rad 5G mreža, cijela BS ili različite komponente bazne postaje mogu prelaziti u stanje mirovanja (engl. *sleep state*) kako bi se postigla ušteda energije. Mogućnost optimizacije potrošnje energije mrežnih rezova u RAN dijelu 5G mreže ovisi o razini dubine stanja mirovanja koje bazne postaje (BS) ili pojedine komponente mogu postići. Općenito, dubine stanja mirovanja baznih postaja ili njihovih komponenti kategoriziraju se kao makro- i mikro-isključeno stanje, a različite komponente baznih postaja prikladnije su za različite razine dubina stanja mirovanja. Tablica 1 prikazuje kategorizaciju komponenti 5G bazne postaje kao kandidata za rad u stanju mirovanja. Trajanje mikro-stanja mirovanja je reda veličine mikro sekundi ili milisekundi, dok su trajanja makro-stanja mirovanja duža i mogu trajati satima ili čak danima. Komponente BS koje su praktičnije za primjenu načina rada BS ulaskom u makro-stanja mirovanja su udaljena radijska jedinica (engl. *remote radio head/unit* – RRH/U), aktivni antenski element (engl. *active antenna element* – AAE), pojačalo snage (engl. *power amplifier* – PA), jedinica za obradu u osnovnom pojasu (engl. *base band unit* – BBU) ili cijele BS (Tablica 1). Komponente BS-a koje su pogodnije za primjenu mikro-stanja mirovanja uključuju frekvencijske resursne blokove (engl. *resource blocks* – RB) bazne postaje, frekvencijske podnositelje (engl. *subcarriers*), cjelokupne bežične kanale i simbole ortogonalno frekvencijskog multipleksiranja (engl. *orthogonal frequency division multiplexing* – OFDM).

Tablica 1 - Kategorizacija komponenti 5G bazne postaje kao kandidata za rad u stanju mirovanja

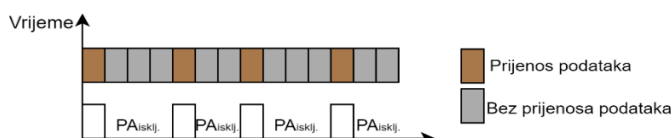
Makro isključeno stanje	Mikro isključeno stanje
Udaljena radijska jedinica (RRH/U)	Frekvencijski blokovi
Aktivni antenski element (AAE)	Podnosioci
Pojačalo snage (PA)	Bežični kanali
Jedinica osnovnog opsega (BBU)	OFDM simboli
Kompletna BS	N/P

Općenito proces uštede energije temeljen na prebacivanju cijele BS ili neke njezine komponente u stanje mirovanja, koja služi jedan ili više mrežnih rezova ovisi o tri aspekta: različitim okidačima i scenarijima za ulazak ili izlazak iz stanja mirovanja (isključenog stanja), trajanju stanja mirovanja te dubini stanja mirovanja. Stoga će optimizacija potrošnje energije mrežnih rezova u 5G mrežama zahtijevati algoritme za prilagodbu konfiguracijskih parametara baznih postaja koje podržavaju rad mrežnih rezova. Takvi algoritmi moraju omogućiti cjelokupnoj BS ili komponentama BS da često ulaze i izlaze iz stanja mirovanja u potpuno aktivno stanje, pri čemu na trajanje tog stanja utječe intenzitet podatkovnog i signalizacijskog prometa mrežnog reza koji koristi određenu BS komponentu ili cijeli BS. Dubina stanja mirovanja (od makro do mikro mirovanja) postiže se prebacivanjem različitih količina BS komponenti koje ne opslužuju nijedan mrežni rez, u neko od stanja mirovanja. To može varirati od djelomičnog gašenja do potpunog isključivanja određenih BS komponenti, uz mogućnost ponovnog pokretanja kada je to potrebno. Međutim, ponovno pokretanje BS komponenti iz isključenog stanja traje duže ako je dubina stanja mirovanja (isključenja) veća [22]. Stoga, okidači za ulazak/izlazak BS ili komponente BS koja opslužuje određene mrežne rezove iz/u stanja mirovanja, kao i dubina i trajanje stanja mirovanja BS ili komponente BS, mogu biti izravno pod utjecajem karaktera usluga mrežnog reza, intenziteta i količine njegovog prometa, intenziteta i količine razmjene signalizacijskih poruka te ograničenja na QoS. Osim toga, ušteda energije u RAN dijelu 5G mreže može se postići u vremenskoj, prostornoj i frekvencijskoj domeni. Mogućnosti uštede energije u rezanom 5G RAN dijelu mreže unutar svake od ovih domena analiziraju se u sljedećim odjeljcima.

3.1 Mogućnosti uštede energije u vremenskoj domeni u rezanom RAN dijelu mreže

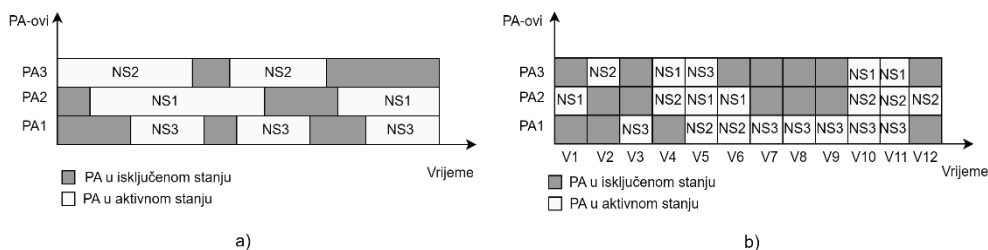
U vremenskoj domeni, moguće uštede energije u rezanom RAN dijelu mreže ostvaruju se na razini gašenja OFDM simbola. U slučaju baznih postaja koje opslužuju jedan mrežni rez, aktivnost pojačala snage (PA) primopredajnika (engl. *transceiver*) kao i učestalost prijenosa nadzornih signala mogu se značajno smanjiti kada nema prijenosa OFDM podatkovnih simbola.

Kao što je prikazano na Slici 9, osnovno načelo uštede energije BS je isključivanje PA tijekom razdoblja bez prijenosa OFDM podatkovnih simbola. Ovaj koncept već je implementiran za nove generacije 5G baznih postaja u klasičnim ne-rezanim 5G mrežama, a pokazalo se da može doprinijeti smanjenju potrošnje energije BS. Važno je naglasiti da se ova vrsta uštede energije može primijeniti kod umjerenih opterećenja baznih postaja, što znači da se uključivanje i isključivanje PA može dopustiti samo u razdobljima kada se preko mrežnog reza prenosi manja količina prometa. U slučaju intenzivnog prijenosa podatkovnog prometa unutar mrežnog reza, svaki vremenski odsječak OFDM simbola bit će zauzet, što smanjuje mogućnost isključivanja pojačala snage (PA) [23].



Slika 9: Aktivnost PA primopredajnika BS sukladno vremenskim varijacijama toka podataka [5], [22]

Dodatno, u rezanim 5G mrežama s baznim postajama koje istovremeno opslužuju više mrežnih rezova, kako bi se postigle dodatne uštede energije, koncept raspoređivanja aktivnosti pojačala snage (PA) može se proširiti na njihovu distribuciju između različitih mrežnih rezova, primjenom tehnika prikazanih na Slici 10.



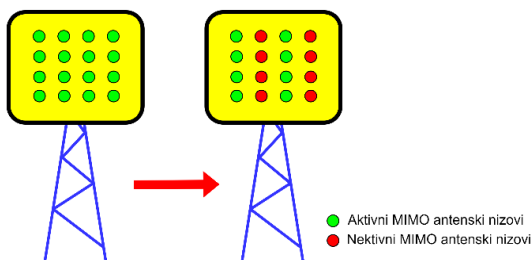
Slika 10: Alokacija pojačala snage bazne(ih) postaje(a) između više mrežnih rezova: a) trajnom alokacijom; (b) na temelju rasporeda PA između mrežnih rezova [5]

Jedan koncept temelji se na pristupu prema kojem je određeni PA trajno dodijeljen određenom mrežnom rezu, kao što je prikazano u primjeru na Slici 10a, dok se drugi pristup temelji na vremenskom rasporedu prijenosa prometa više mrežnih rezova između različitih pojačala snage bazne(ih) postaje(a) (Slika 10b). U oba koncepta, ušteda energije postiže se za određene mrežne rezove u razdobljima kada nema

podatkovnog prometa za prijenos putem mrežnih rezova. Implementacija takvog koncepta zahtijevat će razvoj tehnika koje će omogućiti dinamičko raspoređivanje pojačala snage među mrežnim rezovima na istoj ili različitoj BS ili će zahtijevati mogućnost dodjele određenog pojačala snage određenim mrežnim rezovima putem konfiguracije BS-a.

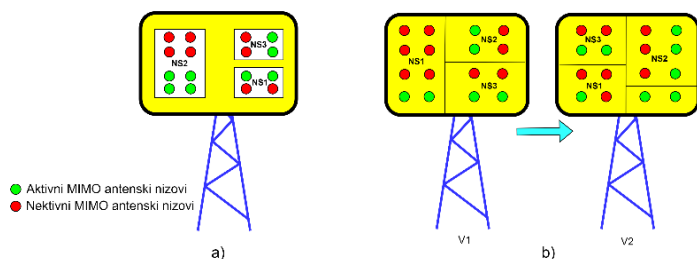
3.2 Mogućnosti uštede energije u prostornoj domeni u rezanom RAN dijelu mreže

Uštede energije u rezanim 5G mrežama u prostornoj domeni mogu se postići primjenom prijenosne tehnike višestrukog ulaza–višestrukog izlaza (engl. *multiple-input multiple-output* – MIMO). MIMO kao tehnika se temelji na bežičnom istovremenom prijenosu više sljedova podataka preko nizova višestrukih antena, što rezultira smanjenim slabljenjem signala, poboljšanim omjerom signala i šuma na krajevima bežične komunikacije i mogućnošću stvaranja višestrukih komunikacijskih tokova koji povećavaju kapacitet kanala za prijenos podataka u ograničenom frekvencijskom spektru. Implementacija višekorisničkog MIMO (engl. *multi-user MIMO* – MU-MIMO) i masivnog MIMO (engl. *massive MIMO* – mMIMO) prijenosnih tehnika omogućuje daljnje poboljšanje kapaciteta bežičnog kanala u 5G mrežama. Zgušnjavanje i povećanje broja antenskih nizova u MIMO sustavu omogućuje implementaciju tehnika uštede energije kroz prostornu alokaciju bežičnih tokova preko nizova MIMO antenskih elemenata. Osnovna ideja uštede energije u prostornoj domeni u rezanom RAN dijelu mreže povezana je s uključivanjem i isključivanjem MIMO antenskih nizova u skladu s intenzitetom mrežnog prometa onog dijela antenskih elemenata i popratne opreme koja opslužuje određeni mrežni rez. Tijekom vremenskih razdoblja kada aktivnost svih MIMO antenskih primopredajnika nije nužna zbog niskog ili nepostojećeg intenziteta prometa u određenom mrežnom rezu, određeni broj MIMO antenskih nizova može se isključiti (Slika 11), pod uvjetom da isključivanje antenskih elemenata neće utjecati na kvalitetu ukupnog korisničkog iskustva.



Slika 11: Koncept raspoređivanja aktivnosti elemenata antenskog niza u cilju uštede energije mreže [5], [22]

Uzimajući u obzir da 5G općenito koristi više antenskih nizova, posebno kada se koriste MU-MIMO i mMIMO tehnike prijenosa, moguće uštede energije u prostornoj domeni mogu biti značajne. Nakon isključivanja određenih primopredajnika koji predstavljaju kanalske odašiljače, doći će do smanjenja ukupne snage odašiljanja antene i posljedično do smanjenja potrošnje energije BS. Smanjena snaga odašiljanja se može kompenzirati povećanjem spektralne gustoće snage preostalih aktivnih primopredajnika MIMO antenskog niza kroz odašiljanje primjenom MIMO tehnike [23].



Slika 12: Dodjela elemenata BS antenskog niza određenim mrežnim rezovima: a) trajno; b) na temelju prostornog rasporeda elemenata antenskog niza koji će se dinamički dijeliti između mrežnih rezova [5]

Kako bi se omogućile daljnje uštede energije kroz implementaciju mrežnog rezanja, postoji mogućnost dodjele različitih MIMO antenskih nizova različitim mrežnim rezovima. Moguća konfiguracija takvog MIMO prijenosa u rezanoj 5G mreži se može vidjeti na Slici 12. Može se primijetiti da se u praksi mogu implementirati dva pristupa dodjeli mrežnih rezova MIMO antenskim nizovima. Prvi pristup temelji se na namjenskoj konfiguraciji s trajnijom dodjelom određenog skupa MIMO antenskih nizova za određeni mrežni rez (Slika 12a), dok drugi pristup obuhvaća mogućnost dinamičkog raspoređivanja različitih MIMO antenskih nizova između različitih mrežnih rezova (Slika 12b). Svaka od ovih opcija uključuje isključivanje određenih elemenata MIMO antenskih nizova dodijeljenih određenom mrežnom rezu, s ciljem smanjenja potrošnje energije BS te posljedično i mobilne mreže (Slika 12).

Praktična implementacija dinamičke dodjele mrežnih rezova između različitih elemenata antenskih nizova, uz mogućnost isključivanja određenih elemenata radi uštede energije, zahtijevat će nove pristupe i algoritme koji mogu podržati takve praktične implementacije. Međutim, primjena masivnih mMIMO antena u 5G mrežama s raspodjelom između različitih mrežnih rezova prema predloženim pristupima (na Slici 12), može dovesti do smanjenja potrošnje energije. Konvencionalna upotreba antena u mobilnim mrežama karakterizirana je emisijom signala u određenim sektorima (ćelijama) koji pokrivaju široko područje, što rezultira time da značajan postotak

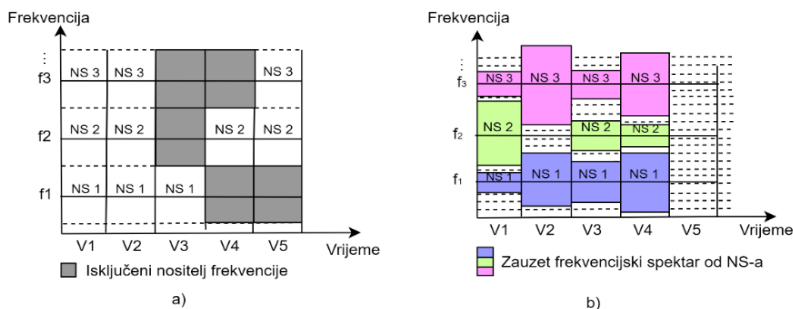
emitirane energije bežičnog signala ostaje neiskorišten. Predloženi pristup, temeljen na raspoređivanju mrežnih rezova između elemenata masivnih mMIMO antenskih nizova, omogućuje usmjeravanje elektromagnetskih valova izravno prema korisnicima određenih mrežnih rezova, čime se eliminira rasipanje energije koje je prisutno kod konvencionalnog MIMO prijenosa sa sektorskim (čelijskim) antenama. U kombinaciji s tehnikama koje podržavaju isključivanje određenih elemenata mMIMO antenskih nizova tijekom razdoblja niske prometne aktivnosti, mrežno rezanje može omogućiti značajne uštede u potrošnji energije 5G mreže.

3.3 Mogućnosti uštede energije u frekvencijskoj domeni u rezanom RAN dijelu mreže

Mogućnosti za poboljšanje energetske učinkovitosti rezane 5G RAN mreže postoje i u frekvencijskoj domeni. Dva pristupa u frekvencijskom domeni mogu doprinijeti povećanju uštede energije 5G mreža. Prvi pristup temelji se na potpunom isključivanju frekvencijskog 5G podnositelja signalizacijskih poruka, dok se drugi oslanja na smanjenje širine radnog frekvencijskog pojasa isključivanjem određenih frekvencijskih podnositelja. S obzirom na proširenje radnog frekvencijskog spektra 5G mreža do 6 GHz i mogućnost korištenja spektra milimetarskih valova (od 20 GHz do 30 GHz za 5G mreže), u cilju poboljšanja energetske učinkovitosti 5G mreža primjena koncepta raspoređivanja radiofrekvencijskih resursa između mrežnih rezova u frekvencijskom području može imati značajnu ulogu.

Ovo je posebno izraženo u područjima gdje dolazi do preklapanja signala 4G i 5G mreža [22]. U situacijama kada je promet u 5G mreži vrlo nizak i nije zahtjevan u smislu osiguravanja visokih prijenosnih brzina, korisnici se mogu preusmjeriti na 4G mrežu isključivanjem 5G signalnog nositelja putem odgovarajućeg sučelja. Kada nadzorni mehanizmi detektiraju porast aktivnosti tih korisnika ili povećanje zahtjeva za prometom, signalni nositelj u 5G mreži ponovno se uspostavlja putem nadzornih mehanizama kako bi se prilagodio potrebama korisnika i njihovim zahtjevima za prometom [23].

Predstavljeni pristup, koji je već implementiran u nove generacije 5G baznih postaja, može se proširiti na mrežno rezanje 5G mreže u cilju poboljšanja energetska učinkovitost istih. Na Slici 13 prikazana su dva pristupa dodjeli frekvencijskog spektra različitim mrežnim rezovima.



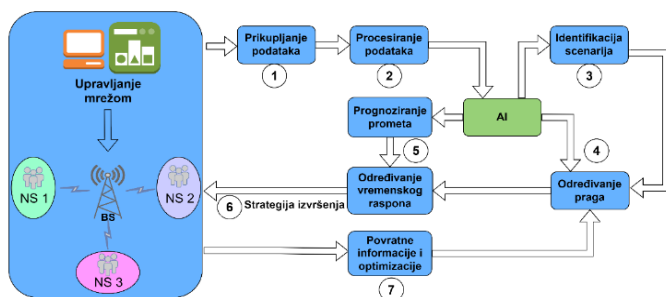
Slika 13: Dodjela frekvencijskog spektra različitim mrežnim rezovima: (a) trajna dodjela; (b) dodjela na temelju rasporeda resursa frekvencijskog spektra koji će se dijeliti između mrežnih rezova [5]

Na Slici 13a, frekvencije nositelja i raspoloživi frekvencijski spektar (širina pojasa) statički su dodijeljeni kroz VNF konfiguraciju baznih postaja određenom mrežnom rezu. U slučaju kada nema podatkovnog prometa u pojedinim mrežnim rezovima, frekvencijski nositelj tog mrežnog reza može se isključiti, zbog čega će primopredajnik bazne postaje raditi u energetski štedljivom načinu rada. Na Slici 13b, prikazana dodjela dinamičkog spektra (širina pojasa) nositelja frekvencije odgovarajućem mrežnom rezu izvodi se u skladu s ukupnom dostupnošću spektra frekvencija i trenutnim potrebama mrežnog reza za određenom širinom frekvencijskog pojasa. U prometnim situacijama kada mrežni rez zahtijeva manju širinu pojasa, dodjela smanjene širine pojasa bežičnog kanala kroz smanjenje korištenih podnosioca može doprinijeti uštedi energije baznih postaja koje opslužuju taj mrežni rez. Opisani modeli uštede energije mobilne mreže mogu biti realizirani primjenom algoritama umjetne inteligencije, koji su predstavljeni u sljedećem odjeljku rada.

3.4 Optimizacija energetske učinkovitosti RAN dijela mreže primjenom AI tehnologije

Moguće strategije za uštedu energije u rezanim 5G mrežama u vremenskim, prostornim i frekvencijskim domenama sukladno opisanom u prethodnim odjeljcima mogu se realizirati samo s naprednim strategijama upravljanja i orkestracije 5G RAN dijela mreže. Da bi se praktično realizirale takve strategije, primjena umjetne inteligencije (AI) pojavljuje se kao mogući važan pristup optimizaciji potrošnje energije mrežnih rezova u RAN dijelu mreže. Pregled općeg postupka provođenja strategije uštede energije u RAN dijelu mreže temeljen na primjeni tehnika umjetne inteligencije (AI) prikazan je na Slici 14 [23]. Postupak se sastoji od nekoliko faza od kojih je prva faza posvećena prikupljanju relevantnih podataka o karakterističnim radnim performansama RAN dijela mreže, čiji se resursi koriste za realizaciju određenog mrežnog reza

putem nadzornih mehanizama (Slika 14). Prikupljeni podatci se u sljedećoj fazi filtriraju i prilagođavaju formatu koji je primjenjiv za daljnju obradu. Takvi se podatci u 3. fazi šalju programima (softveru) koji koristi neki od modela i algoritama umjetne inteligencije (AI) za generiranje konfiguracijskih parametara za određeni mrežni rez, s ciljem optimizacije potrošnje energije mobilne mreže. Na temelju zadanih operativnih ciljeva koje je potrebno postići, u 4. fazi definiraju se vrijednosti KPI parametara koji karakteriziraju uštedu energije kao i pragovi koji određuju minimalne radne parametre za osiguranje QoS korisnicima (Slika 14). Nakon toga, u 5. fazi, koristeći povijesne podatke, AI predviđa vrstu i količinu prometa koji će se prenositi u određenom razdoblju mrežnim rezom, te određuje tehniku(e) uštede energije i vremenski okvir za njihovu primjenu. U 6. fazi, odabrana strategija uštede energije za određeni mrežni rez, koja može biti u vremenskoj, prostornoj ili frekvenciji domeni (ili njihovoj kombinaciji), se šalje kontrolnom sustavu kao virtualna mrežna funkcija (VNF) te se izvršava korištenjem tehnika SDN. Nakon implementacije odabrane strategije, u fazi 7. se prati rad mrežnog reza, u cilju procijene zadovoljavanja postavljenih ciljeva energetske učinkovitosti mreže kao i postizanje ciljeva koji se odnose na osiguranje radnih performansi pojedinog mrežnog reza. Ovaj postupak koji se temelji na primjeni AI za smanjenje potrošnje energije u RAN dijelu mreže, potrebno je implementirati u sustavu zatvorene petlje, koji uključuje stalne prilagodbe KPI parametara koji se odnose na energetska učinkovitost mreže kao i pragova radnih parametara za određeni mrežni rez (sukladno naznačenom u 4. fazi na Slici 14).



Slika 14: Procedura optimizacije potrošnje energije u RAN dijelu mreže s različitim mrežnim rezovima primjenom tehnika umjetne inteligencije [5], [23]

Važno je naglasiti da se različite AI metode mogu primijeniti zasebno na pojedine RAN podsustav svakog mrežnog reza u cilju optimalnog upravljanja mrežnim resursima koji doprinose smanjenju potrošnje energije. Također, optimizacija energetske učinkovitosti mreža primjenom AI tehnika može rezultirati prelaskom djela komponenata ili cijele BS u energijski štedljivi način rada, čak i onda kada resurse te BS koristi jedan li više mrežnih rezova.

3.5 Raspoređivanje resursa u mrežnom rezanju primjenom umjetne inteligencije

Glavni izazov u praktičnoj realizaciji opisanog općeg postupka provođenja strategije uštede energije primjenom AI je realizacija faza 5. i 6. Faza 5. se odnosi na predviđanje vrste i količine prometa koji će biti prisutan u mrežnom rezu za određeno vremensko razdoblje, dok u fazi 6. treba odabrati minimalne mrežne resurse koji će osigurati maksimalne uštede energije ali bez degradacije QoS za korisnike mrežnog reza. Ove tehnike predviđanja prometa i uštede energije izravno su povezane s dodjelom mrežnih resursa svakom mrežnom rezu, koje treba raspodijeliti (provizionirati) kako bi se osigurala odgovarajuća kvaliteta usluge (QoS) uz istovremeno minimiziranje potrošnje energije mrežnog reza i posljedično cijele mobilne mreže.

Kao primjer navode se rezultati predstavljeni u [24], u kojem autori proučavaju primjenu dva pristupa upravljanju virtualnim usmjerenicima (engl. *routers*) u realizaciji mrežnog rezanja. Prvi pristup se temelji na predviđanju lokalnog prometa samo na lokalnom znanju o prometnim profilima specifičnog mrežnog reza, dok se drugi pristup temelji na predviđanju globalnog prometa ali temeljem informacija o kompletnom dnevnom prometnom profilu mobilnog mrežnog operatora (MNO). Pokazano je da je metoda temeljena na globalnom predviđanju prometa postigla 35% bolje rezultate u pogledu smanjenja potrošnje energije i operativnih troškova MNO, u usporedbi s metodom predviđanja temeljenom na lokalnom prometu.

Problem odabira odgovarajućih mrežnih resursa pojavljuje se kada se rezervira više resursa za rad određenog mrežnog reza nego što je stvarno potrebno, što dovodi do većih troškova. S druge strane, ako se rezervira premalo resursa, to može uzrokovati degradaciju QoS i povećati troškove za MNO. Dosadašnji koncepti upravljanja su se uglavnom temeljili na usklađivanju odabranih mrežnih resursa potrebnih za izvršavanje virtualnih mrežnih funkcija (VNF) kroz reaktivan proces koji koristi pragove histereze kako bi se osiguralo učinkovito korištenje mrežnih resursa. Stoga je praktična primjena tehnologija AI u dodjeli mrežnih resursa između mrežnih rezova još uvijek u ranoj fazi.

Neki preliminarni rezultati koji se odnose na korištenje AI za optimizaciju raspodjele resursa među mrežnim rezovima prikazani su u radu [25], gdje autori predlažu algoritam raspodjele resursa primjenom modela duge kratkoročne memorije (engl. *long short-term memory* – LSTM) temeljen na AI. Funkcija troška (engl. *cost function*) predloženog algoritma uključuje kaznu za povećane mrežne troškove i uzima u obzir trošak dodjele mrežnih resursa te degradaciju QoS. U radu [25] je dodatno pokazano da je predloženi algoritam predviđanja u scenariju primjene mrežnog rezanja u mreži s četiri sučelja virtualnih mrežnih funkcija, doveo do poboljšanja troška u mreži od 40%. U radu [26] predložen je još jedan, proaktivan i automatiziran alat za analizu podataka koji optimizira korištenje mrežnih resursa među mrežnim rezovima. Razvi-

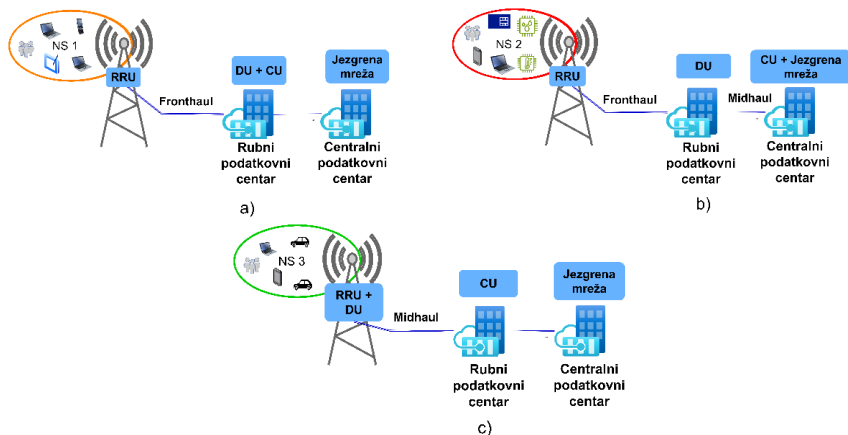
jeno rješenje se temelji na strojnom učenju koje iskorištava korelacije mobilnog prometa neovisno o prostoru i vremenu te pruža mobilnim mrežnim operatorima (MNO) informacije o kapacitetu potrebnom za zadovoljenje zahtjeva svakog mrežnog reza. Predloženo rješenje izračunava izlaze na razini podatkovnog centra putem prilagođene funkcije gubitka (engl. *loss function*), koja predviđa potrebe za kapacitetom i na taj način omogućuje MNO da smanji mogućnost prekomjernog ili premalog izdvajanja resursa za određeni mrežni rez.

Unatoč opisanim rezultatima, praktična primjena AI u raspodjeli mrežnih resursa između mrežnih rezova za poboljšanje energetske učinkovitosti mobilne mreže još je u začecima. Postoji potreba za dodatnim istraživanjima koja će rezultirati razvojem novih algoritama i tehnika temeljenih na AI, a koje će omogućiti integraciju umjetne inteligencije za učinkovitu raspodjelu mrežnih resursa između mrežnih rezova, s ciljem optimizacije potrošnje energije mreže.

3.6 Raspored mrežnih elemenata za energetske učinkovito mrežno rezanje

Najnovije 5G arhitekture RAN dijela mreže karakterizira odvajanje BBU i RRH/U komponenata (jedinica) bazne postaje (BS). To znači da BBU i RRU/H jedinice mogu biti implementirane na različitim fizičkim lokacijama (sukladno prikazanom na primjerim sa Slike 15). Nadalje, 5G novi radio (NR) uvodi podijeljenu BBU arhitekturu, gdje je funkcionalnost BBU općenito podijeljena na dva funkcionalna entiteta koji tvore funkcije distribuirane jedinice (engl. *distributed unit* – DU) i centralizirane jedinice (engl. *centralized unit* – CU). U praksi, DU i CU jedinice ne moraju biti implementirane na istoj fizičkoj lokaciji (Slika 15). To znači da se BBU funkcionalnosti DU i CU jedinica mogu distribuirati ili implementirati u oblaku. Pri tome veza poznata kao “engl. *fronthaul*” omogućuje optičku vezu između DU i RRU/H, a veza poznata kao “engl. *midhaul*” predstavlja vez optičkih vlakana temeljena na paketima koja povezuje CU i DU u 5G RAN arhitekturi kada CU i DU jedinice nisu na istoj lokaciji (Slika 15).

S pojavom VNF i SDN kao glavnih koncepata za praktičnu realizaciju mrežnog rezanja, DU i CU kao BBU funkcionalnosti se mogu dijeliti između različitih mrežnih rezova. To može omogućiti preciznu dodjelu DU i CU resursa određenim mrežnim rezovima. Slika 15 prikazuje primjere neke od mogućih kombinacija implementacije RRU/H, DU i CU jedinica (komponenta) u RAN i jezgrenom dijelu mreže s jednom 5G baznom postajom koja pruža usluge određenom mrežnom rezu. S obzirom na energetske učinkovitost 5G rezane mreže, raspored ovih mrežnih komponenata ovisit će o vrsti prometa koji će se prenositi tom mrežom.



Slika 15: Arhitekture 5G mreže s mrežnim rezom a) prikladnim za pružanje usluga poboljšane mobilne širokopolasnu povezanost (eMBB), b) prikladnim za pružanje usluge masivne komunikacije strojnog tipa (mMTC) i c) prikladnim za pružanje usluge komunikacije vozila prema svemu (V2X) [5]

U rezanim 5G mrežama, vrste prometa uglavnom su unaprijed poznate, budući da je promet određenog mrežnog reza koncentriran u tom mrežnom rezu i prenosi se kroz odgovarajuće resurse 5G mreže. Na primjer, za tipove usluga koje zahtijevaju mobilnu širokopolasnu povezanost (engl. *enhanced mobile broadband connectivity* – eMBB), masivnu komunikaciju strojnog tipa (engl. *massive machine-type communications* – mMTC) i komunikacije vozila prema svemu (engl. *vehicle-to-everything* – V2X), preporučene arhitekture mrežnog rezanja 5G mreže su one prikazane na Slici 15.

Budući da DU i CU komponente u novim BBU arhitekturama predstavljenim na Slici 15 mogu biti fizički odvojive i distribuirane, iste se mogu implementirati u rubne ili središnje podatkovne centre (engl. *edge or core data center* – DC). Ova implementacija BBU funkcionalnosti u podatkovnim centrima omogućuje virtualizaciju DU i CU funkcionalnosti po određenim mrežnim rezovima na virtualnim strojevima ili spremnicima (kontejnerima) podatkovnog centra (Slika 15). Takva dodjela virtualnih resursa podatkovnog centra (DC) za određenu BBU funkcionalnost i mogućnost brzog raspoređivanja ovih resursa za korištenje od strane različitih mrežnih rezova, otvara velike mogućnosti za poboljšanje energetske učinkovitosti BBU jedinica u usporedbi s dosadašnjim tradicionalnim BBU realizacijama temeljenim na fiksnoj alokaciji BBU jedinica unutar bazne postaje (BS). Također, implementacije DU i CU funkcija u rubnim ili centralnim podatkovnim centrima dodatno doprinose smanjenju potrošnje energije jer podatkovni centri implementiraju modele za optimizaciju energetske učinkovitosti. To čak može uključivati napajanje energijom podatkovnog centra iz obnovljivog izvora energije. Dodatno, moderne metode hlađenja opreme podatkovnog centra uglavnom se koriste za cijeli podatkovni centar. Stoga ovakav pristup alokacije DU i CU jedinica smanjuje troškove korištenja zasebnih rashladnih uređaja za klimatizaciju pojedinačnih BBU jedinica, što je karakteristično za makro

bazne postaje u tradicionalnim 5G (ne virtualiziranim) mrežama i mobilnim mrežama prethodnih generacija. Dodatne moguće uštede energije se mogu ostvariti kroz realizacija BBU elemenata (DU i CU) kao virtualnih mrežnih funkcija (VNF), što omogućuje brže izvršavanje potrebnih funkcija i stavljanje BBU elemenata u isključeno stanje kada ne obrađuju podatke i signalizaciju.

Fleksibilnost alokacija funkcija CU i DU u arhitekturama modernih 5G mreža prikazanih na Slici 15 omogućuju optimizaciju izvedbe mrežnih rezova kao i njihovu skalabilnost i jednostavnije upravljanje opterećenjem. Na primjer, sukladno Slici 15b, alociranje DU funkcija u rubni, a CU funkcija u centralni DC kod pružanja mMTC usluga koje se ne izvršavaju u stvarnom vremenu (engl. *real time*) i koje su procesorski intenzivne, omogućuje učinkovitije usmjeravanje prometa mrežnog reza i korištenje RAN resursa mreže. S druge strane, premještanjem funkcija CU i DU te samo CU jedinica bliže RRU/RRH jedinicama u slučaju upotrebe mreže s velikim zahtjevima za propusnost (kao na Slici 15a za eMBB), ili za slučaj osiguranja usluga s vrlo niskim kašnjenjem (kao na Slici 15c za V2X uslugu), može se postići značajno poboljšanje učinkovitosti obrade informacija. U usporedbi s klasičnim (tradicionalnim) arhitekturama 5G mreža, ovo poboljšanje učinkovitosti također će se odraziti na optimalniju potrošnju energije resursa mobilne mreže koji opslužuju pripadajuće mrežne rezove. Stoga, za poboljšanje energetske učinkovitosti 5G RAN dijela mreže kroz primjenu koncepta mrežnog rezanja, komponente BBU (DU i CU) moraju biti dodijeljene prema karakteristikama usluge mrežnog reza. Takva odgovarajuća dodjela BBU elemenata (DU i CU jedinica) i njihova primjerena alokacija u mreži može doprinijeti poboljšanju energetske učinkovitosti mobilnih mreža.

4. Zaključak

Rad pruža pregled različitih aspekata mrežnog rezanja 5G mreže s ciljem poboljšanja energetske učinkovitosti mobilnih mreža. Različiti slučajevi korištenja mrežnih rezova 5G mreže su predstavljeni i analizirani u smislu utjecaja na potrošnju energije mobilne mreže. Rad prezentira i ideje za buduća istraživanja o temama koje se odnose na poboljšanje energetske učinkovitosti 5G mreža korištenjem koncepta mrežnog rezanja.

U radu je predložen niz različitih rješenja za razvoj novih tehnika i algoritama koji bi mogli utjecati na smanjenje potrošnje energije 5G mreža kroz implementaciju koncepta mrežnog rezanja. Predložena rješenja uključuju tehnike kao što je ograničavanje potrošnje energije mrežnih rezova od strane mobilnih mrežnih operatora (MNO), implementacija dinamičkih promjena u operativnim stanjima mrežnih rezova te raspodjela odgovarajućih mrežnih resursa u skladu s varijacijama mrežnog prometa. Dodatno, u radu je predstavljena opsežna analiza mogućnosti poboljšanja energetske učinkovitosti u RAN dijelu mreže primjenom mrežnog rezanja 5G mre-

že. Analizirane su implementacije metoda za poboljšanje energetske učinkovitosti mobilne mreže primjenom koncepta mrežnog rezanja kroz prilagodbe mrežnih resursa u vremenskoj, frekvencijskoj i prostornoj domeni. Rad također daje pregled mogućnosti upravljanja alokacijom resursa mreže između različitih mrežnih rezova primjenom modela umjetne inteligencije, s ciljem optimiziranja energetske učinkovitosti 5G RAN dijela mreže. Prezentirane su objavljene studije u kojima su korištene tehnike umjetne inteligencije za upravljanjem mrežnim rezanjem u cilju poboljšanja energetske učinkovitosti mobilne mreže. Na kraju rada, razrađen je utjecaj prostornog rasporeda BBU elemenata u podatkovnim centrima na poboljšanje energetske učinkovitosti 5G mreže u slučaju implementacije mrežnog rezanja 5G mreže.

Pokazano je da koncept mrežnog rezanja analiziran u ovom radu može doprinijeti poboljšanju energetske učinkovitosti 5G mreže. Stoga poboljšanje energetske učinkovitosti 5G mreže primjenom jedne ili kombinacije analiziranih tehnika temeljenih na mrežnom rezanju, predstavlja područje sa značajnim istraživačkim potencijalom, koje može pridonijeti daljnjoj optimizaciji potrošnje energije energijski zahtjevnih 5G i budućih 6G mreža.

5. Literatura

- [1] Phyu, H. P.; Naboulsi, D.; Stanica, R.; Poitau, G.: Towards Energy Efficiency in RAN Network Slicing, *023 IEEE 48th Conference on Local Computer Networks (LCN)*, 1-9, Daytona Beach, FL, USA, Listopad 2023, <https://doi.org/10.1109/LCN58197.2023.10223377>
- [2] Lorincz, J.; Bule, I.; Kapov, M.: Performance Analyses of Renewable and Fuel Power Supply Systems for Different Base Station Sites, *Energies*, **7** (2014) 12, 7816-7846, <https://doi.org/10.3390/en7127816>
- [3] Matthiesen, B.; Aydin, O.; Jorswieck, E. A.: Throughput and Energy-Efficient Network Slicing, *WSA 2018; 22nd International ITG Workshop on Smart Antennas*, 1-6, Bochum, Germany, ožujak 2018., <https://doi.org/10.48550/arXiv.1804.08922>
- [4] Tipantuña, C.; Hesselbach, X.: Adaptive Energy Management in 5G Network Slicing: Requirements, Architecture, and Strategies, *Energies*, **13** (2020) 15, 3984-4011, <https://doi.org/10.3390/en13153984>
- [5] Lorincz, J.; Kukuruzović, A.; Blažević, Z.: A Comprehensive Overview of Network Slicing for Improving the Energy Efficiency of Fifth-Generation Networks, *Sensors*, **24** (2024) 10, 3242-3276, <https://doi.org/10.3390/s24103242>
- [6] <https://commsbrief.com/5g-new-radio-what-is-5g-nr-technology-and-how-does-it-work/>, *Pristupljeno*: 2024-05-13
- [7] Su, S.; Zhang, Z.; Liu, A. X.; Cheng, X.; Wang, Y.; Zhao, X.: Energy-Aware Virtual Network Embedding, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, **22** (2014) 5, 1607-1620, <https://doi.org/10.1109/TNET.2013.2286156>

- [8] Botero, J. F.; Hesselbach, X.; Duelli, M.; Schlosser, D.; Fischer, A.; Meer, H. d.: Energy Efficient Virtual Network Embedding, *IEEE Communications Letters*, **16** (2012) 5, 756-759, <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2012.030912.120082>
- [9] Botero, J. F.; Hesselbach, X.: Greener networking in a network virtualization environment, *Computer Networks*, **57** (2013) 7, 2021-2039, <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2013.04.004>
- [10] Li, X.; Samaka, M.; Chan, H. A.; Bhamare, D.; Gupta, L.; Guo, C.; Jain, R.: Network Slicing for 5G: Challenges and Opportunities, *IEEE Internet Computing*, **21** (2017) 5, 20-27, <https://doi.org/10.1109/MIC.2017.3481355>
- [11] Kazmi, S. M. A.; Khan, L. U.; Tran, N. H.; Hong, C. S.: *Network Slicing for 5G and Beyond Networks*, Springer Cham, 978-3-030-16170-5, (2019)
- [12] <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3144> , *Pristupljeno*: 2024-05-13
- [13] <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3550> , *Pristupljeno*: 2024-05-13
- [14] Telecommunication Engineering Centre, Ministry of Communications and Information Technology, Departments of Telecommunications, Government of India: Study Paper on Software Defined Networking (SDN) as a Tool for Energy Efficiency Approaches in Information and Communication Technology (ICT) Networks, *Dostupan na* <https://www.tec.gov.in/pdf/StudyPaper/Final%20SDN%20and%20energy%20efficiency%20approaches%20in%20SDN%20-%20Copy%20-%20Copy%20-%20Copy.pdf>, *Pristupljeno*: 2024-05-13
- [15] Lorincz, J.; Matijevic, T.; Petrovic, G.: On interdependence among transmit and consumed power of macro base station technologies, *Elsevier - Computer Communications*, **50** (2014), 10-28, <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2014.02.010>
- [16] Lorincz, J.; Bogarelli, M.; Capone, A.; Begušić, D.: Heuristic approach for optimized energy savings in wireless access networks, *18th International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks - SoftCOM 2010*, Split, Croatia, rujan 2010
- [17] <https://carrier.huawei.com/~media/CN BG/Downloads/Spotlight/5g/5G-Power-White-Paper-en.pdf>, *Pristupljeno*: 2024-05-13
- [18] <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3273>, *Pristupljeno*: 2024-05-13
- [19] Shurdi, O.; Ruci, L.; Biberaj, A.; Mesi, G.: 5G Energy Efficiency Overview, *European Scientific Journal*, **17** (2021) 3, 315-328, <https://doi.org/10.19044/esj.2021.v17n3p315>
- [20] Lorincz, J.; Capone, A.; Begusic, D.: Heuristic Algorithms for Optimization of Energy Consumption in Wireless Access Networks, *KSII Transactions on Internet and Information Systems (TIIS)*, **5** (2011) 4, 626-648, <https://doi.org/10.3837/tiis.2011.04.001>
- [21] Lorincz, J.; Bule, I.: Renewable Energy Sources for Power Supply of Base Station Sites, *International Journal of Business Data Communications and Networking*, **9** (2012) 3, 53-74, <https://doi.org/10.4018/jbdcn.2013070104>
- [22] Tan, R.; Shi, Y.; Fan, Y.; Zhu, W.; Wu, T.: Energy Saving Technologies and Best Practices for 5G Radio Access Network, *IEEE Access*, **10** (2022), 51747-51756, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3174089>

- [23] <https://www.itu.int/md/T17-SG05-210511-TD-GEN-1865>, *Pristupljeno*: 2024-05-13
- [24] Eramo, V.; Miucci, E.; Ammar, M.: Study of Reconfiguration Cost and Energy Aware VNE Policies in Cycle-Stationary Traffic Scenarios, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, **34** (2016) 5, 1281-1297, <https://doi.org/10.1109/JSAC.2016.2520179>
- [25] Eramo, V.; Lavacca, F. G.; Catena, T.; Salazar, P. J. P.: Application of a Long Short Term Memory neural predictor with asymmetric loss function for the resource allocation in NFV network architectures, *Computer Networks*, **193** (2021), 108104-108116, <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2021.108104>
- [26] Bega, D.; Gramaglia, M.; Fiore, M.; Banchs, A.; Costa-Pérez, X.: DeepCog: Optimizing Resource Provisioning in Network Slicing With AI-Based Capacity Forecasting, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, **38** (2020) 2, 361-376, <https://doi.org/10.1109/JSAC.2019.2959245>