

UNIVERZITET U BEOGRADU
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET

Milica V. Popović Saković

**ODREĐIVANJE UTICAJA ARHITEKTURE
MOBILNE MREŽE NA UKUPNU
IZLOŽENOST STANOVNIŠTVA
ELEKTROMAGNETSKOM POLJU**

doktorska disertacija

Beograd, 2022

UNIVERSITY OF BELGRADE
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING

Milica V. Popović Saković

**THE DETERMINATION OF MOBILE
NETWORK ARCHITECTURE IMPACT ON
POPULATION TOTAL EXPOSURE TO
ELECTROMAGNETIC FIELD**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2022

PODACI O MENTORU I ČLANOVIMA KOMISIJE

Mentor:

dr Mladen Koprivica, docent

Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet

Članovi komisije:

dr Aleksandar Nešković, redovni profesor

Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet

dr Nataša Nešković, redovni profesor

Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet

dr Nikola Tomašević, viši naučni saradnik

Univerzitet u Beogradu – Institut Mihajlo Pupin

dr Dragan Olćan, vanredni profesor

Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet

dr Dejan Drajić, vanredni profesor

Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet

Datum odbrane:

Podaci o doktorskoj disertaciji

Određivanje uticaja arhitekture mobilne mreže na ukupnu izloženost stanovništva elektromagnetskom polju

Sažetak:

Pitanje izloženosti elektromagnetskom polju koje potiče od mobilnih komunikacionih sistema pažnju javnosti privuklo je sa širenjem ovih sistema i sa sve dužim vremenom korišćenja, a posebno sa uvođenjem 5G tehnologije u višim frekvencijskim opsezima, sa naprednim tehnikama prenosa i velikim brojem malih ćelija i korisničkih uređaja. Regulativa u ovoj oblasti definiše bazična ograničenja i referentne granične nivoe, pri čemu se usklađenost sa normama za korisničke uređaje i za bazne stanice proverava na različit način. Na ovaj način se ne može odrediti stvarna izloženost u toku korišćenja mobilnog uređaja niti izvršiti poređenja komponentata izloženosti.

U ovoj disertaciji definisana je metoda za određivanje srednje stvarne izloženosti stanovništva koja potiče od korisničkih uređaja i baznih stanica, na način da se u najvećoj meri koriste podaci iz same mobilne mreže. Utvrđeni su osnovni činioci koji utiču na izloženost. Izvršena je analiza uticaja korišćenih servisa odnosno ponašanja korisnika. Uticaj arhitekture mreže razmatran je u dva testna slučaja, dodavanjem malih ćelija na dve lokacije, na otvorenom i u zatvorenom, sa dve antenske konfiguracije. U prvom slučaju je uvođenje malih ćelija u GSM i UMTS tehnologiji smanjilo ukupnu izloženost više od 84%, a u drugom više od 58% u oblasti pokrivanja malih ćelija, dominantno kao posledica smanjenja zračenja korisničkih uređaja preko GSM-a. U drugom slučaju se ukupna izloženost od UMTS-a povećala usled blizine antena male ćelije. Rezultati pokazuju da male ćelije u opštem slučaju smanjuju izloženost usled smanjenja predajne snage korisničkih uređaja, ali i da je potrebno pažljivo planiranje arhitekture jer se u nekim slučajevima izloženost može i povećati.

Definisana metoda predstavlja statistički proračun stvarne izloženosti u složenom okruženju i može se primeniti za bilo koji bežični sistem uz odgovarajuće prikupljanje podataka. Predloženi su napredni alati u mreži za precizniji proračun i date su smernice za smanjenje izloženosti, koje bi se uz alate za samo-evaluaciju moglo postaviti kao još jedan cilj samo-optimizacije mreže.

Ključne reči: izloženost elektromagnetskom polju, srednji stvarni SAR, ukupna izloženost stanovništva, izloženost u *uplinku* i *downlinku*, topologije mreže GSM/UMTS, 2G/3G, mikro/makro bazne stanice

Naučna oblast: Elektrotehnika i računarstvo

Uža naučna oblast: Telekomunikacije

Information about doctoral dissertation

The determination of mobile network architecture impact on population total exposure to electromagnetic field

Abstract:

Exposure to electromagnetic fields induced by mobile communication systems has gained public attention with the expansion of these systems and longer usage times, and specially with the introduction of 5G technology in higher frequency bands, with advanced transmission techniques and huge number of small cells and user devices. Regulations in the area define basic restrictions and reference levels, whereby the compliance is verified using different procedures for user devices and for base stations. This way the actual exposure during real usage of mobile device cannot be determined, nor can the exposure components be compared.

This research defined a method for determining the average actual exposure of population originated from user devices and base stations, using data from the mobile network to the maximum extent. Basic factors that affect exposure are determined. The impact of services used i.e. user behaviour on exposure was analyzed. The impact of mobile network architecture was evaluated through two test cases, adding small cells at two sites, outdoors and indoors, with two antenna configurations. In the first case, the introduction of small cells in GSM and UMTS technologies reduced the total exposure by more than 84%, and in the second case by more than 58%, in the coverage area of small cells, predominantly as the result of decreased radiation of user devices over GSM. However, in the second case the total exposure originated from UMTS increased due to vicinity of small cell antennas. Results indicate that small cells generally reduce exposure due to decrease of user device transmit power, but also point out that careful planning of the architecture is needed as in some cases the exposure might rise.

The defined method represents a statistical calculus of actual exposure in complex environment and it may be applied to any wireless system with the appropriate data collection. Usage of advanced network tools is proposed for more precise calculation and guidelines are given for exposure reduction, which could be set as another target for network self-optimization based on self-evaluation.

Keywords: exposure to electromagnetic fields, average actual SAR, total population exposure, uplink and downlink exposure, GSM/UMTS network topology, 2G/3G, micro/macro base stations

Scientific area: Electrical engineering and computer science

Specific scientific area: Telecommunications

SADRŽAJ

1	UVOD.....	1
2	PREGLED VELIČINA I NORMI KOJIMA SE OGRANIČAVA IZLOŽENOST LJUDI ELEKTROMAGNETSKIM POLJIMA	5
2.1	Frekvencijski opsezi i zračenje.....	6
2.2	Specifična brzina apsorpcije (SAR)	7
2.2.1	Definicija.....	8
2.2.2	SAR za celo telo.....	8
2.2.3	Vršni prostorno usrednjeni SAR.....	8
2.2.4	Usrednjeni SAR specifičan za organ	9
2.2.5	Doza	9
2.3	Pregled propisa	9
2.3.1	ICNIRP preporuke	10
2.3.2	Propisi Evropske unije	12
2.3.3	IEEE.....	13
2.3.4	FCC	13
2.3.5	Health Canada Safety Code 6	14
2.3.6	ARPANSA.....	14
2.3.7	Nacionalni propisi	15
2.4	Merenje elektromagnetskog zračenja i metode za procenu izloženosti pojedinca i stanovništva.....	19
2.4.1	Usklađenost sa propisima.....	19
2.4.2	Realistična izloženost.....	22
2.4.3	Indeks izloženosti (EI) i srednji stvarni SAR.....	22
3	ARHITEKTURA MOBILNE MREŽE	25
3.1	Slojevi mrežne arhitekture: makro, mikro, piko, femto	25
3.2	Veza sa izloženošću elektromagnetskom polju.....	27
4	STATISTIČKA ANALIZA KLJUČNIH PARAMETARA MREŽE	29
4.1	Teorijska podloga	29
4.2	Aktivnost na radio interfejsu	31
4.3	Kontrola snage.....	33
4.4	Analiza snage u <i>downlinku</i>	34

4.5	Merenja predajne snage u <i>uplinku</i>	35
4.6	Uticao arhitekture: makro, mikro i femto ćelije.....	38
4.6.1	Dodavanje mikroćelije sa <i>indoor</i> DAS sistemom.....	38
4.6.2	Femtoćelija i makroćelija.....	41
4.7	Uticao korišćenih servisa na izloženost EM polju.....	42
4.8	Zaključak.....	44
5	RAZVOJ METODE ZA ODREĐIVANJE UKUPNE PROSEČNE IZLOŽENOSTI STANOVNIŠTVA I POJEDINCA ELEKTROMAGNETSKOM POLJU BEŽIČNIH TELEKOMUNIKACIONIH SISTEMA.....	45
5.1	Cilj nove metode.....	45
5.2	Izvori podataka.....	46
5.3	Razvoj metode.....	51
5.3.1	Polazna osnova.....	52
5.3.2	Odnos broja korisnika po slojevima u području od interesa.....	53
5.3.3	Određivanje izloženosti u UL.....	54
5.3.4	Određivanje izloženosti u DL.....	61
5.3.5	Kombinovanje podataka u ukupnu izloženost.....	65
5.4	Diskusija i unapređenja metode.....	66
5.4.1	Pojam područja.....	67
5.4.2	Fracije korisnika.....	67
5.4.3	Mapiranje podataka iz korisničke ravni i radio parametara.....	67
5.4.4	Merenja intenziteta električnog polja za izloženost u DL izvode se na terenu.....	67
5.4.5	Merenja DF su kompleksna i izvode se na terenu.....	68
5.4.6	Podaci o korisnicima, njihovoj upotrebi mobilnih servisa i stavu.....	68
5.4.7	Broj korisnika servisa prenosa govora i prenosa podataka.....	68
5.4.8	Kombinovanje.....	68
6	EKSPERIMENTALNA ANALIZA UTICAJA KORIŠĆENIH SERVISNA NA IZLOŽENOST POJEDINCA.....	70
6.1	Izloženost pojedinca u <i>uplinku</i>	70
6.2	Merna postavka i metodologija merenja.....	71
6.3	Rezultati merenja.....	74
6.4	Analiza izloženosti.....	78
6.5	Zaključak.....	81
7	EKSPERIMENTALNA ANALIZA UTICAJA ARHITEKTURE MREŽE NA UKUPNU SREDNJU IZLOŽENOST STANOVNIŠTVA.....	83
7.1	Dijagram toka procesa i dijagram kalkulacije.....	83

7.1.1	Merenja	90
7.1.2	Kombinovanje podataka za date scenarije	91
7.2	Lokacija Mirijevo, testni slučaj sa malim ćelijama instaliranim na otvorenom (pijaca Mirijevo).....	91
7.2.1	Testno okruženje	92
7.2.2	Testiranje.....	92
7.2.3	Rezultati	93
7.2.4	Zaključak.....	99
7.3	Lokacija Lola, testni slučaj sa malim ćelijama instaliranim unutar objekta	99
7.3.1	Testno okruženje	100
7.3.2	Testiranje.....	101
7.3.3	Rezultati	101
7.3.4	Zaključak.....	106
7.4	Diskusija.....	107
7.5	Uticaj parametara na rezultate metode	109
7.6	Smernice za optimizaciju mreže u pogledu izloženosti stanovništva	111
8	ZAKLJUČAK.....	113
	LITERATURA.....	116
	PRILOG 1	124
	Notacije i simboli parametara i promenljivih.....	124
	PRILOG 2	128
	Formulacija indeksa izloženosti (EI).....	128

1 UVOD

Od prve primene mobilnih komunikacionih sistema, zahtevi u pogledu njihovih performansi rastu, kao i vreme upotrebe mobilnih tehnologija od strane pojedinačnog korisnika. Moderne bežične komunikacione mreže treba da obezbede sveprisutno pokrivanje, sve veći kapacitet, sve manje kašnjenje, sa što manjom potrošnjom električne energije. Pojava pametnih telefona označila je početak znatnog rasta prenosa podataka, što je u velikoj meri uslovljeno rastućim korišćenjem video aplikacija [1]. Internet stvari (IoT: Internet of Things) je doneo nove standarde koji odgovaraju potrebama predviđenih saobraćajnih modela i masivnom broju uređaja, posebno senzora. Komercijalna 5G tehnologija (Peta generacija ćelijske tehnologije) je počela sa radom, dok je 4G (Četvrta generacija, LTE: Long Term Evolution) preuzela vođstvo nad 2G (Druga generacija, GSM: Global System for Mobile communications) tokom 2018. godine po broju mobilnih konekcija i nastavlja da raste [2]. Među mlađim osobama je teško naći nekoga ko ne koristi mobilne tehnologije [3]. Vreme korišćenja je produženo, bilo da je reč o boravku na društvenim mrežama, igranju igrice ili gledanju videa [4]. Okruženi smo sa sve više bežičnih uređaja, od čega su mnogi u blizini naših tela, ili, sa tehnologijom nosivih uređaja (*wearables*), na našim telima. Sve bežične komunikacione tehnologije koriste elektromagnetske (EM) talase za prenos informacija kroz vazduh. Ovo umnožavanje izvora elektromagnetskih talasa donosi novi zahtev za što manjim elektromagnetskim zračenjem, bilo mobilnih uređaja bilo baznih stanica. 5G uvodi dodatne izazove za procenu izloženosti elektromagnetskim talasima (u daljem tekstu: EM izloženost), kao još jedna tehnologija koja se preklapa sa ranijima, sa visokom gustinom baznih stanica i kao tehnologija koja koristi više frekvencije od onih koje su trenutno u upotrebi, kao i napredne tehnike poput masivnog MIMO (Multiple-Input Multiple-Output, višeantenski sistem) i oblikovanja snopa (*beamforming*). Ova kompleksnost ukazuje na to da je statistički pristup evaluaciji EM izloženosti verovatno najpodesniji [5]. Planiranje 5G mreže koje uzima u obzir i EM izloženost zahteva pažljivu selekciju lokacija u okruženju baznih stanica postojećih tehnologija, 2G, 3G (Treća generacija, UMTS: Universal Mobile Telecommunications System) i 4G, sa lokacijama zasićenim EM zračenjem i uz restrikcije u pogledu izvora EM zračenja koje utiču na ostvarive performanse odnosno kvalitet servisa [6].

Rasprostranjenost mobilnih tehnologija i sve intenzivnije korišćenje bežičnih komunikacionih tehnologija usmerili su pažnju javnosti na probleme sa izloženošću EM talasima u radio-frekvencijskim (RF: Radio Frequency) opsezima u kojima rade mobilne tehnologije. Naučna istraživanja u ovoj oblasti traju od početka primene mobilnih tehnologija, ali su javnost zaokupila tek sa porastom broja baznih stanica. Najveću zabrinutost javnosti izazivale su prvo velike antene baznih stanica u komšiluku [7][8], dok su ljudi malo pažnje obraćali na pristupne tačke u svojim domovima ili na sopstvene uređaje [9]. Ovo je nametalo suprotstavljene zahteve operatorima – sve veća pokrivenost i sve veći protok, a bez velikih antena u vidokrugu. Postoji percepcija da izloženost od baznih stanica ljudi ne mogu da kontrolišu, dok onu od korisničkih uređaja ili kućnih pristupnih tačaka mogu – jer mogu da ih isključe. Pažnja javnosti se sa baznih stanica dalje okrenula se ka korisničkim uređajima [10][11], usled njihove blizine u odnosu na telo i usled dužeg vremena korišćenja [12]. Bazne stanice emituju signal sve vreme, ali budući da snaga elektromagnetskih talasa opada veoma brzo sa udaljenošću [13], samo mali deo izračene snage stiže do korisnika. Sa druge strane, mobilni uređaji drže se blizu tela i premda oni zrače mnogo manjim snagama u odnosu na bazne stanice, sve intenzivnije korišćenje ovih uređaja ima za posledicu duže periode izloženosti elektromagnetskom polju (EMF: Electromagnetic Field) bliskog izvora. Istraživanja u okviru projekta LEXNET (Low-EMF Exposure Networks) [14][15], Sedmog okvirnog programa (FP7: Seventh Framework Programme for Research and Technological Development) Evropske unije (EU), pokazala su da dominantan udeo u ukupnoj izloženosti stanovništva EM zračenju koje potiče od

bežičnih komunikacionih sistema ima izloženost zračenju korisničkih uređaja [16][17]. Pitanje izloženosti EM zračenju aktuelnije je nego ikad sa uvođenjem 5G tehnologije koja za postizanje visokih protoka i malog kašnjenja predviđa gustu mrežu baznih stanica manje snage. 5G donosi i korišćenje viših frekvencijskih opsega koji se do sada nisu koristili za mobilne komunikacije, a sa njima i pitanje adekvatnog merenja izloženosti u ovim opsezima. Imajući u vidu perspektivu digitalnog društva koje se sve više okreće bežičnom i mobilnom načinu komunikacije, zabrinutost usled brojnosti bliskih izvora i produženog vremena korišćenja izbija u prvi plan [18].

Trenutni propisi u ovoj oblasti zahtevaju korišćenje određenih metoda za proveru usklađenosti sa osnovnim (bazičnim) ograničenjima i referentnim graničnim nivoima, a ove metode razmatraju odvojeno izloženost koja potiče od zračenja korisničkih uređaja i izloženost koja potiče od zračenja pristupne opreme (baznih stanica). Dalje, ove dve izloženosti ne mogu se direktno porediti jer se za korisničke uređaje usklađenost proverava testiranjem u laboratoriji, dok se izloženost koja potiče od baznih stanica meri na terenu, korišćenjem drugačijih metoda i drugačijih veličina (uglavnom pretpostavljajući najkritičniji slučaj i ekstrapolaciju do maksimalne vrednosti). Na ovaj način teško da se mogu sagledati stvarni doprinosi pojedinih sistema i komponenata i ukupna izloženost u toku nekog perioda i za određene uslove, a što dodatno povećava zabrinutost javnosti. Propisi u oblasti zračenja mobilnih telefona oslanjaju se na vrednosti specifične brzine apsorpcije (SAR: Specific Absorption Rate, [W/kg]) [19]. Mnogi proizvođači mobilnih uređaja nude na svojim internet stranicama informacije o vrednostima SAR za svoje modele [20]. Međutim, ove vrednosti SAR ne odgovaraju stvarnoj izloženosti osobe EM zračenju koje potiče od korisničkog uređaja [21]. SAR je mera apsorpcije energije incidentnog EM talasa u telu i za mobilne uređaje meri se u laboratoriji korišćenjem definisanih procedura, da bi se potvrdila usklađenost sa propisima [22]. Za mobilne telefone prijavljuje se najviša dobijena vrednost. Poređenje telefona po deklariranoj vrednosti SAR može navesti na pogrešne zaključke, jer neka osoba možda nikada neće koristiti telefon u okolnostima i na način za koje je izmeren najviši nivo SAR. Sa druge strane, realni, konkretni uslovi korišćenja određuju tačni, stvarni SAR u toku korišćenja uređaja.

Po pitanju ukupne apsorbovane energije, jasno je da vreme izloženosti igra važnu ulogu. Primljena doza energije definiše se kao SAR u vremenu, [J/kg], odnosno kao energija mikrotalasa apsorbovana po kilogramu mase tela u toku nekog perioda izloženosti [23]. Ova mera je kumulativna, ona uvažava varijacije SAR-a u vremenu i omogućuje poređenje po ukupno apsorbovanoj energiji EM talasa koji potiču od baznih stanica i od korisničkih uređaja [24][25]. U nekim istraživanjima korišćena je i za ocenu subjektivno opaženih efekata različitih trajanja izloženosti EM talasima [26]. Ova mera daje osnovu za ocenu ukupne izloženosti u nekom periodu, kao i za poređenje pojedinih komponenata ukupne izloženosti.

Metoda kojom bismo ocenili stvarnu izloženost osobe ili populacije u nekom području, za stvarno korišćenje, izloženost koja potiče i od korisničkih uređaja i od baznih stanica, korišćenjem merenja snage iz operativne mobilne mreže u realnom vremenu i mrežne statistike u realnom vremenu ili u dužem periodu, uzimajući u obzir korisnikovu dob i navike, stvarne servise i stvarna vremena korišćenja, do sada nije razvijena. U težnji da se pojasni kakva je stvarna, ukupna izloženost od baznih stanica i od korisničkih uređaja, u ovoj disertaciji je razvijena nova metoda za procenu izloženosti koja koristi merenja u stvarnoj mreži u realnom vremenu, kao i druge podatke koji su mogli biti snimljeni u operativnoj mreži, na statistički način, zajedno sa eksternim podacima i merenjima na terenu. Cilj je bio iskoristiti podatke iz mobilne mreže u operativnom radu do maksimalno mogućeg nivoa, uključujući podatke o stvarnim korisnicima i njihovoj upotrebi mobilnih tehnologija pod stvarnim uslovima u mreži.

Nova metrika definisana u ovoj disertaciji za procenu ukupne srednje stvarne izloženosti od baznih stanica (izloženost u dalekom polju ili *downlinku* budući da odgovara silaznom, *downlink* smeru komunikacije) i od korisničkih uređaja (izloženost u bliskom polju ili *uplinku*), za populaciju u nekom području, zasnovana je na srednjoj stvarnoj brzini apsorpcije energije (srednji stvarni SAR)

odnosno na dozi elektromagnetske energije na radio frekvencijama apsorbivane u ljudskom telu. Srednji stvarni SAR predstavlja srednju dozu primljenu u nekom periodu (korišćenja servisa ili ne) podeljenu sa vremenom korišćenja. Više članaka u stručnoj literaturi koji se bave ukupnom izloženošću koristi dozu kako bi se sumirale i uporedile vrednosti izloženosti od baznih stanica i od korisničkih uređaja, ali nijedan od njih nije koristio tako različite i obimne podatke iz operativne mobilne mreže kao metoda koja je definisana u ovoj disertaciji. Koristeći onoliko informacija iz same mreže koliko se moglo prikupiti korišćenjem dostupnih alata, ocenjuju se nivoi snage, uslovi u mreži i radio uslovi, raspodela korisničkih uređaja i ponašanje korisnika. Prema dostupnoj literaturi, ovakva procena izloženosti korišćenjem obimnih i raznolikih podataka ekstrahovanih iz operativne mreže do sada nije izvođena.

Kalkulacija koja je kombinovala izloženost u bliskom i u dalekom polju na bazi srednjeg SAR-a celog tela i SAR-a organa, zasnovana na dozi, predložena je u [24]. Autori su koristili podatke prikupljene ličnim meračima izloženosti od strane određenog broja volontera i numerički su izveli vrednosti SAR kako bi izmerili doprinose pojedinih mobilnih sistema i korisničkih uređaja izloženosti osobe, naglašavajući upotrebu frekvencijski selektivnih podataka o izloženosti u epidemiološkim studijama. Autori [23] kombinovali su komponente izloženosti u bliskom i dalekom polju na osnovu doze, za adolescente učesnike u studiji. Izloženost u bliskom polju procenjena je korišćenjem upitnika i podataka od mobilnog operatora, dok je izloženost u dalekom polju određena modelovanjem propagacije radio talasa i regresivnim modelovanjem, korišćenjem ličnih merenja podgrupe učesnika. Korišćene su vrednosti SAR iz literature. Utvrđeni su i doprinosi različitih bežičnih sistema i korisničkih uređaja prilikom korišćenja tipičnih servisa (prenos govora i podataka). U [25] je procenjen uticaj korišćenja femtoćelije u zatvorenom prostoru (*indoor*) na ukupnu izloženost korisnika mobilnog telefona, opet na osnovu doze, kombinovanjem izloženosti u bliskom i u dalekom polju. Sprovedena su merenja srednje emitovane i primljene snage korisničkog uređaja tokom telefonskog poziva, sa različitim trajanjima poziva prema vrednostima koje se pominju u literaturi, sa mobilnim telefonom. Spektralni analizator je korišćen da se kalibriše relacija između primljene snage signala i gustine snage incidentnog signala u *downlinku* (DL, smer komunikacije od bazne stanice ka korisničkim uređajima) koja je potrebna za procenu izloženosti. Autori [15] izračunali su srednju globalnu izloženost populacije u nekom području tokom razmatranog perioda kroz indeks izloženosti (EI: Exposure Index), korišćenjem simulacija, predikcija iz alata za radio planiranje za nivo snage, realistične statistike o populaciji i podataka o saobraćaju korisnika. Nova metoda definisana u ovoj disertaciji zasnovana je na indeksu izloženosti, ali koristi stvarna merenja snage u mreži, ne predikcije kao u [15], i adaptirana je za merenja i statistiku koji su se mogli izvući iz mreže, za stvarne nivo snage, stvarno korišćene servise i odgovarajuće trajanje korišćenja. U [27] autori su evaluirali ukupnu dozu EM zračenja, od fiksnih antena i od mobilnih uređaja, za određeni broj hipotetičkih topologija mreže, različite scenarije korišćenja i lokacije korisnika. Doza je ekstrapolirana iz merenja snage u 4G mreži i korišćenjem Monte Carlo analize. Studija nije analizirala apsolutne vrednosti, već je diferencirala različite scenarije 5G i zaključila da smanjenje veličine ćelije i razdvajanje pokrivanja *indoor* (u zatvorenom) i *outdoor* (na otvorenom) mogu značajno smanjiti ukupnu dozu, i više od 10 dB.

Nekoliko studija koristilo je mrežna merenja nivoa snage [28][29] da izvede zaključke o srednjim nivoima izloženosti, ali nisu kombinovali izloženost od baznih stanica i od mobilnih telefona, niti su uzimali u obzir stvarne vrednosti SAR za populaciju i način upotrebe mobilnih tehnologija. U najnovijim istraživanjima koja se tiču 5G, fokus je na raspodeli snage u *downlinku* (prostorno-vremenska raspodela predajne snage bazne stanice). Za procenu izloženosti koristi se gustina snage [30][31][32]. U [30] je prezentovan teorijski model za evaluaciju realističnih vremenski usrednjenih maksimalnih nivoa snage za procenu RF izloženosti za 5G bazne stanice koje koriste masivni MIMO. Uzeti su u obzir scenariji sa oblikovanjem snopa i po azimutu i po elevaciji, a utvrđeno je da su maksimalni nivoi prilično ispod teorijskog maksimuma. Cilj je bio da se procene stvarni uslovi maksimalne izloženosti i utvrđeno je da je ključni parametar modela pretpostavka o rasporedu korisnika unutar ćelije. U [33] su autori izveli analitičko modelovanje izloženosti u

downlinku u 5G mrežama sa masivnim MIMO korišćenjem stohastičke geometrije i istakli su da je visoka zavisnost primljene snage od kanala i raspodele mobilnih terminala učinila analizu merenja posebno izazovnom. Autori naglašavaju i da prostorno-vremenska varijacija dijagrama zračenja antena i njihova zavisnost od rasporeda mobilnih terminala i karakteristika kanala čine prelazak na statističke metode procene neophodnim, ako se zahtevaju tačne procene. U [31] su prikupljeni odbirci predajne snage baznih stanica u 5G mreži tokom 24 sata kako bi se okarakterisala stvarna izloženost EM zračenju. Zaključeno je da mrežna merenja snage predstavljaju moćan alat, posebno kada se u mreži koristi oblikovanje snopa i kada se traži prostorna raspodela snage, dok se merenja koja se vrše na terenu mogu koristiti kao dopunska merenja i obezbeđuju direktnu meru tipične EM izloženosti u područjima koja su pristupačna za javnost. U [32], lična izloženost RF EM zračenju evaluirana je korišćenjem ekspozimetara unutar školskih zgrada i napolju, u okruženju. Autori su izrazili izloženost u smislu gustine snage, za frekvencijski opseg WiFi mreže, opsege GSM 900 MHz *downlinka*, Digital Cellular System (DCS) 1800 MHz DL i za UMTS 2100 MHz DL.

Jedan od ciljeva ovog istraživanja bio je da se proceni ukupna izloženost populacije, u *uplinku* (UL, smer komunikacije od korisničkog uređaja ka baznoj stanici) i u *downlinku*, na osnovu primljene doze zračenja, tačnije na osnovu srednjeg stvarnog SAR-a, i da se razvije metoda koja bi iskoristila veliku količinu podataka koji su već prisutni u mreži, uključujući merenja snage (mrežni izveštaji u realnom vremenu), ćelijsku statistiku i podatke o korišćenju (korisnici, njihove navike, servisi koje koriste i vreme korišćenja, korišćeni uređaji), uz merenja na terenu izvršena u realnom vremenu i eksterne podatke. Definisana metoda je demonstrirana poređenjem dve arhitekture stvarne mreže u smislu ukupne srednje stvarne izloženosti populacije. Istaknuto je smanjenje izloženosti prilikom korišćenja manjih ćelija koje veoma zavisi od konkretne topologije i korišćene tehnologije. Metoda je omogućila da se uporede komponente ukupne izloženosti od korisničkih uređaja i od baznih stanica, po tehnologijama, po slojevima (mikro i makro bazne stanice) i u dve zone pokrivanja (mikro i makro). Analiziran je i uticaj korišćenih servisa na izloženost bliskom polju korisničkih uređaja, odnosno izloženost u *uplinku*.

Zatim, ovo istraživanje identifikuje podatke potrebne za precizniju procenu EM izloženosti korišćenjem mreže kao glavnog izvora podataka, sa krajnjim ciljem kreiranja buduće mreže koja bi bila svesna EM izloženosti, koja bi imala način da proceni izloženost populacije i da se samo-optimizuje uzimajući izloženost u obzir kao još jedan ključni pokazatelj performansi (KPI: Key Performance Indicator) [34]. Predloženi su načini za ublažavanje nesigurnosti metode korišćenjem primenjene statistike i sistema koji prikupljaju velike količine podataka iz mreže. Ideja je bila da se prikupe podaci koji su već prisutni u mreži, sa sistema koji prikupljaju podatke u druge svrhe, i da se analiziraju kako bi se izvukli parametri neophodni za procenu izloženosti. Koncept evaluacije EM izloženosti prikazan u ovoj disertaciji zasniva se na SAR-u i može se primeniti u bilo kojoj bežičnoj mreži uz odgovarajuće prikupljanje podataka iz mreže.

2 PREGLED VELIČINA I NORMI KOJIMA SE OGRANIČAVA IZLOŽENOST LJUDI ELEKTROMAGNETSKIM POLJIMA

Standardi kojima se ograničava izloženost EM poljima na radio frekvencijama razvijani su od strane nekoliko organizacija u poslednje tri decenije. U Severnoj Americi i najvećem delu Evrope, ovi standardi zasnivaju se na najnižim nivoima izloženosti na kojima bi se mogli pojaviti potencijalno štetni efekti po ljude. Zatim se primenjuju bezbednosne margine da bi se došlo do preporučenih granica izlaganja za zaštitu stanovništva i zaposlenih u kontrolisanim okruženjima. Nemaju svi standardi odnosno propisi širom sveta iste preporučene granice. Postoje priznati standardi izloženosti koji su zasnovani na ustanovljenim efektima, a postoje i opštinske ili državne smernice koje su zasnovane na socio-ekonomskim razmatranjima. Nivoi izloženosti stanovništva energiji EM talasa koji potiču od radio-komunikacionih sistema tipično su hiljadama puta manji od onih koji su specificirani u standardima izloženosti zasnovanim na zdravstvenim efektima.

Preporuke na kojima se zasniva evropska regulativa su smernice Internacionalne komisije za zaštitu od nejonizujućeg zračenja (ICNIRP: International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection). U frekvencijskom spektru mobilne telefonije, smernice ICNIRP kreću se po intenzitetu električnog polja između 40 V/m i 60 V/m (4,3-10 W/m² gustine snage) [19]. Ove smernice su široko prihvaćene u svetu i čine osnovu nacionalne regulative u velikom broju zemalja. U Americi, osnovu čine preporuke Federal Communications Commission (FCC) [35], American National Standards Institute/Institute of Electrical and Electronics Engineers (ANSI/IEEE) [36], u Kanadi preporuke Health Canada [37], a u Australiji preporuke Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency (ARPANSA) [38].

Lokalne smernice u pogledu RF zračenja najčešće prate percepciju rizika, ne samo utvrđene zdravstvene rizike same po sebi. Tu se često drži principa predostrožnosti. U [38] se pojašnjava princip predostrožnosti kao tehnika upravljanja rizikom i po tom principu se preporučuje da treba minimizovati izloženost koja je nepotrebna ili uzgredna pri postizanju servisnih ciljeva ili procesnih zahteva, pod uslovom da se to odmah može sprovesti uz umeren trošak. Standard ne podržava uvođenje proizvoljnih bezbednosnih faktora osim onih predviđenih granicama izlaganja po standardu i kaže da mere predostrožnosti treba da slede dobru inženjersku praksu. Međutim, ono što podgreva percepciju rizika u ovom slučaju, uticaja EM zračenja mobilne telefonije na zdravlje, jesu kompleksnost tematike, sa komplikovanim uzročno-posledičnim vezama, nesigurnost rezultata, u smislu da će neka izloženost izazvati određene štetne efekte, i njihova dvosmislenost, budući da naučne studije nekad imaju različite rezultate.

2011. godine je Internacionalna agencija za istraživanje kancera, World Health Organization – International Agency for Research on Cancer (WHO/IARC) [39], svrstala radio-frekvencijsko zračenje u grupu 2B – potencijalno kancerogeno za ljude – što je svakako uticalo na porast zabrinutosti stanovništva. Sa druge strane, u istoj grupi je i kofeinska kiselina, ekstrakt aloje vere iz celog lista, izduvni gasovi i mnoštvo drugih supstanci sa kojima smo u svakodnevnom kontaktu.

Kako bi se prevazišli problemi sa zabrinutošću javnosti, potrebno je predočiti ljudima tačne informacije i osnovna saznanja o naučnim stanovištima u datoj oblasti. Jedan od načina na koji se javnost obaveštava i aktivno uključuje u kontrolu EM zračenja jesu mape sa nivoima zračenja na mernim tačkama, nekad i podacima o baznim stanicama, poput onih u Francuskoj (mapa baznih stanica i merenja, [40]), Austriji (mapa stanica, [41]), Belgiji (mapa stanica i simulacija polja, [42]) i u Srbiji (mapa merenja senzora, [43]).

Stroža ograničenja u pogledu EM izloženosti svakako utiču na širenje mobilne mreže i na uvođenje novih tehnologija. Internacionalna unija za telekomunikacije (ITU: International Telecommunication Union), sektor za standardizaciju telekomunikacija (ITU-T), se kroz preporuke serije K bavi izloženošću ljudi elektromagnetskim poljima. ITU-T se u ovoj seriji bavi procedurama za proveru usaglašenosti sa propisima, tehnikama merenja, praćenjem nivoa EM zračenja, ali i pružanjem informacija po pitanju zabrinutosti javnosti [44]. Osnovni cilj preporuke ITU-T K Suppl. 1 jeste da odgovori na pitanja koja se obično postavljaju u javnosti o fenomenu EM polja i da doprinese rešavanju zabrinutosti javnosti po ovom pitanju. Preporuka [45] adresira uticaj graničnih vrednosti za izloženost RF EM polju koje su strože od onih predstavljenih u ICNIRP ili IEEE preporukama na uvođenje 4G i 5G mobilne mreže. U preporuci se konstatuje da su ove granične vrednosti postale kritična tačka zabrinutosti po pitanju daljeg uvođenja bežičnih mreža, posebno u zemljama, regijama i čak gradovima gde su granične vrednosti znatno manje nego u smernicama ICNIRP-a ili IEEE-a. Konstatuju da problem trenutno utiče na nekoliko zemalja, poput Kine, Indije, Poljske, Rusije, Italije i Švajcarske, na regije u Belgiji i gradove poput Pariza. Po pitanju uvođenja 5G u Srbiji, ITU-D Sektor za razvoj telekomunikacija, u dokumentu „5G country profile – Republic of Serbia“ iznetom na Regionalnom forumu za Evropu oktobra 2020. [46], konstatuje da su granice izloženosti definisane nacionalnim Pravilnikom [47] kao referentni granični nivo električnog polja približno dva i po puta strože od ICNIRP preporuka, a da podaci o praćenju RF EM zračenja [43] ukazuju na to da su realne vrednosti znatno manje od dozvoljenih nivoa EM polja i da nigde i nijednom nije zabeleženo prekoračenje graničnih vrednosti.

Na ovom polju se beleži dosta standardizacionih aktivnosti, nove preporuke i pravila doneli su ICNIRP marta 2020. godine, ARPANSA februara 2021. godine, IEEE oktobra 2019. godine, FCC 2020. i 2021. godine. Revizijom nisu menjane granične vrednosti, ali su proširivani frekvencijski opsezi na koje se primenjuju, menjano je vreme usrednjavanja, revidovana su pravila u vezi sa proverama usklađenosti. Posebno su razmotrene veličine preko kojih se ograničava izloženost na višim frekvencijama, zbog novih tehnologija, pre svega 5G.

Imajući u vidu da stroža ograničenja usporavaju razvoj i implementaciju mobilnih sistema, važno je oceniti kolika je realna izloženost, a ne samo maksimalne vrednosti, pa se dosta članaka u stručnoj literaturi bavi ocenom stvarne izloženosti u uslovima oblikovanja snopa (*beamforming*) i masivnog MIMO [30][31][32].

2.1 Frekvencijski opsezi i zračenje

U Evropi i u našoj zemlji, tradicionalno korišćeni opsezi za mobilne mreže su 900 MHz, 1800 MHz, 2100 MHz. Sa uvođenjem principa tehnološke neutralnosti, bilo koja od mobilnih tehnologija (2G, 3G, 4G) može da koristi bilo koji opseg opredeljen za mobilne komunikacije. Sa uvođenjem 4G aktuelan je postao opseg 2600 MHz. Ukidanjem analogne televizije postao je dostupan opseg tzv. digitalne dividende, 800 MHz, i dodeljen je mobilnim operatorima. Opsezi 3400-3600 MHz koristili su se za fiksnu bežičnu mrežu (FWA: Fixed Wireless Access) i WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access), a interesantni su i za 5G NR (New Radio). Opseg 450 MHz koristi se za fiksnu bežičnu mrežu zasnovanu na CDMA (Code-Division Multiple Access) standardu. Opsezi 2,4 GHz i 5 GHz koriste se za WLAN (Wireless Local Area Network) mreže. U Evropi se za 5G NR takođe upotrebljava opseg na 26 GHz. Širom sveta koriste se i drugi opsezi, neke zemlje umesto GSM i UMTS sistema koriste IS-95 (Interim Standard 95), odnosno cdmaOne, i CDMA2000 sisteme. U svakom slučaju, korišćene frekvencije za bežične sisteme komunikacija kreću se u opsezima od 400 MHz do 28 GHz. Prelazak na više frekvencije uslovljen je potrebom za sve većim protocima odnosno sve širim spektrom koji se koristi, kao i napretkom tehnologije koja omogućuje rad u višim opsezima, gde je signal osetljiviji na uticaje okoline.

Elektromagnetsko zračenje koje potiče od mobilnih komunikacionih sistema je nejonizujuće zračenje. Bežični komunikacioni sistemi rade u opsegu radio frekvencija, a elektromagnetsko zračenje u ovom opsegu spada u nejonizujuće zračenje. Radio-frekvencijsko elektromagnetsko zračenje je ono na frekvencijama 100 kHz – 300 GHz. Na višim frekvencijama nalaze se infracrveno zračenje, vidljiva svetlost i ultravioletno (UV) zračenje, a tek „duboki“ UV opsezi spadaju u jonizujuće zračenje, koje ima dovoljnu energiju fotona da jonizuje atome i molekule.

Preporuke u vezi sa izloženošću zasnovane su na hiljadama naučnih radova koji su se bavili biološkim uticajima EM polja na ljude. Energija koju nosi nejonizujuće zračenje nije dovoljna da raskine veze među atomima, za razliku od jonizujućeg zračenja. Međutim, i ovo elektromagnetsko zračenje može imati određene biološke efekte. U opsezima radio frekvencija (30 Hz – 300 GHz) uočeni su efekti zagrevanja tkiva (termički efekti), kao i efekti mišićne i nervne stimulacije. Na frekvencijama između 3 kHz i 100 kHz dominira efekat nervne stimulacije, a na frekvencijama od 10 MHz do 300 GHz preovlađuje efekat zagrevanja tkiva, dok se u opsegu između 100 kHz i 10 MHz uočavaju oba efekta [19].

Pregled korišćenih opsega za mobilne komunikacije u Srbiji, na tehnološki neutralnoj osnovi, dat je u tabeli 2.1.

Tabela 2.1 Frekvencijski opsezi koje koriste mobilni operatori u Srbiji (izvor: Republička agencija za telekomunikacije, RATEL [48])

	Uplink (MHz)	Downlink (MHz)	Upotrebljena tehnologija
Telekom Srbija	832-842	791-801	LTE
	894,5-904,1	939,5-949,1	GSM, UMTS
	1730-1750	1825-1845	GSM, LTE
	1935-1950	2125-2140	UMTS, LTE
		1905-1910	Ne koristi
Telenor	842-852	801-811	LTE
	904,3-913,9	949,3-958,9	GSM, UMTS
	1710-1730	1805-1825	GSM, LTE
	1920-1935	2110-2125	UMTS, LTE
		1900-1905	Ne koristi
A1 Srbija	852-862	811-821	LTE
	890,1-894,3	935,1-939,3	GSM, UMTS
	1750-1780	1845-1875	GSM, LTE
	1950-1965	2140-2155	UMTS, LTE
		1910-1915	Ne koristi

2.2 Specifična brzina apsorpcije (SAR)

Specifična brzina apsorpcije, SAR, je jedna od osnovnih dozimetrijskih veličina. Ona govori o brzini apsorpcije energije EM talasa u telu, po kilogramu mase, i u direktnoj je vezi sa biološkim efektima izlaganja EM talasima, konkretno sa zagrevanjem tkiva. Dozimetrija je disciplina koja određuje odnos između veličina spoljne izloženosti i veličina interne doze i brzine doze. Veličine spoljne izloženosti uključuju električno polje, magnetsko polje i elektromagnetsko polje (incidentnu gustinu snage), a interne veličine obuhvataju električno polje *in situ*, dozu, brzinu doze, specifičnu apsorpciju, specifičnu brzinu apsorpcije i epitelijalnu gustinu snage. Tačna dozimetrija je ključna za razumevanje bioloških efekata, gde čak i uniformna izloženost ima za posledicu neuniformnu

apsorpciju energije EM talasa. Numeričke metode kalkulacije koje koriste metodu konačnih razlika u vremenskom domenu (FDTD: Finite Difference Time Domain) za procenu električnog polja *in-situ* i SAR-a rešavaju RF polja na milimetarskom nivou korišćenjem preciznih anatomskih modela na osnovu MRI (Magnetic Resonance Imaging) slika visoke rezolucije. Dozimetrijske kalkulacije uspostavljaju vezu između izloženosti spoljnim poljima i električnog polja *in situ*, SAR-a i gustine struje, a to su veličine koje su u direktnoj vezi sa uticajem EM polja na zdravlje, a ne mogu se direktno meriti. Dodatni faktori koji mogu biti važni za ocenu bioloških efekata su spektralni sadržaj signala, vremenski i prostorni obrasci, kao i polarizacija.

2.2.1 Definicija

Specifična brzina apsorpcije, SAR, je mera brzine apsorpcije energije elektromagnetskog talasa u ljudskom telu u vatima po kilogramu [W/kg]. SAR u nekoj tački jednak je:

$$SAR = \frac{\sigma |E|^2}{\rho} \quad (2.1)$$

gde σ predstavlja provodljivost [S/m], $|E|$ intenzitet električnog polja [V/m], a ρ gustinu mase [kg/m³]. Specifična apsorpcija (SA: Specific Absorption) energije predstavlja energiju apsorbovanu po jedinici mase tkiva [J/kg], a izračunava se kao vremenski integral specifične brzine apsorpcije.

Specifična brzina apsorpcije može se usrednjiti kao veličina u nekom vremenu i u nekom volumenu tkiva. Na osnovu prostornog usrednjavanja, razlikujemo SAR usrednjen za celo telo i lokalizovani SAR, usrednjen po nekoj manjoj jedinici volumena odnosno mase tela. Ta manja jedinica mase je obično 10 g tkiva ili 1 g tkiva. SAR za različita tkiva i organe se razlikuje, usled njihovih različitih dielektričnih karakteristika odnosno različite strukture, gustine i provodljivosti. SAR zavisi od frekvencije EM talasa na način da sa porastom frekvencije opada. SAR je rasprostranjena mera kojom se kvantifikuju nepovoljni termički efekti izlaganja radio frekvencijama.

2.2.2 SAR za celo telo

SAR usrednjen po celom telu (wb(a)SAR: whole-body averaged SAR) je osnova bazičnih ograničenja za izloženost. Na osnovu naučnih radova i preporuka, uzima se da je granična izloženost ona koja izaziva porast temperature tela od 1°C, a odgovara vrednosti SAR-a uprosečene po celom telu od 4 W/kg.

Jasno je da se SAR za celo telo ne može direktno meriti u živoj osobi, te se za njegovo određivanje koriste numeričke metode, korišćenjem razvijenih modela ljudskog tela. Jedan od predloženih načina za ekperimentalno određivanje wbSAR-a u zatvorenim prostorijama jeste merenjem vremena reverberacije sa i bez ljudi u prostoriji [49], što je metoda zasnovana na elektromagnetskoj teoriji sobe.

wbSAR se prostorno usrednjuje po masi tela, te odgovara odnosu ukupno apsorbovane snage u telu i mase tela. Ovo usrednjavanje po masi se takođe koristi za izračunavanje vršnog prostorno usrednjenog SAR-a [50].

2.2.3 Vršni prostorno usrednjeni SAR

Smernice po pitanju izloženosti ne ograničavaju samo apsorpciju EM energije u celom telu, već i lokalizovanu apsorpciju. Vršni prostorno usrednjeni SAR (ps(a)SAR: peak spatial averaged SAR) podrazumeva usrednjavanje preko mase tkiva, tipično 1g ili 10g, obično u obliku kocke, i uzimanje vršne vrednosti zabeležene takvim usrednjavanjem za neki deo tela poput glave, trupa, ekstremiteta. Ovaj lokalizovani SAR koristi se za ograničavanje izloženosti pojedinih delova tela.

Lokalizovani SAR može se oceniti numeričkim metodama i laboratorijskim merenjima. Ocenjivanje usklađenosti sa propisima za mobilne uređaje može se raditi samo u specijalizovanim laboratorijama opremljenim dozimetrijskim mernim uređajima, konkretno dozimetrijskom sondom (kalibrisanom za merenje električnog polja u tečnosti koja simulira tkivo), fantomom ispunjenim tečnošću koja simulira tkivo i robotom koji pomera sondu u tečnosti. Tokom testiranja radi usklađenosti, mobilni uređaji rade u testnom modu i zrače maksimalnom snagom. SAR koji se prijavljuje predstavlja maksimalno zabeleženu vrednost. Sertifikacija mobilnih telefona zahteva merenja, dok se numeričke metode poput FDTD tehnike koriste za istraživanja i karakterizaciju lokalizovanog SAR-a u realističnim modelima ljudskog tela pod različitim uslovima izloženosti.

2.2.4 Usrednjeni SAR specifičan za organ

SAR usrednjen za specifičan organ (osaSAR: organ-specific averaged SAR) definiše se kao srednja vrednost po masi određenog organa ili tkiva u ljudskom telu i koristi se za proučavanje lokalizacije apsorpcije elektromagnetskih polja u telu. Ocenjuje se numeričkim simulacijama.

2.2.5 Doza

Doza uzima u obzir i vreme izloženosti i predstavlja snagu apsorbovanu po kilogramu mase u nekom vremenu (t), odnosno ukupnu stvarno apsorbovanu energiju po kilogramu mase u tom periodu (2.2):

$$Doza = SAR * t \quad [\text{J/kg}] \quad (2.2)$$

Stvarno apsorbovana doza [J/kg] u periodu posmatranja T [s] dobija se množenjem $wbaSAR$ ili $psaSAR$ [W/kg] sa vremenom izloženosti, T [s]. Korišćenje doze za metriku izloženosti ima prednost u tome da se izloženost (za celo telo) od mobilnih uređaja i od baznih stanica/pristupnih tačaka mogu sabrati i porediti za različite scenarije.

2.3 Pregled propisa

Međunarodne preporuke i propisi definišu dve vrste ograničenja – bazična ograničenja i referentne granične nivoe. Bazična ograničenja [19] su ograničenja povezana sa uočenim biološkim efektima u pojedinim frekvencijskim opsezima, pa se i veličine preko kojih se iskazuju biraju na osnovu ovih efekata. U opsegu od 1 Hz do 10 MHz [19] bazična ograničenja su izražena preko gustine struje da bi se sprečili nepoželjni efekti na funkcije nervnog sistema. Pored nervne stimulacije, uočeni su efekti promene permeabilnosti membrane ćelije kod izlaganja impulsnim signalima nižih frekvencija [51], ali postavljene granice su dovoljne da spreče ove efekte. Na frekvencijama od 100 kHz do 10 GHz [19], osnovna ograničenja SAR-a primenjuju se bi se sprečilo zagrevanje celog tela i prekomerno lokalno zagrevanje tkiva. U opsegu od 100 kHz do 10 MHz ograničenja se odnose i na gustinu struje i na SAR [19]. Između 10 GHz i 300 GHz, osnovna ograničenja data su za gustinu snage da bi se sprečilo prekomerno zagrevanje tkiva blizu površine tela [19]. Novim smernicama je granična frekvencija od 10 MHz spuštena na 6 MHz, a SAR se ograničava u kompletnom frekvencijskom opsegu do 300 GHz [51], o čemu će biti reči u nastavku. Kod viših frekvencija, preko 6 GHz, penetracija talasa u telo se znatno smanjuje. Preko 85% energije talasa na 6 GHz i na 300 GHz apsorbuje se unutar 8 mm i 0,2 mm površine tela respektivno [51].

Na frekvencijama mobilnih komunikacionih sistema dominira toplotni efekat izlaganja EM talasima. ICNIRP je usvojio konzervativnu vrednost srednjeg SAR-a od 4 W/kg usrednjenog preko 30 minuta u celom telu kao nivo izloženosti RF EM polju koji odgovara porastu temperature jezgra tela za 1°C [19][51]. Ovu vrednost usvaja i FCC [35].

Granice izlaganja EM zračenju u radio-frekvencijskim opsezima postavljene su tako da postoji sigurnosna margina do onih nivoa na kojima su uočeni i najmanji biološki efekti. Preporuke razlikuju izlaganje opšte populacije odnosno izlaganje u nekontrolisanim uslovima i izlaganje tehničkog osoblja odnosno izlaganje u kontrolisanim uslovima. Postavljena je granica izlaganja tehničkog osoblja kao 10 puta niža vrednost SAR-a od onog potrebnog za zagrevanje tela za 1°C, tj. 0,4 W/kg usrednjen za celo telo i u 30 minuta, dok se za izlaganje stanovništva primenjuje i dodatni faktor 5, tako da je granica izloženosti 0,08 W/kg. Sličan princip primenjuje se i za lokalizovanu izloženost glave, trupa, udova. U ovoj disertaciji biće reči o izloženosti stanovništva, pa je u nastavku dat pregled normi za izloženost opšte populacije.

Usklađenost sa bazičnim ograničenjima proverava se laboratorijski ili numeričkim simulacijama. Budući da se radi o nivoima izloženosti unutar ljudskog tela, ne mogu se direktno meriti. Da bi se omogućila jednostavnija provera usklađenosti sa ograničenjima putem merenja na terenu, izvedeni su referentni granični nivoi – usklađenost sa referentnim graničnim nivoom garantuje da bazična ograničenja neće biti premašena. Za svaku veličinu preko koje je definisana granična izloženost (električno polje ili E-polje, magnetsko polje ili H-polje, SAR) i uslovi prostornog i vremenskog usrednjavanja, mora se zadovoljiti ili bazično ograničenje ili odgovarajući referentni granični nivo.

2.3.1 ICNIRP preporuke

Internacionalna komisija za zaštitu od nejonizujućeg zračenja, ICNIRP, donela je 1998. godine Smernice za ograničenje izloženosti vremenski promenljivim električnim, magnetskim i elektromagnetskim poljima (do 300 GHz) [19]. Ove preporuke definišu osnovna ograničenja za vremenski promenljiva električna i magnetska polja, i to za izloženost tehničkih lica i za izloženost opšte populacije. U opsezima do 10 GHz osnovna ograničenja su izražena u veličinama: gustine struje za glavu i trup [mA/m^2] (RMS: *root mean square* odnosno efektivna vrednost), SAR usrednjen za celo telo [W/kg], lokalizovan SAR (na glavu i telo) [W/kg] i lokalizovan SAR (na udove) [W/kg]. U opsezima 10 MHz – 10 GHz za opštu populaciju primenjuju se vrednosti 0,08 W/kg za SAR celog tela, 2 W/kg za SAR lokalizovan na glavu i telo i 4 W/kg za SAR lokalizovan na udove. Definisan je 6-minutni period usrednjavanja za SAR. Lokalizovani SAR se usrednjava preko bilo kojih 10 g tkiva, a prijavljuje se maksimalno dobijena vrednost. Bazično ograničenje preko 10 GHz izražava se preko gustine snage i iznosi 10 W/m² za opštu populaciju. Gde je to svrsishodno, iz bazičnih ograničenja su dobijeni referentni granični nivoi kroz matematičko modelovanje i ekstrapolaciju iz rezultata laboratorijskih ispitivanja na određenim frekvencijama. Referentni granični nivoi odnose se na prostorno usrednjavanje preko celog tela izloženog pojedinca, uz bitan uslov da se bazična ograničenja lokalizovane izloženosti ne pređu.

ICNIRP preporuke za opsege od interesa za ovo istraživanje su dalje inovirane 2020 [51]. Između ostalog, uvedene su nove restrikcije da bi se uvažile situacije u kojima preporuke ICNIRP iz 1998. godine ne bi adekvatno uzele u obzir aspekte novih tehnologija, poput 5G tehnologije. Glavna ograničenja specificirana u prethodnim ICNIRP smernicama iz 1998. godine obezbeđuju zaštitu od štetnih efekata po zdravlje od tehnologija koje emituju RF EM zračenje na način kako se to danas čini. Glavna ograničenja stoga ostaju zaštitna i uglavnom su zadržana u novim preporukama. Neke manje izmene su uvedene da bi se poboljšala preciznost, ali budući da su razlike male u odnosu na već veoma konzervativna ograničenja, ove male izmene nemaju znatniji uticaj na zaštitu zdravlja od trenutno postojećih uređaja koji emituju RF EM polje.

U ICNIRP 2020 postoje dva nova ograničenja koja pojačavaju zaštitu. Prvo se odnosi na razvoj tehnologija koje koriste frekvencije preko 6 GHz, poput 5G, sa novim ograničenjima da bi se bolje zaštitilo od porasta temperature u telu. Drugo se odnosi na kratkotrajnu izloženost RF EM polju (manje od 6 minuta), da bi se sprečilo da tranzijentni porast temperature uzrokuje bol ili da na štetan način utiče na tkivo – iako su preporuke ICNIRP 1998 imale ograničenje za kratkotrajno (oko 50 ms)

impulsno RF EM polje u odnosu na glavu, trenutne smernice obezbeđuju zaštitu za trajanje izloženosti do 6 minuta i u odnosu na celo telo. Ovo novo ograničenje bi trebalo da obezbedi da i novo, odnosno buduće korišćenje tehnologije ne utiče štetno na zdravlje. Preporuke, dakle, uvažavaju i stabilan rast temperature i kratke skokove temperature.

Po pitanju bazičnih ograničenja, ograničenje izloženosti celog tela postavljeno je prema veličini SAR, isto kao u ICNIRP 1998, ali dok se u verziji iz 1998. ovo ograničenje primenjivalo do 10 GHz, u verziji iz 2020. se primenjuje preko celog opsega od 100 kHz do 300 GHz. Ovo treba da obezbedi da izloženost od novih tehnologija ne dovede do prekomernog rasta temperature duboko u telu. Vreme usrednjavanja za ovo ograničenje je promenjeno sa 6 minuta na 30 minuta, da bi više odgovaralo vremenu koje je potrebno da u unutrašnjosti tela poraste temperatura. Vrednosti bazičnih ograničenja nisu menjane jer je istraživanje pokazalo da su čak stroža nego što se u početku mislilo. Kao nivo izloženosti na kojem temperatura u telu poraste za 1 stepen Celzijusa uzeta je EM izloženost od 4 W/kg, usrednjeno na 30 minuta. Pri višim frekvencijama, iznad 6 GHz, energija se apsorbuje sve više površinski, pa je i porast temperature veći na površini tela. Međutim, s obzirom na prokrvljenost, ova toplota se brzo širi i stiže do svih delova tela, tako da nije bez razloga frekvencijski opseg za koji važi ograničenje po SAR-u, koje se tiče toplotnih efekata unutar tela, povećan i iznad 6 GHz tj. za ceo opseg do 300 GHz.

U preporukama ICNIRP 1998 se koristio SAR do 10 GHz, a gustina snage za frekvencije preko 10 GHz, a frekvencija na kojoj se menja veličina zvala se tranziciona frekvencija. Različite veličine se koriste jer SAR može da potceni površinsku izloženost na višim frekvencijama, dok gustina snage može da potceni dublju izloženost na nižim frekvencijama. Premda ne postoji idealna tranziciona frekvencija, ICNIRP je u verziji 2020 prihvatio pragmatičan pristup i smanjio je tranzicionu frekvenciju sa 10 GHz na 6 GHz, jer obezbeđuje najtačniji račun u odnosu na celokupnu izloženost.

Obe preporuke za zaštitu od prekomernog lokalnog zagrevanja koriste isto bazično ograničenje SAR-a usrednjenog u 6 minuta. ICNIRP 1998 zahteva da se SAR uprosečuje preko 10 g neprekinutog tkiva, ICNIRP 2020 zahteva usrednjavanje po 10 g kubičnog regiona, u opsegu do tranzicione frekvencije (manje od 6 GHz). Promena u prostornom usrednjavanju je data da bi se obezbedila bolja aproksimacija rasta temperature. Preko 6 GHz, ICNIRP 1998 je koristio „gustinu incidentne snage“, dok ICNIRP 2020 koristi i veličinu „gustina apsorbovane snage“, jer se i do 50% incidentne snage reflektuje, a apsorbovana snaga predstavlja meru izloženosti.

Po pitanju referentnih graničnih nivoa, ICNIRP 1998 je dao referentne nivoe za kontinualnu izloženost celog tela. Ovi nivoi su relevantni upravo za merenje RF EM emisije od uređaja poput baznih stanica mobilne telefonije. Ovi referentni nivoi ipak nisu pokrili sve tipove bazičnih ograničenja. ICNIRP 2020 obezbeđuje referentne nivoe za sva bazična ograničenja, što omogućuje da se usklađenost sa svim bazičnim ograničenjima lakše ispituje. Međutim, usled kompleksnosti razlikovanja bliskog i dalekog polja, i dalje će biti situacija kada nije moguće koristiti referentne nivoe.

Postavljena su različita pravila primene referentnih graničnih nivoa za izloženost u dalekom polju, u radijativnom bliskom polju i u reaktivnom bliskom polju. Namera ICNIRP-a bila je da diferencijacijom ovih zona obezbedi da referentni nivoi budu konzervativniji od bazičnih ograničenja. Razlikovanje ovih zona najviše je uslovljeno stepenom u kojem polje aproksimira uslove ravnog talasa. U principu, tamo gde postoji veća nesigurnost kod merenja veličina preko kojih su definisani referentni nivoi, oni treba da budu primenjeni strože. Definicija zona je data kao vodič, da unapredi primenu procedura za procenu referentnih nivoa. U svakom slučaju, potrebno je vreme da se izmene date u smernicama ICNIRP 2020 implementiraju kroz nacionalne regulative.

Za kraća izlaganja, u opsegu od 100 kHz do 300 GHz, za intervale integraljenja od 0 do 6 minuta, izloženost je ograničena veličinama specifične apsorbacije [kJ/kg] i to lokalizovane na glavu i trup i lokalizovane na udove, kao i veličinom lokalizovane gustine energije [kJ/m²]. Granične

vrednosti se određuju formulama koje zavise od vremena izlaganja i vrede za sve vrednosti između 0 i 6 minuta bez obzira na vremenske karakteristike izloženosti. Lokalizovana specifična apsorpcija se usrednjuje preko kubične mase od 10 g, a lokalizovana gustina energije preko kvadrata od 4 cm² površine tela, uz dodatno ograničenje preko 30 GHz koje podrazumeva usrednjavanje po 1 cm².

Za duže izlaganje, 6 minuta i više, za opštu populaciju, važi ograničenje za SAR za celo telo od 0,08 W/kg u opsegu od 100 kHz do 6 GHz, zatim ograničenja lokalizovanog SAR-a za glavu i telo od 2 W/kg i lokalizovanog SAR-a za udove od 4 W/kg u opsegu od 100 kHz do 6 GHz, dok preko 6 GHz pored ograničenja SAR-a za celo telo važi i ograničenje po lokalizovanog gustini snage od 20 W/kg. SAR za celo telo se usrednjava preko 30 minuta, a lokalizovani SAR u 6 minuta i preko kubične mase od 10 g. Lokalizovana gustina snage se usrednjuje preko kvadrata od 4 cm² površine tela, dok preko 30 GHz važi dodatno ograničenje tako da izloženost preko 1 cm² površine tela ne sme preći dvostruku vrednost ograničenja za 4 cm².

Po pitanju referentnih graničnih nivoa, usrednjavanje se vrši na 30 minuta i preko celog tela (RMS vrednosti), važe ograničenja po nivou incidentnog električnog polja, incidentnog magnetskog polja i incidentne gustine snage. Na 900 MHz, važi ograničenje od 41,25 V/m za električno polje, 0,111 A/m za magnetsko polje i 4,5 W/m² za gustinu snage.

2.3.2 Propisi Evropske unije

U okviru Evropske unije važeća preporuka po pitanju izloženosti EM zračenju je preporuka Saveta Evrope 1999/519/EC o ograničavanju izloženosti opšte populacije elektromagnetskim poljima (od 0 Hz do 300 GHz) [52]. Ova preporuka uvažava granice postavljene kroz preporuke ICNIRP 1998 i usvojena je kroz nacionalnu regulativu većine zemalja članica. Ova preporuka nije obavezujuća, već zemljama članicama sugerise da uvedu ove granice uzimajući u obzir troškove i dobrobiti, posebno tamo gde je vreme izloženosti značajno. Svaka zemlja članica može za sebe da propiše i drugačije granice. Ova preporuka odnosi se na opštu populaciju, dok se za takozvanu okupacionu izloženost, odnosno za tehničko osoblje, primenjuje druga direktiva [53]. Direktive se, dakle, ne primenjuju direktno, već svaka članica mora da ih sprovede kroz svoj pravni okvir.

Na primer, u Francuskoj je izloženost javnosti EM zračenju regulisana dekretom broj 2002-775 od 3. maja 2002. [54], koji usvaja preporuke Saveta Evrope o izloženosti građana EM zračenju. Neki gradovi poput Pariza usvojili su specifične povelje o instalaciji baznih stanica koje definišu srednje nivoe izloženosti građana koje su strože od preporuka.

Neki od primera strožih graničnih vrednosti u frekvencijskom opsegu mobilne telefonije su one u Italiji, Švajcarskoj, Belgiji (flamanski region posebno), Parizu, Salzburgu. Na primer, u Italiji je primena tzv. principa predostrožnosti ozvaničena državnim dekretom br. 381 iz septembra 1998 [55], gde je postavljena restriktivna granica za intenzitet električnog polja za opštu populaciju od 6 V/m, nezavisno od opsega, za usrednjavanje u bilo kom 6-minutnom periodu, za zone u kojima se boravi više od četiri sata. Regija Lazio donela je 2001. propis kojim se električno polje ograničava na 3 V/m [56], a 2019. je regionalni administrativni sud u Laciju (TAR Lazio) naložio ministarstvima za zaštitu životne sredine, za zdravlje i za obrazovanje da naprave kampanju kojom bi se javnosti pružile informacije o zdravstvenim rizicima usled upotrebe mobilnih i bežičnih telefona. Grad Pariz je 2003. doneo Povelju kojom je ograničio električno polje na 7 V/m (ekvivalent na 900 MHz) u zatvorenim životnim prostorima, a zatim je poveljom iz 2017. smanjio ovu granicu na 5 V/m [57]. U Švajcarskoj se propisom ograničava efektivna vrednost intenziteta električnog polja prilikom instalacije na 4-6 V/m, pri maksimumu snage predajnika [58]. U Belgiji svaki region propisuje svoje granice izlaganja EM zračenju. U regiji prestonice Brisela, 2007. je predložena granica od 3 V/m na 900 MHz za sve lokacije [59], u okviru regulative za opseg od 100 kHz do 300 GHz, ali je 2014. korigovana na 6 V/m za referentnu frekvenciju od 900 MHz [60]. U flamanskom regionu, u okviru regulative za opseg od 10 MHz do 10 GHz, od 2011. važi ograničenje za kumulativnu izloženost na 900 MHz od 20,6 V/m i dodatno ograničenje od 3 V/m po anteni u zatvorenom prostoru, u školama uključujući i igrališta

[61]. Srbija takođe ima neke granične vrednosti strože u odnosu na ICNIRP preporuke [47]. Pored samog ograničenja, važno je obratiti pažnju na to na koje slučajeve se odnosi i kako se meri, da bi se vršila poređenja.

2.3.3 IEEE

IEEE standard koji definiše granice izlaganja ljudi RF EM poljima u opsegu od 3 kHz do 300 GHz je IEEE C95.1. Začetak ovog standarda bio je standard ANSI C95.1-1966, zasnovan na jednostavnim termalnim modelima, za opseg od 10 MHz do 100 GHz, sa graničnom vrednošću gustine snage od 10 mW/cm^2 . Usledile su verzije iz 1974. i 1982, a zatim standard IEEE C95.1-1991 koji prvi uvodi segmentaciju populacije na dva sloja: populacija u kontrolisanom okruženju (okruženje koje zahteva kontrolu RF EM izloženosti) i populacija u nekontrolisanom okruženju (gde se smatra da nisu potrebne kontrole).

Standard IEEE C95.1-2005 [36], koji ustanovljava granice izlaganja u opsegu 3 kHz – 300 GHz, predstavlja temeljnu reviziju prethodnih verzija iz 1991. odnosno 1999. U opsegu od 100 kHz do 3 GHz za opštu populaciju je bazično ograničenje za SAR celog tela $0,08 \text{ W/kg}$, uz period usrednjavanja od 6 minuta za opseg od 100 kHz do 1340 kHz, 30 minuta od 3 MHz do 3 GHz i period između 6 i 30 minuta, po formuli, za frekvencije između 1340 kHz i 3 MHz. Bazično ograničenje za lokalizovanu izloženost (vršna prostorno usrednjena vrednost) je 2 W/kg , usrednjeno preko 10 g tkiva (definisano kao volumen tkiva u obliku kockice), bilo kojih za taj deo tela, a ograničenje za lokalizovanu izloženost za ekstremitete i spoljni deo uha je 4 W/kg , pri čemu se u ekstremitete ubrajaju delovi ruku i nogu dalje od lakta odnosno kolena. U opsegu preko 3 GHz (do 300 GHz), bazična ograničenja jednaka su takozvanim maksimalnim dozvoljenim nivoima izloženosti. Maksimalan dozvoljeni nivo izloženosti se do 400 MHz izražava u vidu intenziteta električnog i magnetskog polja kao i gustine snage, dok se za više frekvencije izražava preko gustine snage. Na 900 MHz, za opštu populaciju, maksimalna dozvoljena izloženost u smislu gustine snage iznosi $4,5 \text{ W/m}^2$, uz period usrednjavanja od 30 minuta, od 2 GHz do 5 GHz je 10 W/m^2 uz period usrednjavanja od 30 minuta, dok je od 5 GHz do 100 GHz takođe 10 W/m^2 , ali uz period usrednjavanja koji se smanjuje za više frekvencije po formuli.

Najnovija verzija ovog standarda je IEEE C95.1-2019 [62] i on uvodi pojam dozimetrijskog referentnog nivoa (DRL: dosimetric reference level), kao granice izlaganja zasnovane na dozimetrijskim pragovima za ustanovljene štetne zdravstvene efekte izražene kao intenzitet električnog polja *in situ* (0-5 MHz), SAR (100 kHz – 6 GHz) ili epitelijalna gustina snage (6 GHz – 300 GHz). Ovaj standard termin „ekstremiteti“ zamenjuje terminom „udovi“; koji obuhvata cele ruke i noge. U opsegu od 100 kHz do 6 GHz, DRL granice za osobe u nerestriktivnim okruženjima su SAR za celo telo od $0,08 \text{ W/kg}$ (usrednjen na 30 minuta), lokalizovani SAR za glavu i torzo od 2 W/kg i lokalizovani SAR za udove i spoljni deo uveta od 4 W/kg (oba usrednjena na 6 minuta i preko bilo kojih 10 g tkiva, definisanog u formi kockice). Od 6 GHz do 300 GHz, DRL za lokalnu izloženost izražava se preko epitelijalne gustine snage i za osobe u nerestriktivnom okruženju iznosi 20 W/m^2 , pri čemu se usrednjuje po površini tela, na 6 minuta, preko bilo kojih 4 cm^2 površine tela (definisanih u obliku kvadrata) na frekvencijama između 6 GHz i 300 GHz. Ukoliko je izloženo područje tela malo (manje od 1 cm^2), za frekvencije preko 30 GHz, može se premašiti definisana granica sa faktorom 2 uz usrednjavanje po 1 cm^2 . Referentni nivoi izloženosti (ERL: exposure reference limit) su u opsegu od 400 MHz do 300 GHz izraženi u smislu gustine snage sa periodom usrednjavanja od 30 minuta, a iznose od 2 W/m^2 do 10 W/m^2 u opsegu od 400 MHz do 2 GHz, a za frekvencije preko 2 GHz iznose 10 W/m^2 .

2.3.4 FCC

U Sjedinjenim Američkim Državama je Federalna komisija za komunikacije, FCC, definisala 1997. granične vrednosti izloženosti [35] koje uz određene revizije praktično važe i danas.

Granične vrednosti za maksimalnu dopustivu izloženost (MPE: Maximum Permissible Exposure), za opštu populaciju odnosno nekontrolisanu izloženost, u opsegu od 300 MHz do 1,5 GHz date su formulom preko gustine snage sa periodom usrednjavanja od 30 minuta, tako da na 900 MHz granica iznosi $0,6 \text{ mW/cm}^2$. Od 1,5 GHz do 100 GHz granica gustine snage je 1 mW/cm^2 , sa periodom usrednjavanja od 30 minuta.

Za prenosive uređaje granične vrednosti za opštu populaciju odnosno nekontrolisanu izloženost izražavaju se preko SAR-a usrednjenog za celo telo od $0,08 \text{ W/kg}$ i prostornog vršnog SAR-a koji ne premašuje $1,6 \text{ W/kg}$ usrednjeno preko bilo koje mase od 1 g tkiva (definisano kao volumen tkiva u obliku kockice). Izuzeci su ruke, ručni zglobovi, stopala i članci, gde prostorni vršni SAR ne sme da pređe 4 W/kg usrednjeno preko bilo koje mase od 10 g tkiva (definisano kao volumen tkiva u obliku kockice). Ove granice važe do frekvencije od 6 GHz, a preko te frekvencije primenjuju se granice za maksimalnu dopustivu izloženost (MPE), izražene preko gustine snage.

FCC je 2013. [63] izvršila ponovnu procenu granica izloženosti RF EM poljima i pravila u vezi sa izloženošću. U toj reviziji je, između ostalog, spoljni deo uha definisan kao ekstremitet na koji se primenjuje granična vrednost, za opštu populaciju, vršnog prostornog SAR-a od maksimalno 4 W/kg sa usrednjavanjem preko 10g tkiva. Takođe se definiše da za proveru usklađenosti usrednjavanje izloženosti (SAR-a) ne treba da pređe 30 minuta. Granične vrednosti i period usrednjavanja za veličine koje definišu MPE ostale su iste. 2020. godine FCC donosi novu reviziju [64] gde se izmene mahom tiču procedura ocene usaglašenosti. Vreme usrednjavanja za veličine koje definišu MPE ne treba da pređe definisane vrednosti (iste kao prethodno). [65] donosi rok efektivnosti pravila objavljenih 2020. godine.

2.3.5 Health Canada Safety Code 6

U Kanadi je institucija Health Canada izdala 1999. propis Safety Code 6 [37], koji je dalje obnavljan u više navrata, poslednji put 2015. godine [66], a koji reguliše granice izlaganja ljudi RF EM energiji u frekvencijskom opsegu od 3 kHz do 300 GHz. I ovaj propis pominje dva naučno ustanovljena štetna zdravstvena efekta izlaganja RF EM poljima, a to su periferalna nervna stimulacija za frekvencije ispod 10 MHz i zagrevanje tkiva ne frekvencijama iznad 100 kHz.

Na frekvencijama 100 kHz do 6 MHz važe sledeća ograničenja SAR-a za opštu populaciju, sa 6-minutnim usrednjavanjem: $0,08 \text{ W/kg}$ usrednjen za celo telo; $1,6 \text{ W/kg}$ za vršni prostorno usrednjen SAR za glavu, vrat i trup, usrednjen preko 1g tkiva (definisano kao kockica tkiva, bilo koja u navedenim delovima tela); 4 W/kg za vršni prostorno usrednjen SAR za udove, usrednjen preko 10g tkiva (definisano kao kockica tkiva, bilo koja u navedenim delovima tela).

Za opseg frekvencija od 6 GHz do 300 GHz važi ograničenje po gustini snage, kao i po izvedenim referentnim nivoima polja. Ovde je ograničenje po gustini snage 10 W/m^2 u opsegu 6 GHz – 15 GHz sa periodom usrednjavanja od 6 minuta, s tim da se za više frekvencije, do 150 MHz, period usrednjavanja smanjuje a granica ostaje ista. Za 900 MHz kao referentni opseg, referentni nivo električnog polja je $32,11 \text{ V/m}$, odnosno niži nego u ICNIRP preporukama ($41,25 \text{ V/m}$).

2.3.6 ARPANSA

Australijska agencija za zaštitu od zračenja i nuklearnu bezbednost, ARPANSA, izdala je februara 2021. novu verziju standarda koji utvrđuje granice izlaganja ljudi RF EM poljima u opsegu frekvencija od 100 kHz do 300 GHz. ARPANSA standard iz 2002. godine [38] bio je zasnovan na preporukama ICNIRP 1998, a razlikovao se u manjim detaljima. Budući da je ICNIRP izdala 2020. nove preporuke, ARPANSA je u skladu sa ovim smernicama inovirala svoj standard.

Prema [67], bazična ograničenja dele se u dve grupe, sa periodom usrednjavanja od 6 minuta i više, i sa periodom usrednjavanja od 0 do 6 minuta. U prvoj grupi, bazična ograničenja za izloženost

u opsegu od 100 kHz do 6 GHz za opštu populaciju su SAR za celo telo od 0,08 W/kg, lokalizovani SAR za glavu i torzo od 2 W/kg i lokalizovani SAR za udove od 4 W/kg. SAR za celo telo se usrednjuje na 30 minuta, a lokalizovani SAR na 6 minuta i preko kubične mase od 10 g. Preko 6 GHz, do 300 GHz, važi ograničenje SAR-a za celo telo od 0,08 W/kg, kao i ograničenje lokalizovane gustine snage preko površine tela u obliku kvadrata od 4 cm², od 20 W/m². Preko 30 GHz se uvodi i dodatno ograničenje, u smislu usrednjavanja preko 1 cm² površine tela i ograničenja koje ne sme da pređe duplu vrednost ograničenja po gustini snage, odnosno 40 W/m². U drugoj grupi se bazična ograničenja izražavaju preko specifične apsorpcije (kJ/kg) i lokalne gustine energije (kJ/m²) i to preko formule u zavisnosti od vremena izlaganja, za frekvencije veće od 400 MHz, a ova ograničenja treba da budu zadovoljena za sve vrednosti izlaganja između 0 i 6 minuta, bez obzira na vremenske karakteristike same izloženosti. Referentni granični nivoi za izloženost celog tela RF EM poljima, usrednjenu na 30 minuta, RMS vrednosti, od 400 MHz do 2 GHz izražavaju se preko intenziteta incidentnog električnog polja (27,5 V/m do 61,49 V/m; 41,25 V/M na 900 MHz), intenziteta incidentnog magnetskog polja i gustine snage incidentnog talasa (2 W/m² do 10 W/m²). Preko 2 GHz važi ograničenje po gustini snage incidentnog talasa od 10 W/m².

2.3.7 Nacionalni propisi

Nacionalna regulativa u oblasti izloženosti EM zračenju oslanja se na međunarodne propise i norme, bazična ograničenja SAR-a su ista, ali je u delu referentnih graničnih nivoa intenziteta električnog i magnetskog polja stroža. Osnovu nacionalne regulative u oblasti zaštite stanovništva prilikom korišćenja elektromagnetskih polja čine Zakon o elektronskim komunikacijama („Sl. glasnik RS”, br. 44/2010, 60/2013, 62/2014 i 95/2018) [68] i Zakon o zaštiti od nejonizujućih zračenja („Sl. glasnik RS”, br. 36/2009) [69]. Prema čl. 48 Zakona o elektronskim komunikacijama, regulatorna agencija meri nivo elektromagnetskog polja za elektronske komunikacione mreže, pripadajuća sredstva, elektronsku komunikacionu opremu i terminalnu opremu, u skladu sa graničnim vrednostima utvrđenim posebnim propisima. Zakonom o zaštiti od nejonizujućih zračenja uređuju se uslovi i mere zaštite zdravlja ljudi i zaštite životne sredine od štetnog dejstva nejonizujućih zračenja u korišćenju izvora nejonizujućih zračenja.

Pravilnik o granicama izlaganja nejonizujućim zračenjima ("Sl. glasnik RS", br. 104/2009) [47] propisuje granice izlaganja nejonizujućim zračenjima, odnosno bazična ograničenja i referentne granične nivoe izlaganja stanovništva. Pravilnik definiše zone povećane osetljivosti kao područja stambenih zona u kojima se osobe mogu zadržavati i 24 sata dnevno, škole, domove, predškolske ustanove, porodilišta, bolnice, turističke objekte, dečja igrališta, površine neizgrađenih parcela namenjenih prema urbanističkom planu za navedene namene, u skladu sa preporukama Svetske zdravstvene organizacije. Odredbe pravilnika odnose se na zone povećane osetljivosti izvan kontrolisanih (nadziranih) oblasti, dakle za opštu populaciju.

Bazična ograničenja su ograničenja zasnovana neposredno na utvrđenim zdravstvenim efektima i biološkim pokazateljima. Opisuju se veličinama: gustina magnetskog fluksa ili magnetna indukcija (B), gustina struje (J), specifična brzina apsorbovanja energije (SAR) i gustina snage (S). Referentni granični nivoi služe za praktičnu procenu izloženosti, predstavljaju praktično merljive veličine izvedene iz bazičnih ograničenja i osiguravaju poštovanje relevantnog bazičnog ograničenja. Referentni granični nivoi iskazuju se zavisno od veličine frekvencije polja prema sledećim parametrima: jačina električnog polja E [V/m], jačina magnetskog polja H [A/m], gustina magnetskog fluksa B [μ T)], gustina snage (ekvivalentnog ravnog talasa) - Sekv [W/m²].

Bazična ograničenja za opštu populaciju za opseg od 10 Mz do 10 GHz definisana su kao SAR usrednjen za celo telo od 0,08 W/kg, SAR lokalizovan na glavu i trup od 2 W/kg i SAR lokalizovan na ekstremitete od 4 W/kg. Preko 10 GHz, bazično ograničenje je gustina snage od 10 W/m². Referentni granični nivoi na frekvencijama od 400 MHz do 2 GHz su izraženi formulama, tako da za 900 MHz iznose 16,5 V/m za električno polje, 0,0444 A/m za magnetsko polje, 0,72 W/m² za gustinu

snage ekvivalentnog ravnog talasa, sve sa 6-minutnim periodom usrednjavanja. Od 2 GHz do 300 GHz su ograničenja konstantna, 24,4 V/m, 0,064 A/m i 1,6 W/m² respektivno, pri čemu je period usrednjavanja do 10 GHz 6 minuta, a preko 10 GHz se smanjuje.

Pravilnik o izvorima nejonizujućih zračenja od posebnog interesa, vrstama izvora, načinu i periodu njihovog ispitivanja [70] definiše izvore nejonizujućeg zračenja od posebnog interesa, kao izvore EM zračenja koji mogu da budu štetni po zdravlje ljudi, a određeni su kao stacionarni i mobilni izvori čije EM polje u zoni povećane osetljivosti dostiže najmanje 10% iznosa referentne, granične vrednosti propisane za tu frekvenciju. Za ovakve izvore su propisana periodična ispitivanja nivoa EM polja, odnosno usklađenosti sa graničnim nivoima.

U tabeli 2.2 data su poređenja bazičnih ograničenja u različitim preporukama i propisima, a u tabeli 2.3 poređenja referentnih nivoa na 900 MHz.

Tabela 2.2 Bazična ograničenja za opštu populaciju za duža izlaganja (period usrednjavanja 6 minuta i više)

	SAR za celo telo [W/kg]	Lok. SAR za glavu i trup [W/kg]	Lok. SAR za udove [W/kg]	Vreme usrednjavanja [min]	Volumen/masa usrednjavanja za lokalizovani SAR	Frekvencijski opseg	Napomena
ICNIRP 2020	0,08	2	4	6 min za lok. SAR; 30 min za celo telo	10 g	100kHz - 6 GHz	>6 Ghz ograničenje je lok. gustina snage, 20 W/m ² , tokom 6 minuta i 4cm ² površine tela
IEEE C95.1-2019	0,08	2	4	6 min za lok. SAR; 30 min za celo telo	10 g	100 kHz - 6 GHz	>6 GHz ograničenje je epitelijalna gustina snage, 20 W/m ² preko bilo kojih 4 cm ² površine tela u 6 minuta; Lok. SAR za udove važi za ušnu školjku
FCC	0,08	1,6	4	<30 min	Glava i trup 1 g; ekstremiteti 10 g	100 kHz - 6 GHz	>6 GHz ograničenje je MPE gustine snage, 1 mW/cm ² usrednjeno do 30 min
ARPANSA 2021	0,08	2	4	6 min za lok. SAR; 30 min za celo telo	10 g	100 kHz - 6 GHz	>6 GHz, ograničenje je epitelijalna gustina snage, 20 W/m ² preko bilo kojih 4 cm ² površine tela u 6 minuta
Health Canada 2015	0,08	1,6	4	6 minuta	Glava, vrat i trup 1g; udovi 10g	100 kHz - 6 GHz	6 GHz<f<150 GHz ograničenje po gustini snage od 10 W/m ² i ref. nivoi, f>150 GHz period usrednjavanja se smanjuje
Srbija	0,08	2	4	6 minuta za lok. SAR		100 kHz - 10 MHz	>10 GHz važi ograničenje po gustini snage od 10 W/m ²

Tabela 2.3 Poređenje referentnih graničnih nivoa na 900 MHz

Ref. nivoi 900 MHz	ICNIRP 2020	IEEE	FCC	ARPANSA 2021	Health Canada	Srbija
Električno polje	41,25 V/m	- (41,19 V/m)*	- (47,6 V/m)*	41,25 V/m	32,11 V/m	16,5 V/m
Gustina snage	4,5 W/m ²	4,5 W/m ²	0,6 mW/cm ²	4,5 W/m ²	10 W/m ²	0,72 W/m ²
Vreme usrednjavanja	(30min)	(30 min)	(<30 min)	(6 min)	(6 min)	(6 min)

*Preračunato iz gustine snage

2.4 Merenje elektromagnetskog zračenja i metode za procenu izloženosti pojedinca i stanovništva

Merenje elektromagnetskog zračenja i procena izloženosti vrše se iz dva razloga: radi provere usklađenosti sa propisima i radi procene realistične izloženosti stanovništva i pojedinca. Procene tipične izloženosti obično se koriste u epidemiološkim studijama, dok je merenje usklađenosti sa propisima zakonska obaveza.

Izloženost incidentnim elektromagnetskim poljima se uglavnom utvrđuje merenjima. Dozvoljene su i numeričke metode, ali zahtevaju dosta vremena i procesorske snage. Kod testiranja usklađenosti sa propisima cilj je da se evaluira maksimalna moguća izloženost i da se poredi sa referentnim graničnim nivoima. Ovo pretpostavlja predajnike koji rade maksimalnim snagama, maksimalno opterećenje baznih stanica i merenja usredsređena na vršne nivoe polja, što često vodi ka precenjivanju izloženosti. Realna izloženost može se meriti na različite načine – merenja na lokaciji sa laboratorijskom opremom ili lična merenja izloženosti. Postoje i teorijski modeli predikcije izloženosti koji se mogu kombinovati sa merenjima izloženosti radi optimizacije modela i validacije izloženosti.

Izloženost u bliskom polju uređaja koji se nose blizu tela određuje se laboratorijski ili numeričkim analizama. Određivanje izloženosti u cilju potvrde usklađenosti sa propisima podrazumeva uređaj koji radi maksimalnom snagom i prijavljivanje maksimalne utvrđene vrednosti SAR, dok se za procenu realne izloženosti merenja i numerička analiza mogu raditi za stvarno korišćenje određenog servisa.

2.4.1 Usklađenost sa propisima

Kao što je prethodno napomenuto, SAR, koji predstavlja osnovnu meru kod termičkih efekata izlaganja EM polju, ne može se meriti direktno u ljudskom telu. Prema smernicama ICNIRP, da bi se ispunila usaglašenost sa smernicama, za svaku veličinu koja karakteriše izloženost (E-polje, H-polje, SAR) i postavljene uslove usrednjavanja po vremenu i po prostoru, mora se zadovoljiti ili bazično ograničenje ili referentni nivo, ne traži se zadovoljavanje oba [51]. Tamo gde su specificirani intervali usrednjavanja, svi takvi intervali u nekom periodu moraju biti u saglasnosti sa ograničenjima. FCC propisuje da se za prenosive uređaje, definisane kao uređaje koji se koriste na udaljenosti do 20 cm od tela, usklađenost sa propisima proverava preko veličine SAR, a ne preko vrednosti MPE [35].

Incidentna izloženost varira u vremenu i prostoru. Mere incidentne izloženosti RF EM poljima su gustina snage, intenzitet električnog polja i intenzitet magnetskog polja. Ove veličine se lako mere, za razliku od indukovanih polja u ljudskom telu. Za izloženost u dalekom polju, gde su intenziteti električnog i magnetskog polja međusobno korelisani preko impedanse slobodnog prostora, dovoljno je meriti jednu od ovih veličina, a to je obično intenzitet električnog polja. Međutim, u bliskom polju antene nije dovoljno meriti jednu veličinu, potrebno je meriti intenzitete oba polja, jer električno i magnetsko polje nisu povezani preko impedanse slobodnog prostora.

Incidentna izloženost se uglavnom određuje merenjima. Za merenja na lokaciji tipično se koristi oprema za širokopojasna i frekvencijski selektivna merenja. Budući da ih je najlakše implementirati, uglavnom se koriste merni sistemi za merenje električnog polja. Širokopojasnim merenjima meri se opseg od nekoliko GHz odjednom i ona se izvode korišćenjem širokopojasne sonde i merača polja. Uskopojasna merenja su selektivna po pitanju frekvencije odnosno opsega, a merni sistem se takođe sastoji od sonde i mernog instrumenta. Dobija se jedna vrednost za posmatrani opseg. Ova merenja važna su da se sagleda doprinos komponentata ukupnoj izloženosti EM poljima koja stvaraju bežične komunikacione tehnologije. Budući da standardi zahtevaju izotropna merenja intenziteta EM polja, sonde se obično projektuju sa tri ortogonalno uređena elementa koji se koriste da zasebno izmere tri prostorne komponente polja. Ove tri-aksijalne sonde mere rezultatni intenzitet polja koji se računa

kao koren sume kvadrata intenziteta tri prostorne komponente. Izotropne širokopoljasne sonde sadrže tri međusobno ortogonalna dipola ili petlje čiji se izlazi sabiraju tako da je odziv nezavisan od orijentacije sonde. Oprema za frekvencijski selektivna merenja može obezbediti informacije o intenzitetu polja i takođe informacije o spektralnim karakteristikama merenih polja. Tipično se u ove svrhe koriste spektralni analizatori i merni prijemnici. Prilikom merenja spektralnim analizatorom, podešavanja merne opreme određuju se uzimajući u obzir karakteristike signala, posebno propusni opseg, vremensko ponašanje i tzv. crest (vršni) faktor (odnos vršne i efektivne vrednosti). Procena izloženosti merenjima na terenu zavisi od mnogo faktora, uključujući poziciju merenja u odnosu na antene izvora, rasejače i apsorbere.

Numeričke metode određivanja incidentne izloženosti su ograničenih mogućnosti. 3D alati sa modelom Ray-tracing (praćenje zraka) koriste se za predikciju izloženosti u određenom području u fazi planiranja i projektovanja mreže. Za određivanje izloženosti u bliskom polju antena baznih stanica koriste se 3D (trodimenzionalni) rešavači problema u elektromagnetici. Simulacije obezbeđuju detaljne podatke o raspodeli polja oko i unutar tela, ali je potrebno dugo vreme obrade i mogo procesorske snage da bi se do ovih podataka stiglo.

Postoje različite metode usrednjavanja veličina kojima se opisuje izloženost, kao i metode za utvrđivanje vršnih vrednosti. Vršna prostorna izloženost može se odrediti prelaženjem područja ili uzimanjem maksimalne vrednosti u datoj mreži tačaka. Kod metode prelaženja se malo područje snima i traži se maksimalna vrednost, pri čemu se antena pomera u svim pravcima i povezana je sa analizatorom spektra podešenim na maksimalno zadržavanje (kada prikazuje istoriju vršnih vrednosti na frekvencijskoj osi). Kod metode sa mrežom mernih tačaka, vrši se više tačkastih merenja u datom području po zadatim tačkama i onda se uzima maksimalna vrednost polja. Prostorno usrednjavanje zahteva metodu usrednjavanja. IEC 62232 [71] i [72] opisuju prostorno usrednjavanje u više tačaka (po visini i po širini) po mernoj lokaciji, zbog varijacija signala usled refleksija po više putanja. Po pitanju vremenskog usrednjavanja, preporuke definišu usrednjavanje na 6 minuta i usrednjavanje do 30 minuta. U slučaju frekvencijski selektivnih merenja sa prostornim usrednjavanjem, merenja mogu jako dugo da traju zbog perioda usrednjavanja od 6 minuta. Poređenje mernih rezultata za period usrednjavanja od 6 minuta i period usrednjavanja od 1 minute pokazuje da je razlika u rezultatima ispod 1 dB [73]. U praksi se vreme usrednjavanja i skraćuje na manje od jedne minute [74]. Za mobilne komunikacione sisteme, može se uzeti da ako je ukupna izloženost blizu graničnoj izloženosti, treba uzeti veći period usrednjavanja. Preporučuju se ([71]) i merenja u ono doba dana koje obezbeđuje najviše nivoe RF EM polja, odnosno pod uslovima najvećeg saobraćajnog opterećenja.

Određivanje izloženosti radi se merenjem ili proračunom – u nekim slučajevima je efikasnije odrediti izloženost nekim izvorima zračenja kroz merenja, a u drugima kroz kalkulaciju. Isto tako, za neke izvore se izloženost može procenjivati u odnosu na bazična ograničenja, a za druge preko referentnih graničnih nivoa. Sve izvore zračenja treba posmatrati u isto vreme i njihove doprinose kombinovati u jednu ukupnu procenu izloženosti. Međutim, izloženost od mobilnih uređaja ne treba kombinovati sa izloženošću od izvora koji su na fiksnoj lokaciji [73] jer ne bi bilo definitivne relacije pozicija ova dva različita tipa izvora i nivoi izloženosti od svakog tipa često ne bi bili korelisani u poređenju sa bazičnim ograničenjima tokom procedure utvrđivanja usklađenosti sa graničnim vrednostima izloženosti. Dakle, posebno se određuje izloženost od svih izvora u jednom mobilnom uređaju i to je izloženost od mobilnog uređaja, a posebno ukupna izloženost od svih izvora na fiksnim lokacijama u okruženju sa više izvora i to je izloženost od fiksnih izvora [73].

Laboratorijsko testiranje SAR-a vrši se radi provere usklađenosti mobilnog uređaja sa propisima u pogledu EM izloženosti. Koristi se posebna oprema, u zavisnosti od testiranog uređaja. Merna postavka se uglavnom sastoji od fantoma, sonde, robotičkog sistema koji pomera sondu, kao i simulatora bazne stanice. Fantom predstavlja model dela tela ispunjen tečnošću. Koriste se standardizovani modeli ljudske glave i tela koji se pune tečnošću koja simulira dielektrične

karakteristike ljudskog tkiva, odnosno karakteristike u pogledu apsorpcije EM talasa. Mobilni uređaj postavlja se blizu fantoma. Za niže i više frekvencije koriste se različiti fantomi zbog različitih karakteristika apsorpcije (niža frekvencija, npr. oko 400 MHz, ima veću talasnu dužinu i potrebno je više tečnosti da bi se sproveo SAR test). Uređaj se testira dok radi na maksimumima snage u svim frekvencijskim opsezima u kojima je predviđeno da radi i u različitim pozicijama u odnosu na telo i glavu, kako bi se simulirao način na koji korisnici mogu držati uređaj. Kako se mobilni uređaj često drži u džepu, potrebno je testirati i slučaj blizu tela, koji se tipično radi sa distancom od 5 mm između mobilnog telefona i fantoma. Propisi u mnogim zemljama zahtevaju i testiranje u odnosu na ekstremitete, pa se sprovodi i taj test, sa prostornim usrednjavanjem preko 10g tkiva. Mobilni telefon može zračiti više radio signala preko više tehnologija u isto vreme, pa se u tom slučaju mereni SAR različitih signala sabira i ukupna vrednost mora da zadovolji graničnu vrednost. Po pitanju frekvencijskih opsega, standardi zahtevaju da se SAR meri za svaki opseg i to na višoj, srednjoj i nižoj frekvenciji opsega.

FCC [35] definiše mobilne i prenosive uređaje. Prenosive uređaje definiše kao predajnike čije su strukture koje zrače projektovane da se koriste na udaljenosti do 20 cm od tela korisnika. Izloženost ljudi emisijama od prenosivih uređaja, onako kako ih definiše FCC, moraju se evaluirati u odnosu na dozvoljeni SAR. Evaluacija mobilnih uređaja, onako kako ih definiše FCC, mogu se takođe raditi u odnosu na granični SAR, ali je u tim slučajevima obično jednostavnije i jeftinije evaluirati usaglašenost u odnosu na granice jačine polja ili gustine snage. Za uređaje koji su predviđeni da rade u obe konfiguracije, kao prenosivi i mobilni uređaji, kada se uređaj testira u prenosivoj konfiguraciji na granični SAR, biće zadovoljeni i uslovi za mobilnu konfiguraciju. Prenosivi uređaji koji rade u opsezima preko 6 GHz moraju se testirati u odnosu na graničnu vrednost gustine snage (MPE), merenjima ili proračunom, jer ograničenje po lokalizovanom SAR-u važi na frekvencijama do 6 GHz.

Većina mobilnih uređaja radi na bateriju. Kako se korisnički uređaji testiraju na maksimalnoj snazi za usklađenost sa graničnim SAR-om, to nekad može potrošiti celu bateriju u manje od pola sata. Većina aparata ima ugrađene testne režime rada koji se mogu koristiti za evaluaciju osnovnih performansi. Takvi testni signali predstavljaju konzistentno sredstvo za testiranje SAR-a i preporučuju se za evaluaciju SAR-a. Kada testni režim nije dostupan, stvarni prenos se aktivira kroz simulator bazne stanice ili sličnu opremu. Aparati se testiraju na višoj, srednjoj i nižoj frekvenciji kanala u svakom režimu prenosa. Performanse aparata mogu se menjati unutar opsega prenosa usled dizajna.

Standardi opisuju procedure za testiranje usklađenosti i proračun lokalizovanog SAR-a, bilo numeričkim putem [75][76][77][78], bilo merenjima [22][79]. Unutar regulative EU doneti su tehnički standardi koji definišu merenja u vezi sa ispitivanjem usklađenosti sa propisima. To su standardi tela CENELEC (European Committee for Electrotechnical Standardization), koji se takođe intenzivno inoviraju poslednjih godina, kao i preporuke, a u skladu sa napretkom tehnologije. Republika Srbija je usvojila najveći deo ovih standarda kao svoje nacionalne standarde, koji su kroz regulativu označeni kao obavezni. Institut za standardizaciju Srbije doneo je 2020. standard SRPS EN 50413:2020 [80] koji zamenjuje prethodne standarde i u skladu je sa CENELEC EN 50413:2019, a koji predstavlja osnovni standard za procedure merenja i proračuna izloženosti ljudi električnim, magnetskim i elektromagnetskim poljima (od 0 Hz do 300 GHz). Standard SRPS EN 62232:2017 [81] služi za određivanje jačine RF polja, gustine snage i SAR-a u blizini radiokomunikacionih baznih stanica radi procene izlaganja ljudi, zamenjuje niz ranijih standarda, a identičan je sa EN 62232:2017 [71]. IEC (International Electrotechnical Commission) je krajem septembra 2021. doneo verziju prEN IEC 62232:2021, a Institut za standardizaciju Srbije je pripremio nacrt naSRPS EN IEC 62232:2021.

Prilikom stavljanja baznih stanica u rad, potrebno je da oprema bude usaglašena sa standardom SRPS EN 50401:2017 [82], koji sledi evropski standard EN 50401:2017 CENELEC EN 50401:2017. ITU-T K.70 [83] konstatuje da je ključna tačka za zaštitu od zračenja pravilan dijagram zračenja

predajnih antena baznih stanica i daje preporuke po pitanju oblikovanja dijagrama zračenja, podešavanja visine i nagiba antene, imajući u vidu i zahtev za obezbeđivanjem dobrog pokrivanja teritorije. Dodavanje nove bazne stanice radi se nakon detaljnih proračuna ukupne gustine snage u *downlinku*, a nakon instalacije se vrše merenja na terenu kako bi se dokazao proračun i usklađenost sa propisima. Stvarna ukupna izloženost osobe, kao suma izloženosti u *uplinku* i u *downlinku* u određenim uslovima i za određeno korišćenje, kao i odnos dve komponente, nisu jasni gledajući samo bazična ograničenja i referentne nivoe koje definišu propisi. Ove dve komponente treba oceniti korišćenjem istih parametara kako bi mogle da se saberu i uporede.

Za IoT uređaje i tehnologije donet je standard IEEE 1528.7-2020 [84] koji daje smernice za utvrđivanje izloženosti EM poljima koja potiču od ovih uređaja. Dokument klasifikuje uređaje prema frekvencijskom opsegu, protoku, izračenoj snazi i tipičnoj konfiguraciji pri instalaciji, a zatim daje veze između klase uređaja i dostupnih standarda za merenja i proračun.

2.4.2 Realistična izloženost

Kod testiranja radi utvrđivanja usklađenosti sa propisima cilj je da se evaluiira maksimalna moguća izloženost i da se poredi sa graničnim vrednostima. Rad sa maksimalnom snagom i beleženje vršnih vrednosti često vodi ka precenjivanju izloženosti. Realistična izloženost može se meriti na različite načine: merenjima na terenu u određenim tačkama sa analizatorom spektra i sondom (npr. [85] za merenje polja koje potiče od uređaja ili [86] za merenje polja na terenu), kao i ličnim meračima izloženosti koji se mogu upotrebiti za sistematizovane merne kampanje (npr. u [32]). Takođe, mogu se na fiksnim lokacijama postaviti senzori koji mere nivo polja (npr. RATEL-ova mreža senzora za merenje EM polja [43]). Realistična izloženost može se proceniti i prikupljanjem podataka iz mreže mobilnog operatora (merenja snage) [29][27][31] ili sa mobilnog uređaja [25], budući da je izloženost proporcionalna incidentnoj snazi. Takođe, realistična izloženost može se modelovati korišćenjem alata za predikciju pokrivanja, na osnovu nivoa polja.

U epidemiološkim studijama se incidentna izloženost, odnosno intenzitet električnog polja, uglavnom meri nošenjem ličnih merača izloženosti. Lični merači izloženosti [87], za razliku od analizatora spektra, mere izloženost u više frekvencijskih opsega u isto vreme. Lični merači su laki za upotrebu, ali zahtevaju protokol merenja i mogu imati veliki broj merenja koja su ispod nivoa detekcije uređaja.

2.4.3 Indeks izloženosti (EI) i srednji stvarni SAR

Indeks izloženosti, EI, razvijen je u projektu LEXNET [88], u okviru sedmog okvirnog programa EU (FP7), kao mera srednje izloženosti stanovništva zasnovana na SAR-u. Indeks EI uzima u obzir globalnu EM izloženost populacije zračenju bežičnih komunikacionih mreža tokom datog vremenskog okvira. EI kombinuje izloženost u *uplinku* (izloženost od sopstvenog uređaja) i u *downlinku* (izloženost od baznih stanica ili pristupnih tačaka) i na taj način pruža mogućnost analize i poređenja ovih komponentata. Po pitanju izloženosti u *uplinku*, EI otvara mogućnost analize stvarne izloženosti u odnosu na različita korišćenja uređaja, čija se usklađenost sa regulativom u pogledu izloženosti izražava vrednošću SAR-a koja predstavlja prijavljenu, maksimalnu vrednost u definisanim procedurama merenja, odnosno nema direktnu vezu sa stvarnim SAR-om tokom korišćenja uređaja.

Indeks EI predstavlja stvarnu izloženost populacije i u obzir uzima parametre koji utiču na izloženost: starost, položaj tela, različita korišćenja, tehnologiju, okruženje. EI praktično sabira izloženosti kategorija populacije koje generiše određeni izvor u određenoj situaciji. Na primer, može se oceniti pojedinačna izloženost za slučaj odraslog korisnika koji umereno koristi servis prenosa govora u zatvorenom, sedeći, preko telefona i 3G mreže. Na isti način se može oceniti pojedinačna izloženost za druge vremenske periode, radio tehnologije, drugu kategoriju populacije, drugačije

okruženje, korišćenje i telesni stav da bi se dobili svi elementi koji čine EI. Pojedinačni doprinosi se skaliraju prema tome koliko su predstavljeni u ukupnoj populaciji i vremenu. Matematička formulacija EI [W/kg] je suma primljenih doza (SAR u vremenu), po statističkim kategorijama populacije, podeljena sa posmatranim vremenskim periodom. U vremenskom intervalu, populacija u području se može segmentirati po dobi, korišćenju (tip servisa i korisničkog uređaja), po stavu, okruženju, za svaku pristupnu radio tehnologiju (RAT: Radio Access Technology) i tip ćelije. Ovakvi segmenti, ili konfiguracije korisnika, odgovaraju frakcijama ukupne populacije. Doze za izloženost u *uplinku* po konfiguraciji i u vremenskom intervalu računaju se na osnovu normalizovanih (po 1 W snage) vrednosti SAR-a za *uplink* po konfiguraciji pomnoženoj sa srednjom predajnom snagom korisničkog uređaja, frakcijom populacije i vremenom provedenim u konfiguraciji. Doze za izloženost u *downlinku* se računaju slično korišćenjem normalizovanih (po 1 W/m² gustine snage) vrednosti SAR-a za *downlink* po konfiguraciji pomnoženih sa srednjom gustinom incidentne snage, frakcijom populacije i vremenom provedenim u konfiguraciji [15]. Ove vrednosti se zatim sumiraju po konfiguracijama i dalje po svim vremenskim intervalima u posmatranom periodu i suma se na kraju deli sa ukupnim vremenom posmatranja.

Za datu geografsku oblast, EI uzima u obzir:

- Vremenski period (t): na primer, dan i noć;
- Populaciju (p) segmentiranu u različite kategorije, npr. deca (ispod 15g), mladi (15-29 g), odrasli (30-59g) i seniori (60g i više);
- Korisnički profili (l), npr. intenzivno, umereno, slabo korišćenje ili ne-korisnik;
- Okruženje (e), npr. u zatvorenom (kancelarija, dom), na otvorenom, ili u putu na posao (autobus, auto, metro i sl);
- Različite dostupne pristupne radio tehnologije (r), npr. 2G (900 MHz i 1800MHz), 3G, 4G, WiFi;
- Različite tipove ćelija (c), npr. makro, mikro, piko, femto ćelije;
- Stav (pos), npr. sedeći, stojeći, (sedenje/stajanje);
- Korišćenje (u), koje se opisuje uređajem (npr. mobilni telefon, laptop) i korišćenim servisom (npr. govorni poziv, prenos podataka).

Pojedinačni doprinosi izloženosti oslanjaju se na SAR izražen u W/kg. SAR će zavistiti od samog uređaja, frekvencijskog opsega, morfologije i stava korisnika, kao i od pozicije i udaljenosti izvora u odnosu na korisnika. Koriste se normalizovane vrednosti SAR koje su u okviru LEXNET projekta dobijene numeričkim dozimetrijskim simulacijama [89].

Vrednost indeksa izloženosti ogleda se u nekoliko stvari:

- U pitanju je jedan parametar koji objedinjuje kompletnu izloženost populacije, u *uplinku* i u *downlinku*, shvatljiv je i omogućuje poređenje pojedinačnih komponentata (tehnologija, *uplinka* i *downlinka* i slično).
- Indeks je statistička veličina koja objedinjuje podatke iz operativne mreže sa podacima o korisnicima i stanovništvu, njihovom ponašanju, dobi, korišćenju.
- Indeks se može računati parcijalno, za pojedinu kategoriju, pojedini servis, podskup tehnologija, jednog operatora i slično. Takođe, može se svesti na nivo pojedinca i njegovu konkretnu dob, korišćenje, stav.

Nedostatak indeksa ogleda se u tome što se po apsolutnoj vrednosti ne može porediti sa graničnim vrednostima regulative jednostavno jer regulativa nije postavljena na isti način. Drugim rečima, korišćenjem EI možemo porediti tehnologije (GSM, UMTS,...), slojeve (makro, mikro,...), servise (govor, preuzimanje podataka, striming,...), ali ne možemo reći šta je „visoka“ izloženost, a šta „niska“ bez dodatnih istraživanja kojima bi bile postavljene ovakve granice, koje se nalaze unutar dozvoljenih granica izlaganja. Dalje, indeks objedinjuje ogromnu količinu podataka, gde se svi podaci

ne mogu korelirati do potrebnog nivoa. Čak i za podelu po kategorijama sa po dve vrednosti u kategoriji (populacija, stav, profil, okruženje, radio tehnologija, servis..), postoji veliki broj kombinacija konfiguracija za koje je potrebno odrediti srednju predajnu snagu ili incidentnu gustinu snage, a pri tome se procenti korisnika u pojedinoj konfiguraciji menjaju sa stalnim promenama radio uslova i uslova opterećenja mreže, čak i kada korisnik miruje. Kalkulacija bi zahtevala pribavljanje tačnih srednjih vrednosti po konfiguracijama, što nije moguće, odnosno neophodne su simulacije i aproksimacije. Međutim, uz sve nesigurnosti, indeks pre svega daje način da se opišu ukupna izloženost populacije u vremenu i komponente izloženosti, kao i da se uvidi na koji način se može postići smanjenje te izloženosti. Detaljan prikaz indeksa izloženosti dat je u Prilogu 2.

3 ARHITEKTURA MOBILNE MREŽE

Arhitektura pristupnog radio dela javnih mobilnih mreža je evoluirala tokom vremena, sa povećanjem broja korisnika i zahtevima za sve naprednijim servisima. Pitanje izloženosti elektromagnetskom polju koje potiče od mobilnih komunikacionih sistema istraživano je tokom razvoja ovih sistema, ali se zabrinutost javnosti povećala tek sa njihovim intenzivnim širenjem i uvođenjem novih tehnologija. Arhitektura same mobilne mreže, odnosno prisutne tehnologije, korišćeni frekvencijski opsezi i topologija mreže u smislu rasporeda izvora zračenja, imaju značajan uticaj na ukupnu izloženost stanovništva.

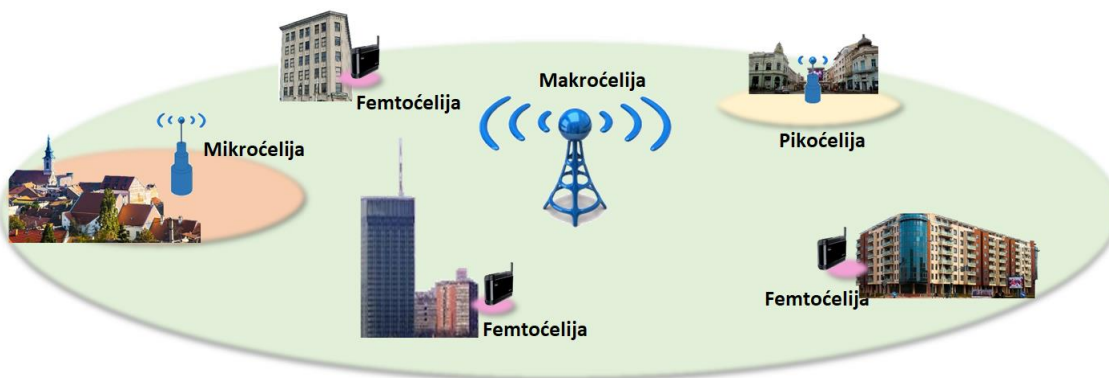
3.1 Slojevi mrežne arhitekture: makro, mikro, piko, femto

Pristupna radio mreža (RAN: Radio Access Network), kao deo javne mobilne mreže (PMN: Public Mobile Network), obezbeđuje poslednju, bežičnu deonicu veze sa korisnikom. Mobilne mreže su ćelijski sistemi koji teritoriju dele u geografske oblasti koje pokrivaju pojedine bazne stanice, odnosno njihove sektorske antene. Svaka ćelija predstavlja zonu pokrivanja (usluživanja) bar jednog primopredajnika bazne stanice, koji se nalazi na lokaciji ćelije. Moderne bazne stanice podržavaju više tehnologija, GSM, UMTS i LTE, koje u opštem slučaju rade u različitim frekvencijskim opsezima i imaju različite zone pokrivanja. Dakle, mreža se sastoji od različitih tehnoloških slojeva, a korisnici su povezani na određeni tehnološki sloj na osnovu radio uslova, mrežnih pravila i mogućnosti korisničkih uređaja.

Još jedna podela na slojeve odnosi se na veličinu ćelije, što zavisi od predajne snage bazne stanice. Ako gledamo isti frekvencijski opseg i istu tehnologiju, veličinu ćelije određuju činioci u vezi sa tehnologijom, predajna snaga bazne stanice, visina antene i njene karakteristike, kao i konfiguracija terena i objekata na njemu, uključujući zgrade. Saobraćajno opterećenje i vremenski uslovi takođe utiču na pokrivanje. Ovi faktori ograničavaju domet EM talasa odnosno udaljenost koju mogu da pređu od bazne stanice a da se poruke koje nose i dalje mogu dekodirati u korisničkim uređajima, i obrnuto. Zonu pokrivanja ćelije generalno diktira *uplink*, u smeru komunikacije od korisnika ka baznoj stanici, a ne *downlinka*, odnosno oblast u kojoj signal korisničkih uređaja bazna stanica koja ih opslužuje može da ispravno dekodira. 3GPP (3rd Generation Partnership Project), telo koje razvija standarde mobilnih tehnologija, definiše klase snage korisničkih uređaja (UE: User Equipment), po tehnologiji, koje odgovaraju potrebama tehnologije i zadovoljavaju propise u vezi sa EM izloženošću. Domet ćelije može se posmatrati i u odnosu na traženu uslugu (pokrivanje servisa), budući da servisne mogućnosti opadaju sa udaljavanjem od bazne stanice odnosno pomeranjem ka ivici ćelije. Domet ćelije takođe zavisi od saobraćajnih uslova. Ćelije se skupljaju sa povećanjem opterećenja, a ovo tzv. ćelijsko disanje je posebno naglašeno kod WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access) tj. 3G sistema, koji su ograničeni interferencijom.

U urbanim okruženjima, gustina baznih stanica visoka je i zbog obezbeđivanja dobre pokrivenosti signalom i zbog obezbeđivanja dovoljno kapaciteta. Zgrade i druge prepreke apsorbiraju radio talase, tako da domet pokrivanja ne može biti velik kao u ruralnim područjima. Sa druge strane, gustina korisnika i njihovi servisni zahtevi traže više bežičnih resursa. Dalje, većina mobilnog saobraćaja odvija se u *indoor* uslovima [90], dakle u zatvorenom prostoru, pri čemu zidovi apsorbiraju i signale *uplinka* i signale *downlinka*. Takođe, velike bazne stanice ne mogu se instalirati gde god je to potrebno, zbog propisa, problema sa akvizicijom lokacija itd. Svi ovi faktori doprinose upotrebi različitih tipova ćelija u specifičnim uslovima.

GSM tehnologiju su prilikom njenog uvođenja karakterisale velike ćelije, veličine do 35 km u ruralnim područjima ili manje u zonama veće gustine stanovništva (urbane zone), tzv. makro ćelije. Za pokrivanje manjih područja definisane su bazne stanice manje snage, kao mikro bazne stanice [91]. Antene makro ćelija postavljaju se na stubove i krovove, na tačke koje obezbeđuju jasan pregled okolnog terena i zgrada. Mikro ćelije se uglavnom postavljaju u gušće naseljenim područjima, kako bi se poboljšalo pokrivanje na ivici zone pokrivanja makro ćelije ili da bi se dodao kapacitet, tamo gde je i pokrivanje makro ćelije dobro. Sa uvođenjem tehnologije UMTS, klase baznih stanica (BS: Base Station) definisane su [92][93] kao klasa BS za široko područje (Wide Area), klasa BS za srednji domet (Medium Range) i klasa BS za lokalno područje (Local Area), pri čemu svaka klasa ima definisan opseg predajne snage. Manje bazne stanice mogu se montirati na stubove ili zid. Sledeći korak bilo je definisanje još manjeg tipa ćelije, čija je namena bila pokrivanje unutar doma [94]. Kod LTE-a 3GPP takođe prepoznaje četiri klase baznih stanica [95]: BS za široko područje (makro ćelija), BS za srednje područje (mikro ćelija), BS za lokalno područje (piko ćelija) i kućna BS (femto ćelija). Zona pokrivanja makro bazne stanice je tipično do 20 km, mikro bazne stanice do 2 km, piko ćelije pokrivaju oblast do nekoliko stotina metara, dok je domet femto ćelija do nekoliko desetina metara. Piko ćelije tipično pokrivaju tržne centre, kancelarije, vozove ili avion, pri čemu proširuju pokrivanje ili dodaju kapacitet u oblastima koje je teško ili skupo dosegnuti makro ćelijom. Femto ćelije se instaliraju unutar doma, čime obezbeđuju dobar signal u zatvorenom prostoru doma (*indoor*) i obično koriste kućnu širokopoljasnu konekciju kao okosnicu. Ovi tipovi malih ćelija pojavili su se kao rezultat potrebe za pokrivanjem i kapacitetom u kombinaciji sa praktičnim uslovima instalacije na lokaciji i pravljenja okosnice za baznu stanicu. Nivoi snage makro ćelija su tipično nekoliko desetina vata, mikro ćelije emituju snagama od nekoliko vata, piko ćelije do 2 W, dok je snaga femto ćelija tipično do 200 mW. Tipovi ćelija i njihova upotreba ilustrovani su na slici 3.1 [96].



Slika 3.1 Tipovi ćelija po topologiji

Sve ćelije manje od makro ćelije nazivaju se malim ćelijama (*small cells*), pri čemu se termin posebno odnosi na piko ćelije i femto ćelije, kao i na releje (bazne stanice koje isti spektar koriste za pristup i za okosnicu). Neke bazne stanice koriste distribuirani antenski sistem (DAS: Distributed Antenna System) unutar zgrade da bi se dodao kapacitet i prevazišao problem slabljenja signala pri prolasku kroz zidove. I piko i femto ćelije uvedene su pre svega da bi se poboljšalo pokrivanje i da bi se dodao kapacitet unutar objekata.

Heterogena mreža (HetNet: Heterogenous Network) je mreža sa kompleksnom međusobnom interakcijom ćelija različitih tehnologija (2G, 3G, 4G) i topologija (makro, male ćelije), nekad uključujući i mrežne elemente WiFi tehnologije, koja obezbeđuje funkcionalnost neprimetnog prelaska između ćelija. Korisnici unutar ćelije normalno primaju signale više baznih stanica i normalno su povezani sa mrežom preko jednog ili više primopredajnika sa najdominantnijim signalom. Pažljivo planiranje mreže zajedno sa naprednim tehnikama za fino podešavanje granica pokrivanja između ćelija i raspoređivanje korisnika između slojeva na osnovu njihovih potreba za

servisima maksimizira iskorišćenje pokrivanja i kapaciteta mreže. Prema [97], blizu 60% mobilnog saobraćaja prenosa podataka preko 4G mreže biće prebačeno (*offload*) na Wi-Fi do 2022.

Male ćelije su posebno važne za obezbeđivanje konektivnosti za sve više sveprisutnih IoT uređaja, koji imaju različite saobraćajne zahteve i ponašanje u poređenju sa ljudskim korisnicima i biće od važnosti za obezbeđivanje zahtevanog kvaliteta servisa u 5G-u.

WLAN (IEEE 802.11) mreže, ili WiFi, stekle su popularnost usled jednostavnosti instalacije i korišćenja, upotrebe nelicenciranog spektra i stalnih poboljšanja tehnologije. Njihovo širenje, od javnih spoljnih i unutrašnjih pristupnih tačaka do kućnog Wi-Fi-ja, dovelo je do sveprisutnog pokrivanja i stoga, zajedno sa brzim rastom saobraćaja prenosa podataka na mobilnim mrežama [98] indukovano širenjem pametnih telefona i tableta, do koncepta rasterećenja (*offloading*) mobilnog saobraćaja prenosa podataka na Wi-Fi. U prvo vreme, u odvojenim ćelijskim i WiFi mrežama, deo korisnika bi se svakako ručno prebacio na WiFi, prijavljivanjem na mrežu, tako da je ovo obezbeđivalo izvesno malo rasterećenje mobilnog saobraćaja prenosa podataka. Međusobno povezivanje ove dve odvojene mreže počelo je obezbeđivanjem neprimetnog *offloada*, što zahteva metod autentifikacije korisnika u mobilnoj *core* mreži. Nastavilo se daljom integracijom sa mobilnim *core*-om i uvođenjem funkcionalnosti ANDSF (Access Network Discovery and Selection Function). Konačna faza je pametno rasterećivanje kroz HetNet, gde se bira najbolja pristupna mreža, bilo da je 3GPP mreža ili ne.

Pokrivanje Wi-Fi mreže može se kretati od nekoliko desetina metara do nekoliko kilometara, u zavisnosti od frekvencijskog opsega koji se koristi (2,4 GHz ili 5 GHz), izlazne snage, osetljivosti prijemnika, dobitka i tipa antene, prepreka na putu radio talasa. U WiFi mrežama klijent odlučuje koju će pristupnu tačku koristiti, suprotno od mobilnih mreža, gde mreža asistira korisničkom uređaju da se prebaci na drugu baznu stanicu. WiFi uređaji često se drže prve izabrane pristupne tačke čak i kad se njen signal degradira (a takođe i servis) i kad postoji jači signal druge pristupne tačke. Kad je veza značajno degradirana, oni izaberu drugu pristupnu tačku. U mobilnoj mreži, nivoi signala na kojima se okida prebacivanje na drugu baznu stanicu su definisani i dolazni signali se redovno procenjuju kako bi se odabrao najbolji.

3.2 Veza sa izloženošću elektromagnetskom polju

Evaluacija ukupne izloženosti EM polju mobilnih sistema zahteva procenu trenutne izloženosti u *uplinku*, koja zavisi od predajne snage korisničkog uređaja i njegove pozicije relativno u odnosu na ljudsko telo, i trenutne izloženosti u *downlinku*, koja zavisi od signala svih okolnih baznih stanica. Posmatrajući mrežnu arhitekturu, odnosno veličinu ćelije, možemo izvući neke početne pretpostavke.

Male ćelije dodaju se zbog poboljšanja pokrivanja ili povećanja kapaciteta. U prvom slučaju, mala ćelija pokriva područje na kojem je pokrivanje makro ćelije loše, tako da dodavanje sloja sa malom ćelijom, sa manjom predajnom snagom u poređenju sa makro stanicom, povećava intenzitet polja na mestu korisnika u nekoj meri. Takođe, poboljšava primljeni signal. U 3GPP sistemima, usled mehanizma kontrole snage, poboljšanje prijemnog signala vodi ka smanjenju predajne snage korisničkog uređaja, jer njegov signal ne mora da putuje daleko (odnosno da savlađuje prepreke) do bazne stanice. Kod WiFi mreže, korisnički uređaj emituje unapred definisanom snagom, ali koristi različite tehnike modulacije u zavisnosti od uslova radio kanala i posledično ostvaruje različite stvarne protoke, tako da dodavanje Wi-Fi pristupne tačke vodi samo ka povećanju izloženosti u *downlinku*. U slučaju da se mala ćelija dodaje iz razloga kapaciteta, njeno uvođenje će svakako povećati intenzitet polja u području, koje izgleda kao ostrvo pod kišobranom pokrivanja makro bazne stanice. Izloženost u *uplinku* će se opet smanjiti, budući da je opslužujuća bazna stanica bliže korisniku. Ovo opšte ponašanje dosta zavisi od servisa koji se koristi, tehnologije, mogućnosti korisničkog uređaja. Ako korisnik izvršava zahtevnu aplikaciju koja zahteva visok protok, korisnički

uređaj emitovaće velikom snagom čak i kad je blizu bazne stanice. Dodavanje male ćelije radi kapaciteta neće mnogo uticati na predajnu snagu korisničkog uređaja. U oblasti lošeg pokrivanja makro stanice korisnički uređaj ne može da postigne visoke protoke i emituje maksimalnom snagom, te ako se mala ćelija doda da poboljša pokrivanje, protok raste, a time i predajna snaga (koja bi bila manja za manje zahtevan servis). Varijacija snage korisničkog uređaja takođe zavisi od okruženja, od toga da li je korisnik u objektu ili napolju, da li je blizu male ćelije ili ne.

Izloženost osobe direktno zavisi od gustine snage EM talasa koji stižu do njenog tela. Za izloženost u *uplinku*, korisnik je u bliskom polju antene korisničkog uređaja, dok je za izloženost u *downlinku* korisnik u zoni dalekog polja antene bazne stanice. Direktno merljivi parametri su predajna snaga korisničkog uređaja i gustina snage okolnih baznih stanica u različitim tačkama posmatranog područja u kojima borave ljudi. Izloženost zračenju korisničkog uređaja pri stvarnoj upotrebi neke od mobilnih tehnologija u nekom frekvencijskom opsegu evaluira se preko vrednosti SAR i može se proceniti korišćenjem stvarne (srednje) predajne snage i numerički određene vrednosti SAR-a za taj tip korišćenja i taj opseg, normalizovane na predajnu snagu od 1 W. Slično, izloženost zračenju okolnih baznih stanica procenjuje se na osnovu gustine snage na lokaciji, a za konkretnu situaciju se može pretvoriti u SAR za izloženost u *downlinku* tako što se numerički odredi vrednosti SAR za dati opseg i telesni stav i normalizuje na gustinu snage od 1 W/m^2 , a zatim se izmerena gustina snage na lokaciji množi sa ovom normalizovanom vrednošću da bi se dobio SAR. Na ovaj način, izloženost u *uplinku* i u *downliku* mogu se porediti preko vrednosti SAR.

4 STATISTIČKA ANALIZA KLJUČNIH PARAMETARA MREŽE

Ciljevi ovog istraživanja su razvoj metode za određivanje ukupne stvarne izloženosti korišćenjem podataka iz mobilne mreže i primena metode u određivanju uticaja arhitekture mobilne mreže na ukupnu izloženost. Prvi korak istraživanja bilo je posmatranje mreže kroz ključne pokazatelje performansi i kroz namenska merenja, a zatim i analiza podataka koji se mogu prikupiti u mreži i biti od koristi u evaluaciji ukupne izloženosti. Bilo je potrebno odrediti faktore koji dominantno utiču na izloženost stanovništva prilikom svakodnevnog korišćenja mobilne mreže, njihove međuzavisnosti, statističke osobine, kako bi se definisali uslovi za eksperimentalno određivanje izloženosti koja potiče i od baznih stanica i od korisničkih uređaja, u realnom okruženju i pri realnoj upotrebi mobilnih tehnologija. Za meru izloženosti uzet je srednji stvarni SAR kao srednja doza EM zračenja koje potiče od mobilnih sistema primljena u nekom periodu i podeljena sa tim periodom posmatranja. Ovakva metrika omogućuje sabiranje izloženosti koja potiče od baznih stanica i one koja potiče od korisničkih uređaja.

Statistička analiza ključnih parametara mreže vršena je u više navrata kako bi se uočile pravilnosti saobraćajnog opterećenja mreže, kako bi se izdvojili tipični saobraćajni profili korisnika i kako bi se odabralo vreme i mesto za testiranje. Takođe, statistička analiza merenja snage sa mreže je urađena za više karakterističnih situacija kako bi se uočile promene nivoa izračene snage korisničkog uređaja, kao i primljene snage, koje direktno utiču na stvarni SAR. Period usrednjavanja statističkih podataka u mreži je sat vremena, odnosno sva prikazana statistika je satna statistika iz mreže. Satna statistika oslanja se na više osnovnih perioda usrednjavanja stanja brojača i proračuna ključnih pokazatelja performansi, tzv. ROP (reporting output period) perioda. ROP period iznosi 15 minuta i za merenja performansi i za zadate mrežne izveštaje (merenja snage).

4.1 Teorijska podloga

Faktori koji utiču na izloženost pojedinca EM zračenju su snaga radio talasa koji stiže do osobe, trajanje izloženosti i način na koji se energija EM talasa apsorbuje u telu osobe. Specifična brzina apsorpcije je osnovna mera za izloženost EM polju u opsegu radio frekvencija, kao što je prethodno naznačeno. SAR se razlikuje kod osoba različitog uzrasta, razlikuje se u odnosu na poziciju tela prema izvoru EM zračenja, stavu tela, pored toga što je frekvencijski zavisna veličina. Proizvođači mobilnih telefona prijavljuju maksimalno izmereni SAR, pod različitim uslovima i za različite radio frekvencije, kako bi dokazali da izloženost korisnika neće preći granice postavljene kroz zakonska akta, za bilo koji način upotrebe datog mobilnog uređaja. Izloženost EM polju koje potiče od baznih stanica, sa druge strane, određuje se korišćenjem izvedenih parametara koji se mogu direktno meriti, kao što je intenzitet polja u oblasti pokrivanja, kako bi se dokazalo da je izloženost u skladu sa regulativom. Dakle, izloženost od ova dva tipa izvora koji omogućuju dvosmernu bežičnu komunikaciju se meri odvojeno, a predstava o tome kolika je ukupna izloženost i kako se ona menja pod različitim uslovima u mreži (opterećenje, jačina signala) i sa različitim načinima korišćenja (različitim servisima) prilično je zamagljena. Trajanje izloženosti određuje ukupnu količinu apsorbovane energije, za određenu snagu incidentnog radio talasa i za specifičnu brzinu apsorpcije određenu frekvencijom talasa i uslovima vezanim za konkretnu osobu.

Izloženost osobe direktno je proporcionalna snazi incidentnog radio talasa. Snaga radio talasa smanjuje se sa udaljenošću od izvora kao kvadrat rastojanja, tako da opada brzo i razlikuje se za više redova veličine poredeći centar ćelije (lokaciju bazne stanice) i ivicu ćelije. Mobilni uređaj drži se

blizu tela u svim slučajevima korišćenja, tako da promena incidentne snage sa promenama relativne pozicije mobilnog uređaja u odnosu na telo nije tako velika. SAR se, sa druge strane, menja sa starošću osobe (dete, odrasli), pozicijom (u odnosu na izvor zračenja), stavom tela [89]. Uzevši u obzir osobu određenih godina i određenih navika po pitanju korišćenja, promene izloženosti možemo posmatrati procenom srednje snage incidentnog radio talasa u određenom vremenskom periodu. Snaga radio talasa koji dolaze od antene bazne stanice na određenoj lokaciji zavisi od tehnologije, opterećenja mreže, radio uslova na putanji do lokacije. Snaga radio talasa koji dolazi od mobilnog uređaja zavisi od tehnologije, korišćenog servisa, mrežnih i radio uslova. Oba profila snage se menjaju u vremenu i imaju međusobnu zavisnost. Udaljenost između centra ćelije i ivice ćelije, odnosno veličina zone pokrivanja, ima direktan uticaj na raspon primljene i predajne snage korisničkog uređaja, odnosno na raspon snage koja stiže do ljudskog tela. Štaviše, isti servis koji se koristi pod različitim radio uslovima (odnosno na različitim udaljenostima od bazne stanice) može za posledicu imati drastično različitu snagu kojom emituje korisnički uređaj.

Kako bi se izračunao srednji stvarni SAR u nekom periodu, prvo je neophodno odrediti kada i kako (koliko) mobilna jedinica zapravo zrači odnosno emituje u tom periodu, a zatim, kako se energija koja stiže do ljudskog tela apsorbira u telu. Definisane reprezentativnih testnih slučajeva za evaluaciju srednje izračene snage i srednjeg stvarnog SAR-a zahteva razumevanje kompleksnih mehanizama u osnovi bežičnih mreža.

Sve bežične tehnologije koriste neku vrstu šeme višestrukog pristupa za prenos od korisnika ka mreži, u *uplinku*, pošto u opštem slučaju više mobilnih uređaja želi da komunicira u isto vreme sa istom baznom stanicom ili pristupnom tačkom. Prenos u *uplinku* može biti iniciran od strane mobilnog uređaja, kroz neku proceduru slučajnog pristupa, ili iniciran od strane bazne stanice ili pristupne tačke. Različite tehnologije imaju različite šeme pristupa. Bežični resurs u *uplinku* se dalje zauzima u zavisnosti od primenjene šeme višestrukog pristupa, gde pristupna radio mreža diktira dodelu resursa u zavisnosti od trenutnog opterećenja, stanja bafera, zahtevanog prenosa, prioriteta, radio uslova i dr. Ova dodela resursa izvodi se korišćenjem različitih kompleksnih algoritama, a ishod zavisi od specifičnih podešavanja u mreži i trenutnih uslova u mreži.

Komunikacija u *uplinku* odvija se i kada korisnik ne inicira servis, kada mobilni uređaj šalje poruke koje omogućuju ispravno funkcionisanje mobilne komunikacije i poruke koje potiču od aplikacija instaliranih na mobilnim uređajima, a preko kojih aplikacije kontaktiraju svoje udaljene servere (npr. *keep-alive* poruke). Ovakve poruke se povremeno razmenjuju i u opštem slučaju su kratkog trajanja. U ovoj analizi usredsređujemo se na namernu upotrebu mobilnog telefona, odnosno na govorne pozive i pozive sa prenosom podataka. Signalizacione poruke, međutim, mogu indukovati višu izloženost u kraćim periodima, usled povišenih nivoa snage i povećanog faktora aktivnosti, na primer tokom uspostavljanja poziva ili uključanja servisa prenosa podataka [99].

Izgled signala na radio interfejsu u *uplinku* zavisi od aktivnosti izvorne aplikacije (prenos govora ili podataka) i načina obrade aplikativnih podataka za emitovanje u *uplinku*, gde radio tehnologija i uslovi u radio kanalu predstavljaju glavne faktore, pod datim uslovima opterećenja mreže. Srednja vrednost izračene snage zavisi i od amplitude izračene snage tokom perioda emitovanja i od odnosa između perioda emitovanja i perioda bez emitovanja u posmatranom vremenskom intervalu. Ovaj odnos se naziva faktor aktivnosti (DF: duty factor) na radio interfejsu i može se definisati kako sledi:

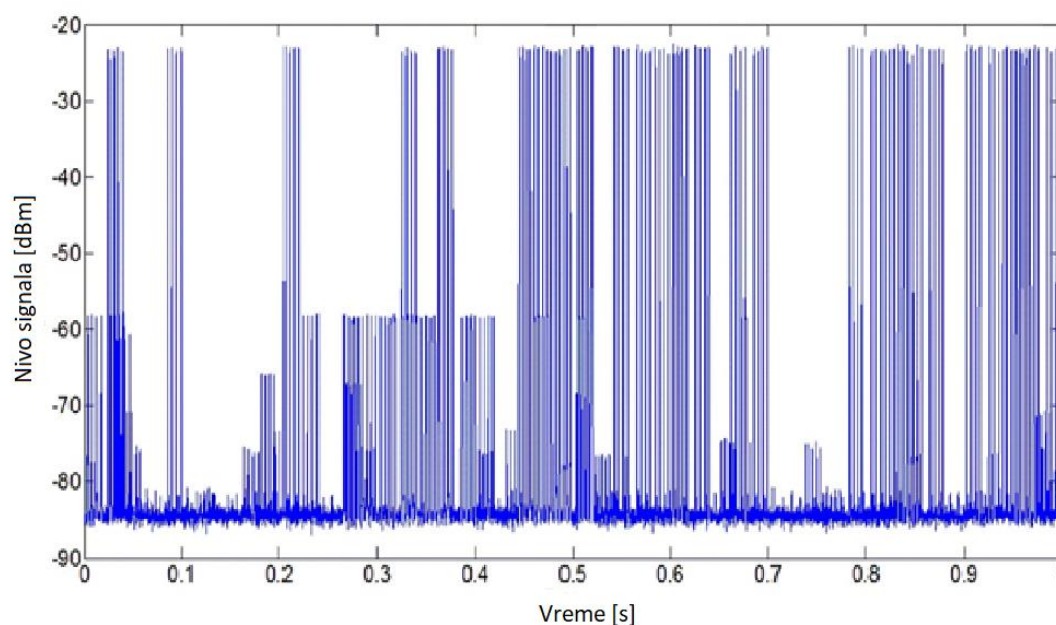
$$DF = \frac{T_{active}}{T_{total}} * 100\%, \quad (4.1)$$

gde T_{total} predstavlja posmatrani vremenski period, a T_{active} predstavlja ukupno vreme aktivnosti na radio interfejsu u tom periodu, odnosno ukupno vreme za koje je uređaj zaista i emitovao. DF opisuje periode bez emitovanja na srednjem nivou. Kada se koriste različiti servisi, preko određene tehnologije i u određenim radio uslovima i uslovima opterećenja mreže, mogu se uočiti određeni

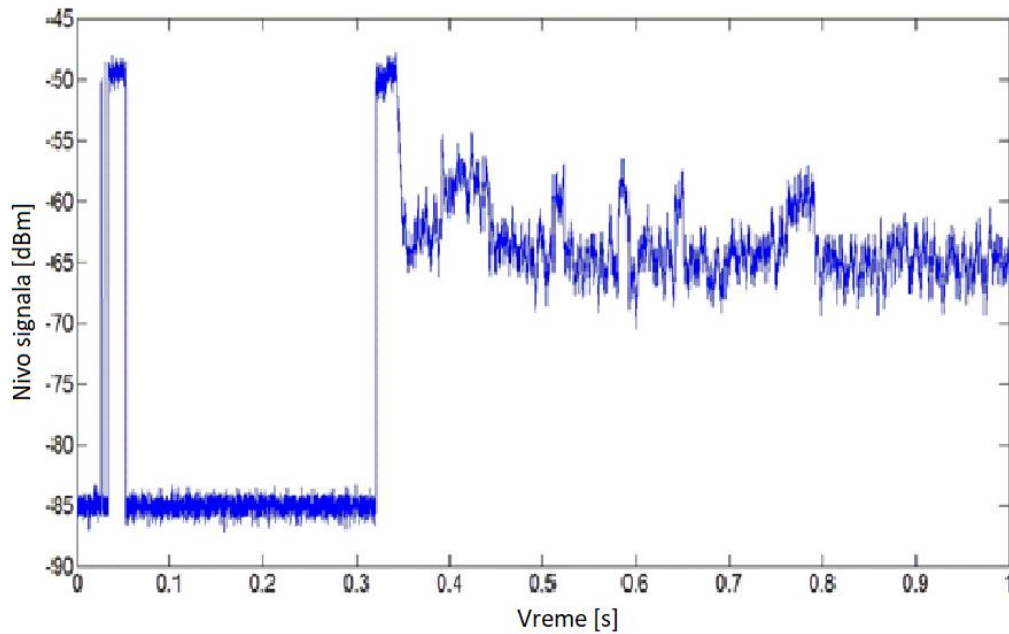
saobraćajni obrasci aplikacija i oni stvaraju specifične obrasce na radio interfejsu, sa specifičnim srednjim faktorima aktivnosti. Ovi obrasci zavise i od implementacije standarda od strane pojedinih proizvođača mrežne opreme, kao i od podešavanja u mreži.

4.2 Aktivnost na radio interfejsu

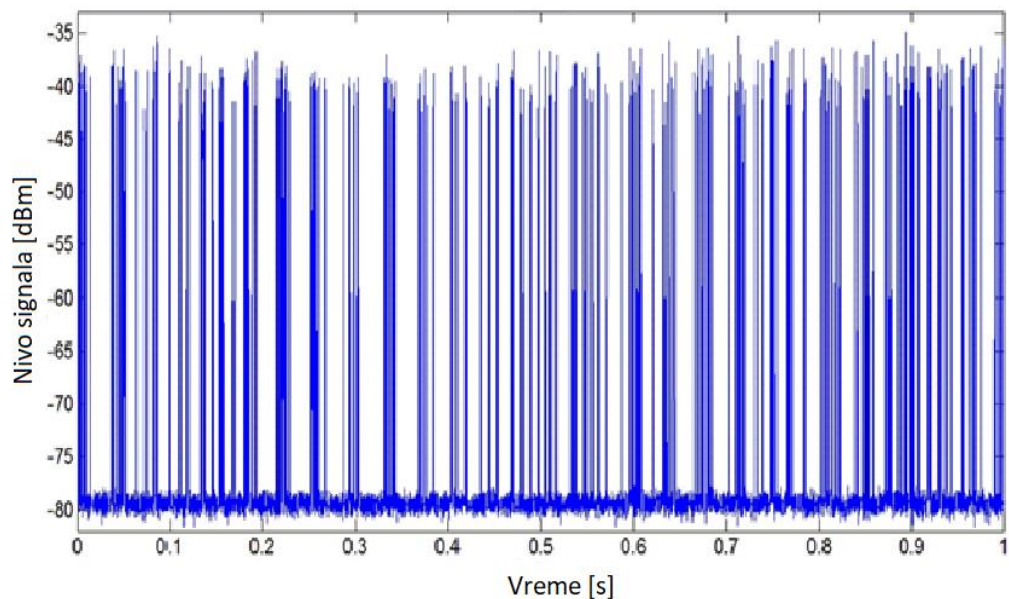
Aktivnost na radio interfejsu i nivoi predajne snage ilustrovani su na slikama 4.1-3, za slučaj komunikacije sa prenosom podataka. Signal u *uplinku* snimljen je mernim prijemnikom, kao što je opisano u poglavlju 6. Najpre, u slučaju prenosa podataka, kod GSM-a se zauzimaju dva ili tri od osam vremenskih slotova po frekvencijskom nosiocu, u zavisnosti od multislot klase korisničke opreme (UE) [100], što se jasno vidi na slici 4.1. Dalje, slika prikazuje promenljive nivoe snage tokom korišćenja i periode sa više ili manje intenzivnom aktivnošću emitovanja. Na slici 4.2, UMTS signal po nosiocu ispoljava duže periode kontinualnog emitovanja u posmatranom periodu, uz promenljivu predajnu snagu [100]. Saobraćaj prenosa podataka preko WLAN mreže odvija se po paketu, što je vidljivo u vremenskom domenu (slika 4.3). UE emituje sa istim nivoom snage, a periodi prenosa zavise od dužine paketa koji se prenose kao i od modulacione tehnike koja se koristi za prenos.



Slika 4.1 Signal prenosa podataka na radio interfejsu u uplinku preko GSM mreže, sekvenca trajanja 1 s



Slika 4.2 Signal prenosa podataka na radio interfejsu u uplinku preko UMTS mreže, sekvenca trajanja 1 s



Slika 4.3 Signal prenosa podataka na radio interfejsu u uplinku preko WLAN mreže, sekvenca trajanja 1 s

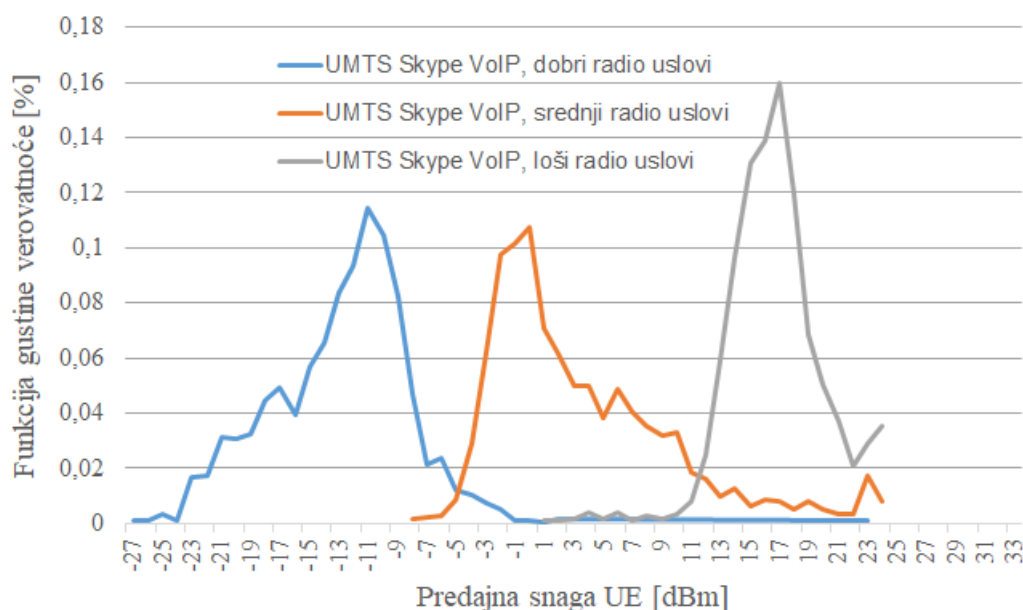
U okviru jedne tehnologije primenjuju se različite tehnike da bi se obezbedio dobar prijem signala i kvalitet servisa, kao i dobre performanse po pitanju snage, odnosno potrošnje električne energije. Ove tehnike uključuju kontrolu snage, QoS (Quality of Service) prioritizaciju, tranzicije između stanja, diskontinualni prenos i raspoređivanje u zavisnosti od opterećenja. Govorni saobraćaj se digitalizuje i kodira kodecima za govor koji su specifični za određenu tehnologiju. Procedure koje izvršavaju niži slojevi OSI modela (Open Systems Interconnection Model) služe za prilagođavanje signala uslovima kanala i obuhvataju kodiranje kanala, interliving, adaptivnu modulaciju itd. Procedure koje su specifične za pojedine tehnologije su, na primer, formiranje bursta, enkripcija, širenje signala i skrembling.

Jasno je da izgled signala na radio interfejsu zavisi od kompleksnih procedura i uslova. U okviru tehnologije, opterećenje mreže i trenutni radio uslovi predstavljaju dominantne faktore. U opterećenoj mreži postojaće manjak resursa, te se resursi onda dodeljuju prioritizovanom saobraćaju, što drugim tipovima saobraćaja nameće veće kašnjenje u prenosu. Radio uslovi diktiraju stepen modulacije i količinu zaštitnih bita koji se umeću, kako bi se obezbedilo ispravno dekodovanje, što u sprezi sa protokolima viših slojeva takođe utiče na izgled signala.

4.3 Kontrola snage

Veličina emitovane snage u pojedinim trenucima takođe zavisi primarno od tehnologije. 3GPP sistemi koriste mehanizam kontrole snage koji služi za to da obezbedi najbolje performanse po pitanjima pokrivanja i kapaciteta. Korišćenjem ovog mehanizma, pristupna radio mreža instruiira korisnički uređaj da koristi više ili manje snage u zavisnosti od uslova radio kanala i zahtevanog servisa. Što je korisnik dalje od bazne stanice (dakle, sa lošijim prijemom), to će korisnički uređaj morati da emituje višom snagom kako bi bazna stanica mogla pravilno da dekoduje signal. Što je korisnik bliže baznoj stanici (dobri radio uslovi), korisnički uređaj mora da emituje sa nižom snagom kako ne bi ometao signale drugih korisnika. U UMTS-u, zahtevni servisi poput slanja velike količine podataka zahtevaju više snage. U GSM-u korisnički uređaj obično koristi više snage za servis prenosa govora i za SMS (Short Message Service), slika 4.4, da bi se obezbedio dobar prijem. Kod GSM sistema se instrukcije kontrole snage daju približno dva puta u sekundi, kod UMTS-a je ova učestanost 1500 puta u sekundi, a kod LTE-a oko 1000. WLAN sistemi generalno nemaju ovu vrstu kontrole snage i korisnički uređaj emituje unapred definisanom snagom. Maksimalni nivoi predajne snage korisničkih uređaja predmet su propisa i razlikuju se od tehnologije do tehnologije.

Slika 4.4 ilustruje uticaj mehanizma kontrole snage u UMTS-u prilikom korišćenja servisa prenosa govora preko Skype aplikacije. Rezultati, odbirci predajne snage korisničkog uređaja, dobijeni su korišćenjem *drive-test* alata (specijalizovani softver koji beleži radio parametre na korisničkom uređaju) i provereni su korišćenjem zadatih mrežnih izveštaja. Slika 4.4 prikazuje profil snage korisničkog uređaja kada se preko njega koristi isti servis u različitim radio uslovima. Može se videti da se profil korišćene snage pomera ka višim vrednostima kako se korisnički uređaj udaljava od bazne stanice i kako opada nivo prijemnog signala.



Slika 4.4 Odbirci predajne snage UE za prenos govora putem Skype aplikacije preko UMTS mreže u dobrim, srednjim i lošim radio uslovima

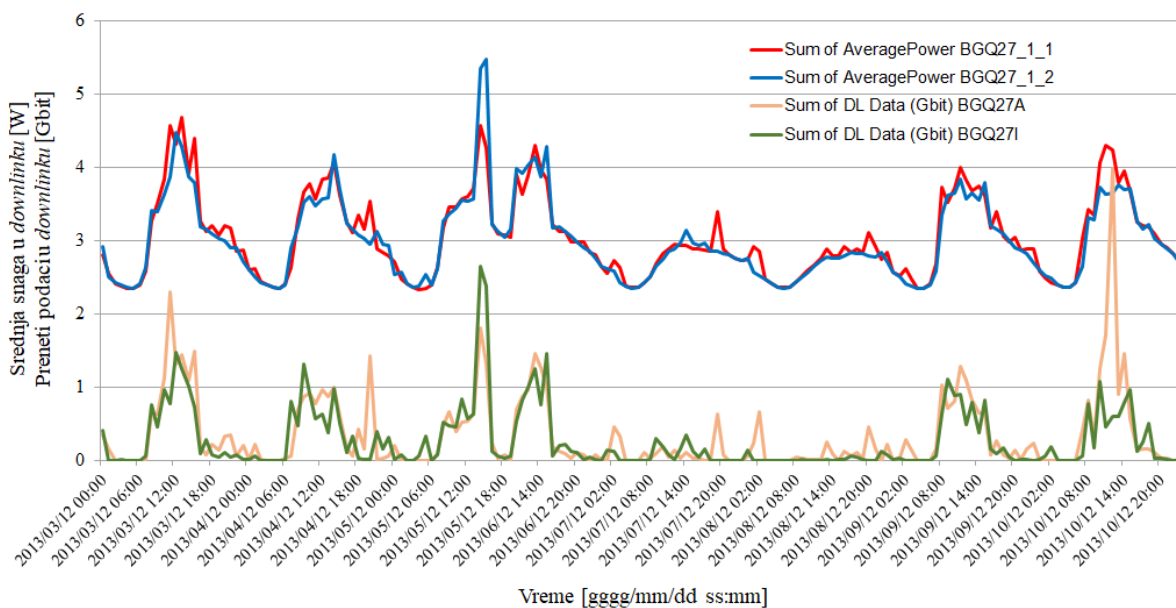
Nakon što se utvrdi kada i kako korisnički uređaj emituje, neophodno je znati gde se uređaj nalazi relativno u odnosu na ljudsko telo i koje su karakteristike tela, kako bi se sagledala energija koja se apsorbira u telu. Ovi parametri sadržani su u stvarnom SAR-u.

Stvarni SAR može se dobiti numeričkim simulacijama za različite karakteristike tela (modeli deteta i odraslog) i stavove tela (stajući i sedeći), za različite modele korisničkih uređaja i pretpostavljenu poziciju uređaja relativno u odnosu na telo (glava, krilo, ruka). Ova vrednost zavisi od frekvencije i proporcionalna je kvadratu intenziteta unutrašnjeg električnog polja. SAR se može normalizovati na 1 W izlazne snage uređaja [101], što dalje omogućuje evaluaciju stvarnog SAR-a u različitim slučajevima korišćenja bez izvršavanja simulacija za svaki slučaj. Da bi se poredili različiti načini upotrebe mobilnog uređaja, sa uređajem koji je blizu glave ili u ruci blizu trupa, koriste se vrednosti SAR za celo telo, dobijene kroz simulacije i normalizovane na snagu izvora od 1 W.

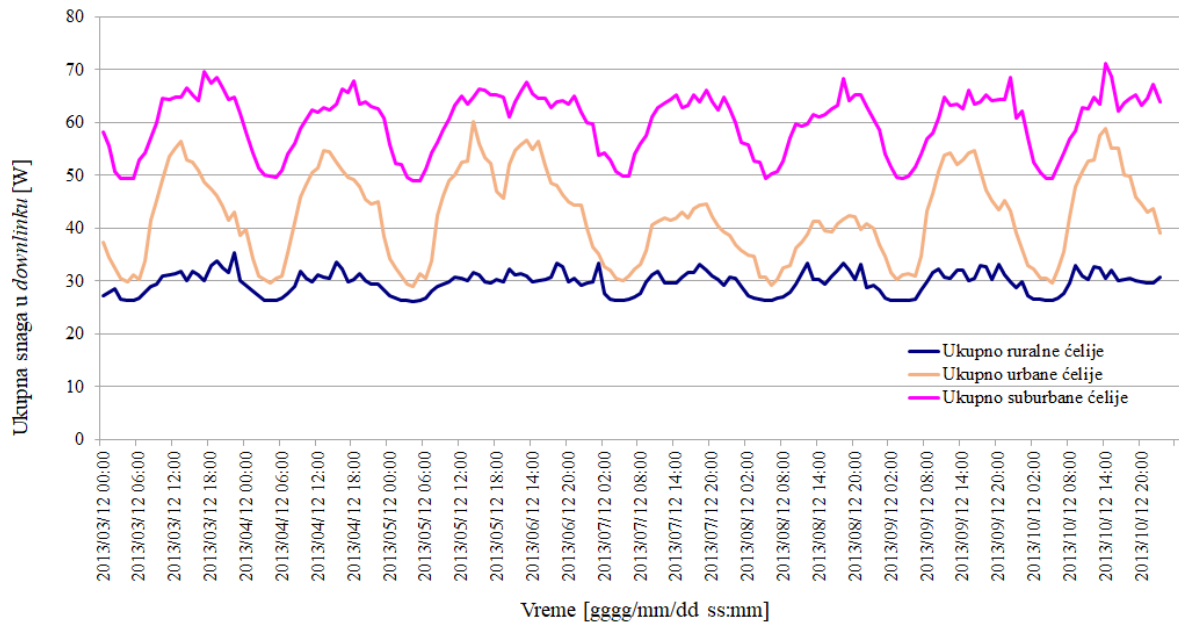
4.4 Analiza snage u *downlinku*

Na EM izloženost u *downlinku* utiču svi EM talasi koji dolaze od svih baznih stanica u okruženju. Po propisima za izloženost radio talasima mobilnih sistema, granice se postavljaju na osnovu izvedenih veličina koje se mogu izmeriti na terenu kako bi se dokazala usklađenost sa propisima. Ukupan intenzitet električnog polja se obično meri u različitim tačkama, posebno blizu novoinstalirane bazne stanice. Vrednosti dobijene na terenu se zatim porede sa vrednostima dobijenim kroz teorijski proračun, da bi se dokazalo da su ispod granica koje definišu propisi.

Intenzitet električnog polja u određenoj tački u prostoru se menja, kako se stanje mreže i radio uslovi menjaju, sa varijacijama opterećenja mreže i sa brzim fadingom. Kao ilustracija promenljivosti snage u zavisnosti od opterećenja mreže (koje određuje broj povezanih korisnika i servisi koje oni zahtevaju), slika 4.5 prikazuje srednju snagu u *downlinku* i prenete podatke u *downlinku*, kao funkciju vremena za UMTS mikro ćeliju instaliranu unutar objekta, za dva nosioca u sektoru. Podaci su uzeti iz mrežne statistike. Korelacija između prenetih bita i snage emitovane u *downlinku* je jasno vidljiva [88]. Emitovana snaga meri se na konektoru antene. Vidi se i visoka varijacija srednje satne snage u petak, oko 3,6 dB, i mala varijacija u toku vikenda, oko 0,8 dB. Slika 4.6 prikazuje ukupnu snagu u *downlinku* uprosečenu po satu, po tipu područja – urbano, suburbano i ruralno. Odabrane suburbane ćelije imale su najvišu satnu srednju vrednost predajne snage.



Slika 4.5 Srednja snaga u *downlinku* i prenete podatci u *downlinku* za UMTS mikro ćelije



Slika 4.6 Ukupna snaga u downlinku po tipu područja

U ovom istraživanju su za analizu incidentnog električnog polja u *downlinku* korišćena frekvencijski selektivna merenja da bi se izmerio ukupan srednji intenzitet električnog polja u frekvencijskom opsegu, a koje potiče od svih okolnih baznih stanica svake od mobilnih tehnologija.

4.5 Merenja predajne snage u *uplinku*

Predajna snaga korisničkog uređaja u *uplinku*, u 3GPP sistemima, predmet je instrukcija koje bazna stanica prenosi kroz mehanizam kontrole snage. Da bi se optimizovalo pokrivanje i iskorišćenost bežičnih resursa, mreža proračunava potrebnu snagu UE. Radio uslovi menjaju se i kad se korisnik ne kreće, usled brzog fedinga, promene sveukupnog stanja opterećenja mreže (drugi korisnici i njihovi servisi i kretanje utiču na dodelu bežičnih resursa). Snaga koja se koristi za prenos u *uplinku* adaptira se ovim uslovima i takođe se menja čak i bez kretanja. Ako se korisnik kreće, dolazi do ivice ćelije i stupa u *handover*, menjajući baznu stanicu koja ga opslužuje ili dodajući još jednu stanicu koja ga opslužuje (meki *handover* u UMTS-u), njegova predajna snaga menja se još više. Stoga, predajna snaga u *uplinku* se može snimiti na statističkoj osnovi, uzorkovanjem odnosno snimanjem odbiraka. Moguće je koristiti podatke koje obezbeđuje sam korisnički uređaj ili spoljnu opremu za merenje.

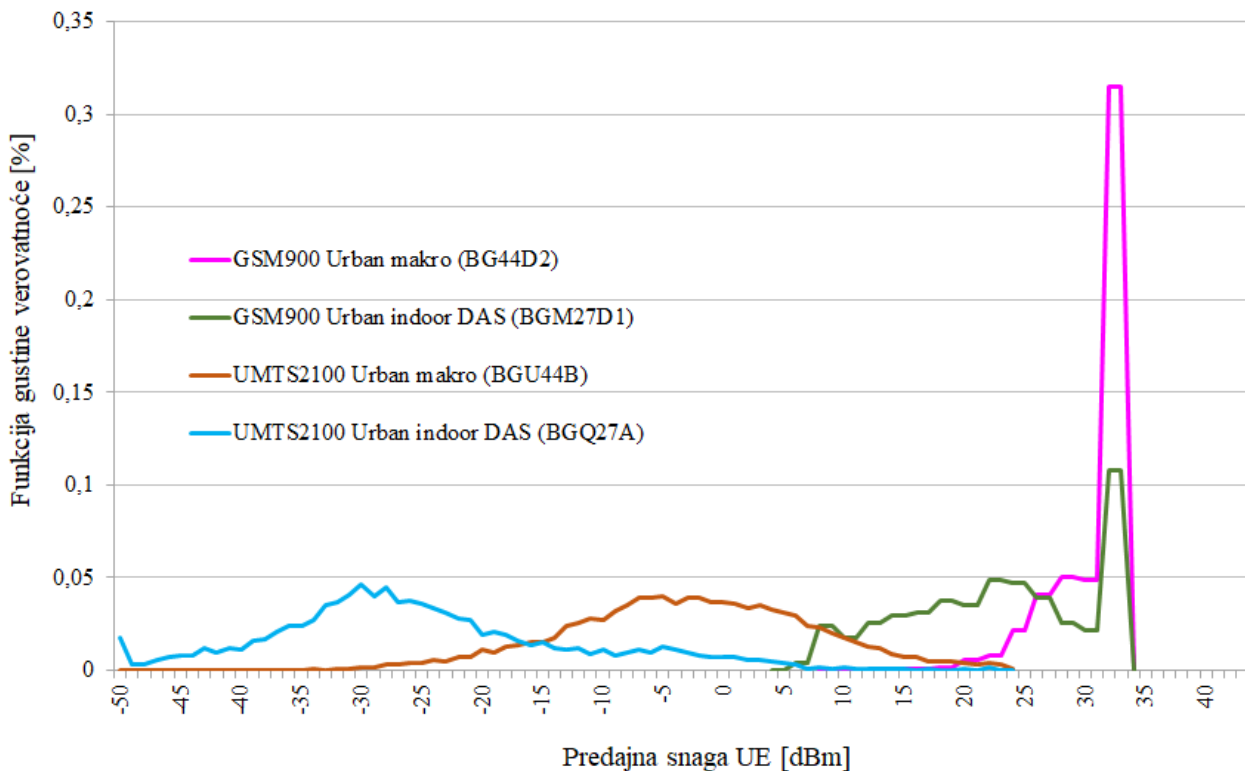
Antena korisničkog uređaja je omnidirekciona antena, odnosno nije direktivna, jer korisnički uređaj nema saznanja o tome gde se nalazi bazna stanica koja ga opslužuje tako da mora da uhvati sve signale koji dolaze iz različitih smerova, a takođe mora da emituje u svim smerovima. Korisnik je u bliskom polju antene i za datu predajnu snagu UE se apsorpcija EM talasa u telu, ili u delovima tela (glava, udovi), može proceniti korišćenjem simulacija. Ovo daje osnovu za realističnu procenu izloženosti EM polju u različitim scenarijima, gde bi bilo neizvodljivo sprovesti laboratorijska merenja apsorpcije u modelu ljudskog tela (fantomu).

Predajna snaga korisničkog uređaja može se meriti na više načina, pri čemu svaki ima svoje prednosti i nedostatke. Jedan način da se zabeleži izračena snaga jeste da se stavi sonda vrlo blizu korisničkog uređaja i da se beleže odbirci snage sa odgovarajućim periodom odabiranja [85]. Na ovaj način može se meriti električno polje za različite vrste korišćenja, ali merenja ne mogu da pokriju sve tačke u blizini antene koje bi odgovarale tačkama ljudskog tela koje je izloženo EM talasima. Ovaj metod se stoga može koristiti u svrhe poređenja, za različite slučajeve korišćenja. Procena izloženosti zahtevala bi ekstrapolaciju da bi se dobila gustina snage u svim tačkama zamišljenog ljudskog tela i

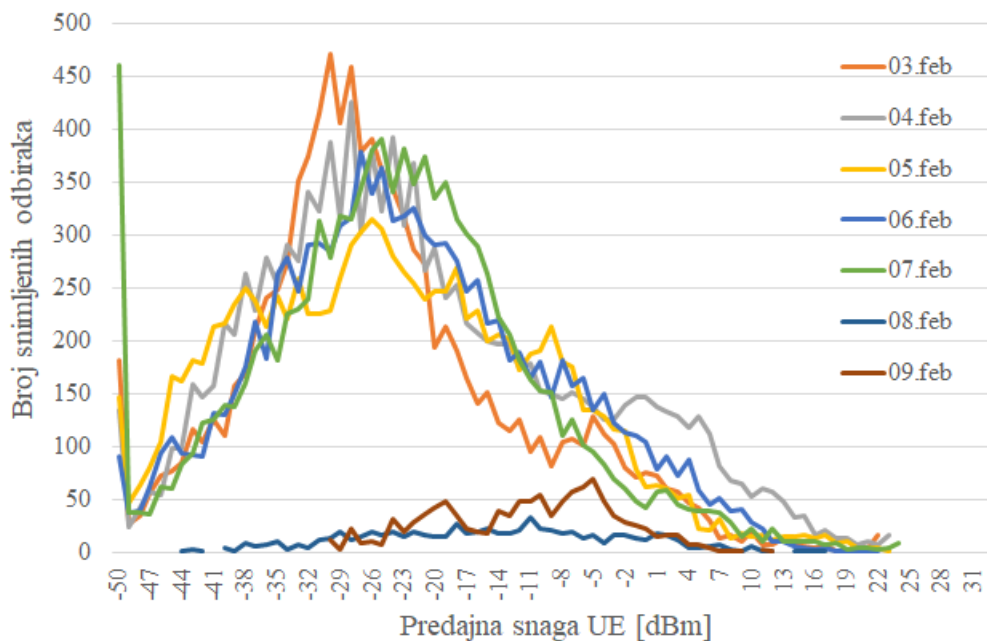
onda procenila apsorpcija uzimajući u obzir karakteristike tela. Drugi način je da se koristi specijalizovani *drive-test* softver instaliran na korisničkom uređaju, ili instaliran na posebnom hardveru koji je povezan sa korisničkim uređajem, kako bi se zabeležila predajna snaga korisničkog uređaja. Predajna snaga je snaga koju predajnik predaje anteni, tako da je izračena snaga jednaka predajnoj snazi skaliranoj za dobitak antene. Dalje, odbirci predajne snage mogu se zabeležiti korišćenjem mrežnih izveštaja koji se zadaju sa sistema za nadzor mreže, bilo na nivou korisnika ili na nivou cele ćelije, koji sadrže podatke koje šalju UE. Izveštaji UE sadrže odbirke snage za određenog korisnika i njegovu stvarnu upotrebu uređaja u nekom periodu. Izveštaji na ćelijском nivou sadrže odbirke snage statističkog uzorka korisnika, koji se formira na osnovu preporuka i predmet je metoda/algoritama koji su specifični za pojedinog proizvođača opreme.

Slike u nastavku prikazuju varijacije predajne snage UE (UE TX power) sa promenom različitih faktora koji uključuju tehnologiju, vreme odnosno opterećenje mreže, stanje *handovera*, radio uslove. One ilustruju kompleksnost radio okruženja koja utiče na profil snage UE i na izloženost EM talasima u *uplinku*.

Slika 4.7 prikazuje snagu UE Tx za četiri ćelije merenu u satima visokog opterećenja u februaru. Februar je u grupi meseci kada korisnici uglavnom borave u svom mestu boravka ili rada, za razliku od meseci godišnjeg odmora koji imaju niže opterećenje mreže. Dve ćelije su sa GSM tehnologijom, spoljna makro ćelija (BG44D2) i unutrašnja mikro ćelija sa distribuiranim antenskim sistemom (BGM27D1), čije je pokrivanje „ispod“ pokrivanja makro ćelije. Druge dve ćelije su sa UMTS tehnologijom, ponovo spoljna makro ćelija (BGU44B) i unutrašnja mikro ćelija sa distribuiranim antenskim sistemom (BGQ27A). Najpre, preko GSM ćelija korisnički uređaji emituju većim snagama nego preko UMTS-a, usled razlika u tehnologijama. Zatim, kod svake od tehnologija je srednja predajna snaga korisničkog uređaja kada koristi mikro ćeliju manja nego kad koristi makro ćeliju. Mikro ćelija je bliže korisnicima tako da njihovi uređaji emituju manjim snagama.

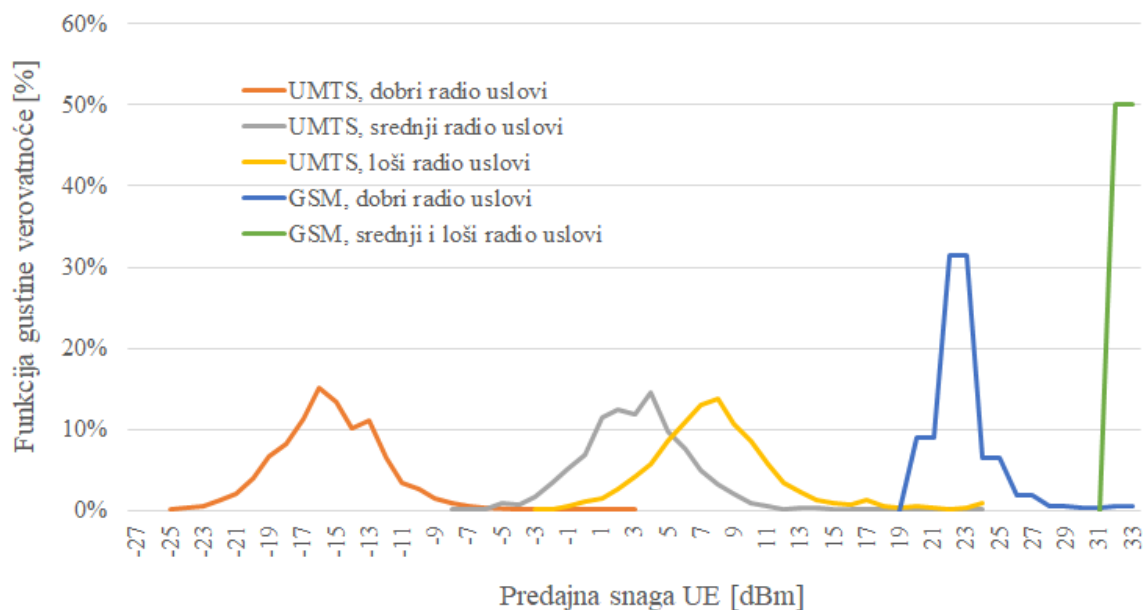


Slika 4.7 Funkcija gustine verovatnoće za odbirke predajne snage UE u 2G i 3G ćelijama, makro i mikro (DAS) ćelijama



Slika 4.8 Predajna snaga UE na nivou ćelije i broj snimljenih odbiraka za UMTS mikro stanicu sa DAS-om unutar objekta, u satima visokog opterećenja mreže

Slika 4.8 prikazuje profil snage u vreme visokog opterećenja, u isto doba dana, 7 dana zaredom, za istu UMTS mikro ćeliju. Svaki dan karakteriše slična ali ipak različita raspodela odbiraka snage, pri čemu dani vikenda imaju više profile snage i manje zabeleženih odbiraka budući da mikro ćelija pokriva poslovnu zgradu. Ona je prazna u vreme vikenda i jedini korisnici koji su povezani na mrežu preko nje su oni na ivici ćelije. Ako dalje poredimo satnu statistiku po danu, možemo izvesti zaključke o ponavljajućim obrascima tokom sati visokog i niskog opterećenja. Stoga, kada se merenja koja se ponavljaju vrše u određenim satima određenih dana, statističko ponašanje opterećenja mreže, koje utiče na profile snage korisničkih uređaja, može se smatrati stacionarnim.



Slika 4.9 Predajna snaga UE za servis prenosa govora komutacijom kola preko GSM-a i UMTS-a u različitim radio uslovima

Slika 4.9 ilustruje razliku u nivoima snage kad se isti servis koristi u različitim radio uslovima i preko različitih tehnologija. Nivoi predajne snage UE su viši preko GSM-a, ali u okviru jedne tehnologije, za obe tehnologije, degradacija radio uslova dovodi do viših predajnih snaga UE. Prijemni signal pada kako se UE udaljava od bazne stanice i bazna stanica instruiira UE da poveća snagu kako bi signal UE mogao da stigne do bazne stanice i da bude ispravno protumačen. Kod GSM-a, UE emituje na najvišem nivou snage, kako je definisano klasom snage UE, čak i u srednjim radio uslovima.

Nedostatak merenja koja se izvode *drive-test* alatom ili sakupljaju putem zadatih mrežnih izveštaja jeste da odbirci u opštem slučaju sadrže nivoe snage zabeležene onda kada je korisnički uređaj emitovao signal, bez tačne naznake o periodima tišine između emitovanja. Srednja vrednost snage emitovane u nekom periodu je srednja vrednost nenultih zabeleženih odbiraka snage pomnožena sa faktorom aktivnosti. Drugim rečima, faktor aktivnosti skalira na dole srednju vrednost odbiraka i tako se dobija statistička srednja vrednost predajne snage. Ovako statistički usrednjena snaga može se dalje pomnožiti sa normalizovanom vrednošću SAR (za tačne uslove) i vremenom posmatranja da bi se dobila primljena doza izloženosti. Faktor aktivnosti za različite servise preko različitih tehnologija (GSM, UMTS) i u različitim radio uslovima može se izmeriti korišćenjem laboratorijske opreme [102], na terenu, tako što se sonda postavlja veoma blizu korisničkog uređaja.

WiFi mreže nisu 3GPP sistemi i koriste različite mehanizme za bežični prenos. Nema klasične kontrole snage, snaga pristupne tačke i WiFi klijenta na korisničkom uređaju se unapred postavlja, najčešće na 50 mW. Stoga je potrebno obaviti merenja faktora aktivnosti da bi se dobila srednja vrednost predajne snage u posmatranom periodu korišćenja.

4.6 Uticaj arhitekture: makro, mikro i femto ćelije

Uticaj promena arhitekture na izloženost EM polju [96], odnosno promene topologije pristupne radio mreže, mogu se evaluirati u scenariju u kom se mala ćelija dodaje da se poboljša pokrivanje ili kapacitet. Varijacije izloženosti mogu se posmatrati na nivou osobe ili na nivou populacije u nekom području. U oba slučaja se u obzir moraju uzeti i izloženost u *uplinku* i izloženost u *downlinku*.

Izloženost pojedinca veoma zavisi od njegove pozicije u ćeliji preko koje je povezan sa mrežom. Jačina signala dominantne ćelije može varirati nekoliko redova veličine u području koje opslužuje ćelija. Signali okolnih ćelija se takođe menjaju u vremenu. Varijacija primljenog signala od spoljne bazne stanice posebno se može osetiti u zatvorenom prostoru, jer sa veoma malim kretanjem, npr. kroz različite sobe jednog stana, jačina signala može veoma varirati usled apsorpcije u zidovima. Sa druge strane, promena snage korisničkog uređaja zavisi od primljenog signala, budući da on služi za evaluaciju radio uslova na putanji do bazne stanice – što je gori primljeni signal, to će korisnički uređaj emitovati jačom snagom. Kada se mala ćelija stavi u zatvoren prostor, ona doprinosi povećanju snage signala u *downlinku*, ali takođe i smanjenju predajne snage korisničkih uređaja – relacija između ove dve komponente određuje da li ukupna izloženost neke osobe u području pokrivanja pada ili se podiže, u poređenju sa slučajem kada je prisutno samo makro pokrivanje. Globalna izloženost populacije u području zavisi od pozicije svih korisnika, njihovih servisa, opterećenja mreže. Može se posmatrati na statistički način, budući da nije moguće snimiti sve varijacije signala, pozicije korisnika, korišćene servise.

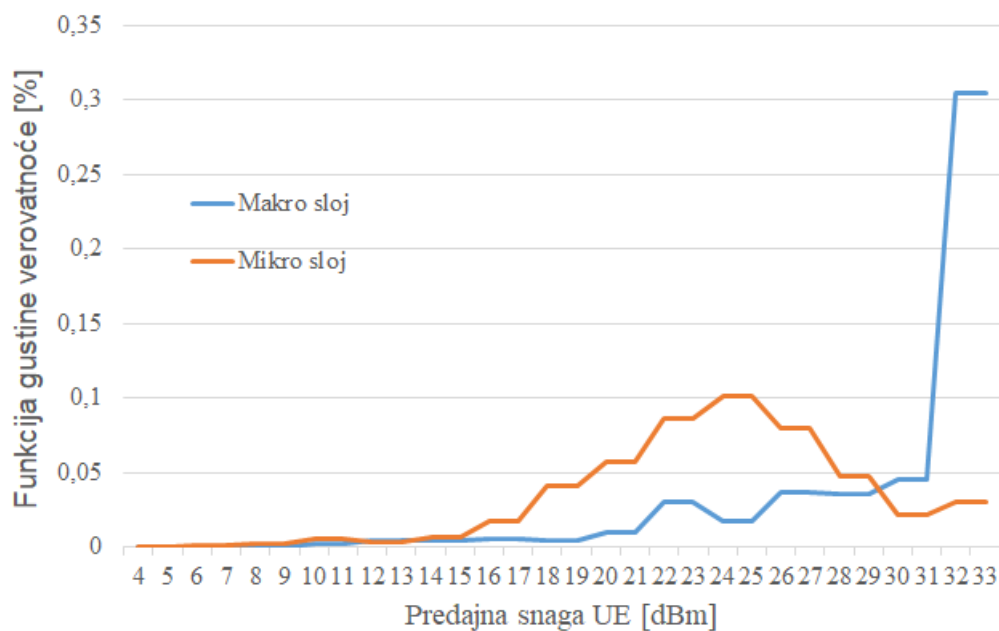
4.6.1 Dodavanje mikroćelije sa *indoor* DAS sistemom

Distribuirani antenski sistem, DAS, za unutrašnju montažu smatra se unutrašnjom malom ćelijom. Zatvoreni prostor pokriva se sa više prostorno raspoređenih antena koje su povezane sa zajedničkom baznom stanicom korišćenjem RF antenskih kablova. Ukupna predajna snaga bazne stanice deli se između antena što obezbeđuje dobro pokrivanje unutar objekta, uz manje ukupno

potrebne snage i sa manjom izračenom snagom po anteni. Može se implementirati i korišćenjem pasivnih splitera i fidera do antena ili dodavanjem aktivnih elemenata da bi se prevazišli gubici u fider kablovima, a može se implementirati i sa udaljenim radio jedinicama koje se nalaze uz antene a optikom su povezane sa baznom stanicom. U konfiguraciji sa pasivnim elementima i udaljenim antenama, po pitanju *downlinka* DAS obično ima slične karakteristike kao mikro bazna stanica sa jednoantenskim rešenjem. Sa druge strane, povezivanje više udaljenih antena RF kablovima može uneti dodatne gubitke u *uplinku*, u zavisnosti od dužine kabla. Ovo može imati za posledicu više predajne snage UE u poređenju sa slučajem sa jednom antenom blizu mikro bazne stanice.

Dodavanje mikro sloja korišćenjem unutrašnjeg DAS sistema je evaluirano u dva objekta, pri čemu je DAS sistem u poslovnoj zgradi Lola bio samo sa pasivnim elementima do antena, dok je DAS sistem na Elektrotehničkom fakultetu bio sa udaljenim radio jedinicama uz antene.

Odbirci predajne snage korisničke opreme uzeti su iz mrežnih izveštaja, zadatih kroz sistem za upravljanje mrežom [100], za tehnologije GSM i UMTS. Oni sadrže statistiku na ćelijskom nivou, prikupljenu iz Layer 3 poruka u kojima korisnička oprema šalje podatke o snazi predajnika. Odbirci intenziteta električnog polja za *downlink* snimljeni su korišćenjem prenosivog mernog sistema koji se sastoji od analizatora spektra i antene u formi izotropnog radijatora. Sistem je napravljen za frekvencijski selektivna merenja intenziteta električnog polja u frekvencijskom opsegu od 30 MHz do 3 GHz. Merenja su izvršena na određenom broju pozicija unutar dve zone u objektima o interesa, sa uključenim i isključenim mikro ćelijama.



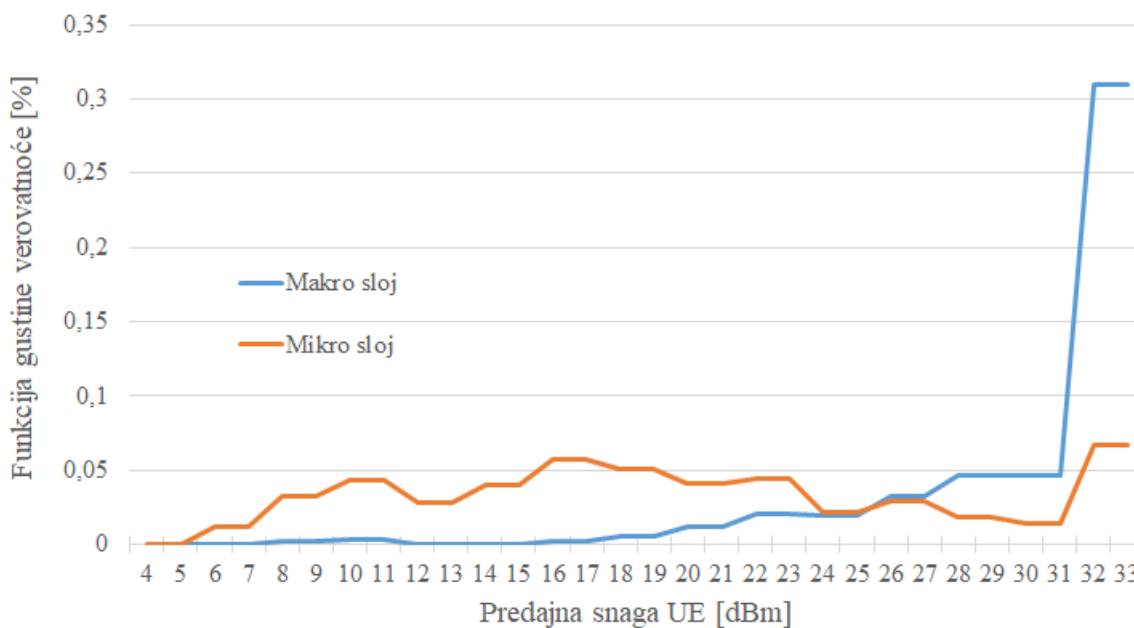
Slika 4.10 Predajna snaga UE na nivou ćelije za govorni servis preko tehnologije GSM900, za makro ćeliju i „podvučenu“ mikro ćeliju u objektu Elektrotehničkog fakulteta

Slika 4.10 prikazuje, za govorni servis preko GSM tehnologije na 900 MHz, profile snage u *uplinku* za spoljnu makro ćeliju i „podvučeni“ unutrašnji DAS sistem koji pokriva zgradu tehničkih fakulteta, monumentalnu građevinu koja se uzdiže oko 4 unutrašnja dvorišta. Makro ćelija pokriva zgradu, ali pokriva i okolne objekte i otvoren prostor urbane poslovne i šoping zone. Profil snage je funkcija gustine verovatnoće odbiraka predajne snage UE uzetih iz zadatih mrežnih izveštaja. Ovi izveštaji, na ćelijskom nivou, sadrže odbirke snage za reprezentativni skup korisnika. Profil makro ćelije uzet je za slučaj kada je mikro ćelija bila isključena, tako da su korisnici u ciljnoj zgradi bili povezani sa makro ćelijom. Profil stoga sadrži statistički uzorak svih korisnika koji su bili priključeni na makro ćeliju, uključujući korisnike koji su bili u zgradi. Možemo pretpostaviti da je skup ovih korisnika, usled radio uslova kakvi su unutar objekata, imao barem sličnu raspodelu predajne snage

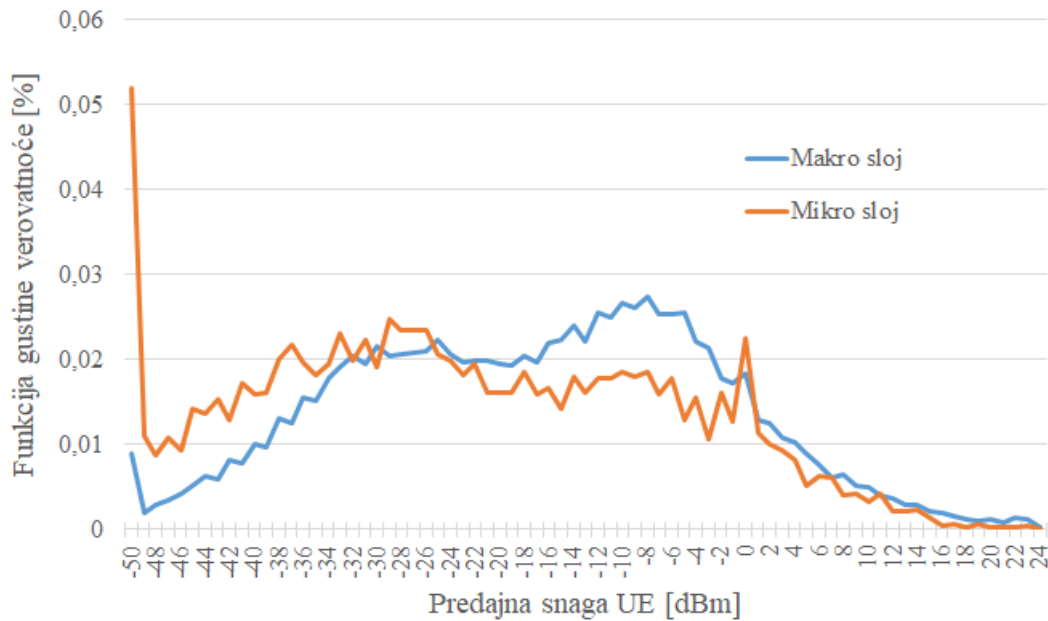
UE kao ukupan skup koji sadrži i druge korisnike povezane sa makro ćelijom, a verovatnije, da je imao lošiju raspodelu odnosno sa većim brojem odbiraka sa višim nivoima predajne snage. Odbirci snage samo za ove korisnike u zgradi nisu se mogli izdvojiti iz statistike na nivou ćelije. Oni bi se mogli dobiti iz mreže korišćenjem alata sa geolokacijom ili bi se mogli proceniti izvođenjem skupa merenja po korisniku na određenim pozicijama u zgradi. Kada se mikro ćelija uključi, profil snage makro ćelije se ne promeni mnogo, budući da korisnici u zgradi ne utiču znatnije na statistički uzorak svih korisnika u zoni pokrivanja makro ćelije. Slika 4.10 pokazuje da korisnici u zoni pokrivanja mikro ćelije u proseku koriste manje predajne snage nego kad su povezani sa makro ćelijom.

Slika 4.11 prikazuje, za govorni servis preko tehnologije GSM na 900 MHz, profile snage u *uplinku* za spoljnu makro ćeliju i “podvučeni” unutrašnji DAS sistem koji pokriva drugi objekat, modernu poslovnu zgradu Lola u urbanoj poslovnoj i šoping zoni. Makro ćelija pokriva zgradu, a takođe i okolne poslovne i rezidencijalne zgrade i ulice u zoni. Ponovo je profil mikro ćelije sa nižim nivoima snage u poređenju sa profilom snage u *uplinku* kad su korisnici povezani sa makro ćelijom. I dok profili makro ćelija na slikama 4.10 i 4.11 izgledaju slično, profili mikro ćelija se razlikuju, što je posledica različitog prostornog rasporeda dve zgrade, različitog rasporeda antena, različitog grupisanja korisnika unutar objekata.

Ista vrsta merenja, zadati mrežni izveštaji, sprovedena je za UMTS ćelije. U ovim izveštajima za UMTS nije moguće razdvojiti odbirke po servisu. Slika 4.12 prikazuje profile snage za makro ćeliju kad je mikro isključena i za mikro ćeliju za lokaciju Elektrotehnički fakultet, opet sa jasno vidljivim nižim nivoima predajne snage UE koje se koriste u mikro ćeliji.



Slika 4.11 Predajna snaga UE na nivou ćelije za govorni servis preko tehnologije GSM900, za makro ćeliju i “podvučenu” mikro ćeliju unutar zgrade Lola



Slika 4.12 Predajna snaga UE na nivou ćelije za servise prenosa govora komutacijom kola i prenosa podataka komutacijom paketa preko UMTS-a, za makro ćelije i “podvučene” mikro ćelije unutar objekta Elektrotehničkog fakulteta

Vrednosti srednjeg intenziteta električnog polja izmerene na terenu pokazuju povećanje nivoa sa dodavanjem mikro sloja, odnosno povećanu izloženost u *downlinku*, što je očekivano budući da smo dodali još jedan izvor EM zračenja.

4.6.2 Femtoćelija i makroćelija

Femtoćelije se obično instaliraju unutar domova, na prvom mestu da bi se poboljšalo pokrivanje. One koriste fiksnu širokopojasnu konekciju kao okosnicu, a po zoni pokrivanja otprilike odgovaraju kućnom WiFi-ju. Glavna razlika u odnosu na kućni WiFi po pitanju EM izloženosti jeste ta da femtoćelija ima mehanizme kontrole snage kao bilo koja druga bazna stanica mobilne mreže standardizovane od strane 3GPP. Stoga instalacija femtoćelije ne samo da poboljšava snagu signala u unutrašnjosti objekta, već i smanjuje predajnu snagu korisničkih uređaja. Sa druge strane, WLAN klijenti koji se povezuju sa kućnom pristupnom tačkom za WiFi uvek koriste istu predajnu snagu.

Kada je pokrivanje makroćelije u unutrašnjosti objekta loše, dodavanje femtoćelije će povećati intenzitete električnog polja unutar stana, ali će takođe omogućiti da se koriste dosta manje predajne snage korisničkih uređaja, budući da je bazna stanica blizu korisnika. Kada je pokrivanje makroćelije dobro, dodavanje femtoćelije će manje smanjiti predajnu snagu UE i svakako će doprineti izloženosti u *downlinku*.

Studija predstavljena u [17] razmatra tri scenarija povezanosti korisničke opreme unutar zgrade, i to sa UMTS makroćelijom, UMTS femtoćelijom i WiFi pristupnom tačkom. Razmatrane su dve lokacije makro baznih stanica (blizu zgrade, dajući dobru vezu sa korisničkom opremom, i daleko od zgrade, dajući lošu vezu odnosno slab signal) i dva srednja vremena razgovora preko telefona (visoka i niska aktivnost). Evaluirana je ukupna doza izloženosti u *uplinku* i u *downlinku*, korišćenjem heurističkog mrežnog kalkulatora. Lokacije femtoćelije i pristupne tačke za WiFi određene su kao optimalne za pokrivanje sprata. Rezultati pokazuju da je u slučaju dobrog signala makroćelije bolje osloniti se na nju jer je ova veza generisala najnižu izloženost i za visoku i za nisku aktivnost telefona, u poređenju sa vezama sa femtoćelijom (nešto lošija) ili WiFi pristupnom tačkom, a sve pod krovom pokrivanjem makroćelije u *downlinku*. U slučaju loše veze sa makroćelijom, rešenje sa femtoćelijom je daleko najbolje, dajući više od 5000 puta manju izloženost za duže vreme razgovora i više od 3500

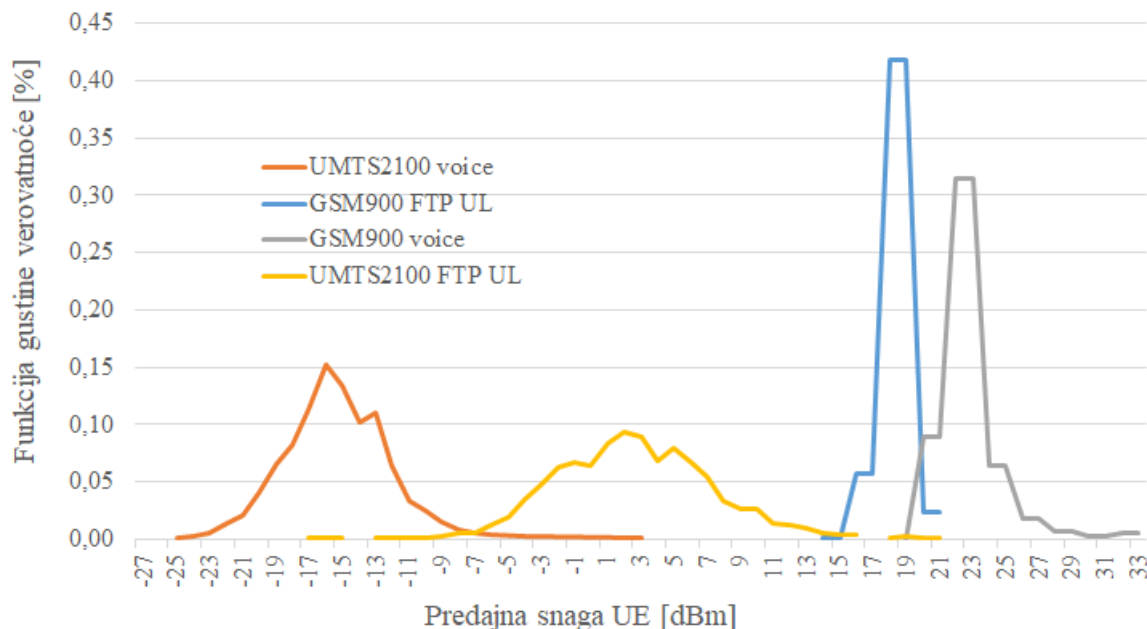
puta manju izloženost za kraće vreme razgovora. Ovo smanjenje je očekivano usled mehanizma kontrole snage u UMTS-u. WiFi ni u jednom slučaju nije preferirano rešenje po pitanju EM izloženosti.

4.7 Uticaj korišćenih servisa na izloženost EM polju

Zajedno sa spoljnim faktorima, uključujući tip mreže, topologiju i trenutno opterećenje, izloženost korisnika EM polju diktiraju i njegove sopstvene aktivnosti – kretanje, korišćenje različitih servisa i promena položaja tela.

Kada korisnik hoda, ulazi unutar objekata i izlazi napolje ili koristi prevozna sredstva, on menja svoju poziciju relativno u odnosu na mrežu i može prolaziti kroz područja sa dobrim, srednjim i lošim pokrivanjem, prelaziti između zona pokrivanja opterećenih i manje opterećenih ćelija, ulaziti u regije sa mekim ili tvrdim *handoverom*, menjati tehnologije. Sve ove promene utiču i na gustinu snage signala u *downlinku* i na predajnu snagu korisnikovog uređaja. Njegov stav tela dalje utiče na vrednost SAR odnosno na apsorpciju EM energije u telu.

Servis koji se koristi u određenom periodu vremena utiče na EM izloženost korisnika, u kombinaciji sa određenom tehnologijom koja se koristi, određenim radio i mrežnim uslovima. Ovde treba imati na umu da dostupna tehnologija i radio uslovi ograničavaju ili stimulišu servis. U dobrim radio uslovima, preko napredne tehnologije, korisnik je privučen da koristi napredne, zahtevne servise, npr. video striming. Preko slabije tehnologije ili u lošim radio uslovima, on je onemogućen da koristi ovakve servise čak i da želi. U dobrim uslovima, sa naprednim servisima, vreme korišćenja se povećava. Na kraju, čak i u dobrim radio uslovima i preko napredne tehnologije, uslovi sa kraja na kraj takođe diktiraju kvalitet servisa, protoke koji se mogu postići i odgovarajuće nivoe predajne snage i aktivnost na radio interfejsu [102].

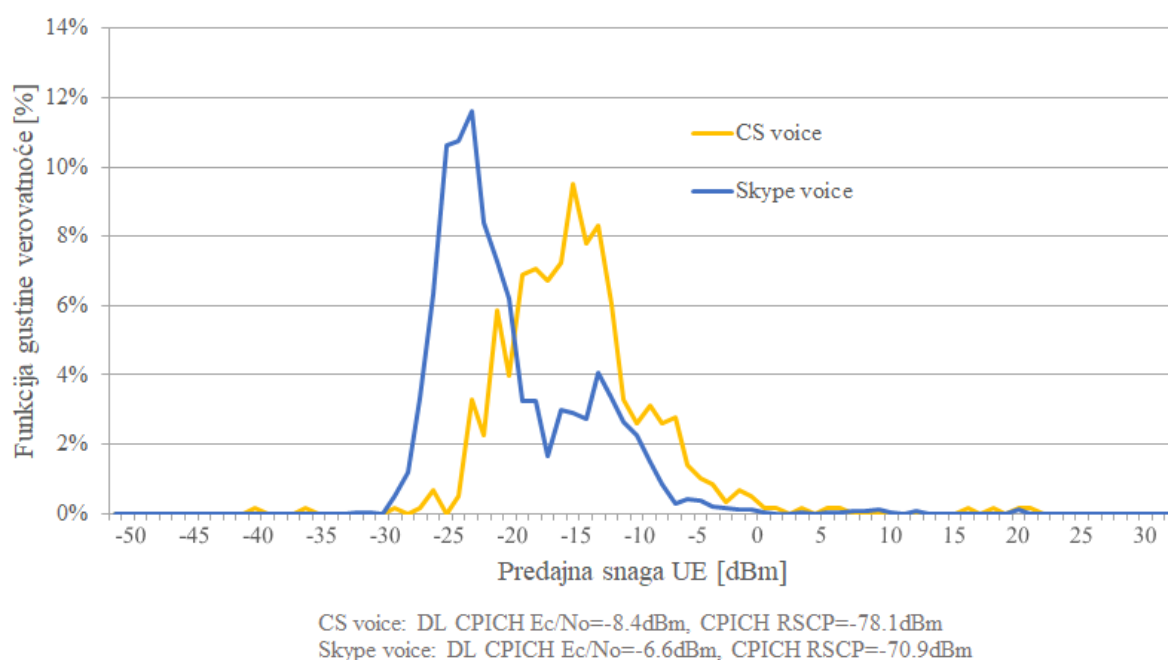


Slika 4.13 Predajna snaga UE za servis FTP upload i govorni servis na 2G i 3G ćelijama u dobrim radio uslovima tokom sati visokog opterećenja mreže

Slike 4.13 i 4.14 ilustruju uticaj korišćenog servisa i uticaj radio uslova na lokaciji mobilnog uređaja na njegovu predajnu snagu. Na slici 4.13, funkcija gustine verovatnoće snimljenih odbiraka

snage data je za dva tipa servisa, govorni servis i FTP (File Transfer Protocol) *upload*, preko dve tehnologije, u dobrim radio uslovima prema parametrima svake od tehnologija. Korišćena su merenja *drive-test* alatom. Najpre, razlika između tehnologija se jasno vidi – UMTS radi sa dosta manjim nivoima predajne snage UE u odnosu na GSM. Drugo, za iste radio uslove i preko iste tehnologije, različiti nivoi predajne snage se koriste za različite servise. Kod UMTS-a je FTP *upload* zahtevan servis koji iziskuje više snage. GSM ne omogućuje visoke protoke i koristi veću snagu da zaštiti govorni servis.

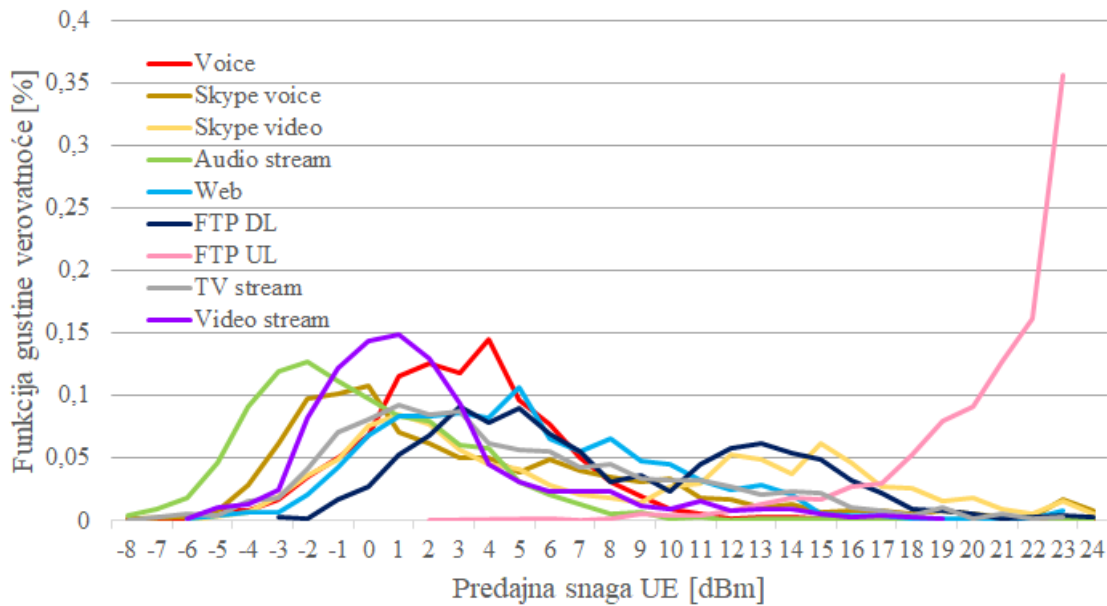
Slika 4.14 [96] prikazuje snimljene odbirke snage za govor preko komutacije kola (CS: circuit switched) i govor preko IP (Internet Protocol) protokola odnosno komutacije paketa (VoIP: Voice over Internet Protocol) preko UMTS mreže, u dobrim radio uslovima. Merenja su izvedena jedno za drugim, u satima visokog saobraćaja u urbanoj ćeliji, a tačni parametri odnosno uslovi za svako merenje su dati, E_c/N_0 (Energy per chip/Noise spectral density) i RSCP (Received Signal Code Power), ilustrujući promenljive radio uslove na istoj lokaciji u uzastopnim merenjima. CS govorni servis dao je u proseku veću vrednost odbiraka predajne snage UE u odnosu na Skype VoIP.



Slika 4.14 Predajna snaga UE za CS voice i Skype voice, preko 3G ćelija u satima visokog opterećenja i u dobrim radio uslovima – ista lokacija, različita UE, različito vreme

Slika 4.15 prikazuje snimljene odbirke snage za različite servise preko UMTS-a u srednjim radio uslovima. Servis FTP upload jasno dostiže najviše nivoe snage kod UMTS-a čak i u srednjim radio uslovima. Servis CS voice je generisao više nivoe predajne snage UE od servisa Skype VoIP, slično kao na slici 4.14, tj. u dobrim radio uslovima.

Za proračun stvarne srednje predajne snage UE, potrebno je uzeti u obzir periode u kojima nema emitovanja, odnosno pauze u emitovanju. Na srednju predajnu snagu UE tokom korišćenja određenog servisa, dakle na EM izloženost koja potiče od korisničkog uređaja, najviše utiču korišćena tehnologija, radio uslovi i korišćeni servis. Korisnici obično nisu svesni prva dva, osim u slučaju kad se servis značajno pogorša. Međutim, čak i u srednjim radio uslovima sa zadovoljavajućim kvalitetom servisa određeni servisi mogu generisati značajnu EM izloženost u *uplinku*.



Slika 4.15 Predajna snaga UE za različite servise preko UMTS mreže u srednjim radio uslovima

4.8 Zaključak

U ovom poglavlju su ilustrovani uticaji različitih faktora na EM izloženost pojedinca i populacije u nekom području. Glavni faktori koji oblikuju izloženost su korišćena tehnologija, radio uslovi u kojima se pojedinac nalazi i uslovi opterećenja mreže, zajedno sa korišćenim servisom pod ovim okolnostima. Arhitektura mreže, odnosno tehnologija i topologija koje se koriste za neku oblast, sa skupom mrežnih pravila, određuju ponašanje mreže za date fluktuacije saobraćaja u području i prema radio uslovima i uslovima opterećenja mreže za svakog pojedinačnog korisnika. U ovako kompleksnom okruženju sa stalnim i trenutačnim promenama i međuzavisnostima između pojedinih faktora koji utiču na EM izloženost može se izvršiti statistička analiza i na osnovu nje izvući zaključci.

Korišćena tehnologija uz procedure koje implementira i definisane nivoe snage i za bazne stanice i za korisničke uređaje igra glavnu ulogu po pitanju EM izloženosti. Za datu mobilnu tehnologiju, korišćenje malih ćelija ima za posledicu niže nivoe snage korisničkog uređaja, ali i povećanje ukupne snage u *downlinku*. Kod sistema koji nemaju kontrolu snage, korisnički uređaj emituje uvek istom snagom, a smanjenje razdaljine između uređaja i pristupne tačke može eventualno voditi promeni modulacije, odnosno faktora aktivnosti, i na taj način uticati na izloženost za dati servis. Za dati servis i datu arhitekturu, uslovi u vezi sa EM izloženošću se uvek menjaju jer se radio uslovi menjaju i kad se korisnik ne pomera, zatim usled kretanja korisnika, *handovera*, zahtevanog servisa, izbora korisnika (prebacivanje na WiFi, na primer).

Ovom preliminarnom analizom ćelijske statistike i merenja sa mreže i na terenu, sa *drive-test* alatom, utvrđeni su glavni faktori koji utiču na izloženost. Izloženost veoma zavisi od korišćenja bežičnih uređaja i od opterećenja mreže, pa prema tome zavisi i od doba dana (sati visoke opterećenosti ili ne), dana u sedmici (radni dan ili vikend) i u godini (sezona odmora ili ne). Statistika saobraćaja u mreži po satu i po danu prikupljena je nekoliko meseci kako bi se posmatrale varijacije i pravilnosti i prema tome izabrao testni period, tako da se uslovi u mreži za testne slučajeve mogu smatrati stacionarnim. Rezultati istraživanja prikazani u ovom poglavlju objavljeni su delom u petom poglavlju knjige „Low Electromagnetic Emission Wireless Network Technologies: 5G and beyond“ [96] i delom u članku „Experimental analysis of individual EMF exposure for GSM/UMTS/WLAN user devices“ u časopisu *Annals of telecommunications* [102].

5 RAZVOJ METODE ZA ODREĐIVANJE UKUPNE PROSEČNE IZLOŽENOSTI STANOVNIŠTVA I POJEDINCA ELEKTROMAGNETSKOM POLJU BEŽIČNIH TELEKOMUNIKACIONIH SISTEMA

Jedan od ciljeva ovog istraživanja bila je procena ukupne izloženosti stanovništva EM poljima koja potiču od mobilnih komunikacionih sistema oblikovanjem nove metode proračuna kojom bi se iskoristila velika količina podataka koji su dostupni, već prisutni u operativnoj mobilnoj mreži, i to koliko je god moguće u (gotovo) realnom vremenu. Ukupna izloženost kombinuje izloženost zračenju baznih stanica tj. pristupnih tačaka i izloženost zračenju korisničkih uređaja, na osnovu primljene doze zračenja odnosno prosečnog stvarnog SAR-a. Podaci dostupni u operativnoj mreži uključuju merenja snage u mrežnim izveštajima koji se generišu u realnom vremenu, ćelijsku statistiku u realnom vremenu i u dužem periodu i podatke o korišćenju (korisnici, njihove navike, korišćeni servisi i trajanje korišćenja, uređaji koje koriste), uz merenja na terenu izvedena u vreme testiranja, kao i podatke iz spoljnih izvora.

5.1 Cilj nove metode

Trenutno ne postoji metoda kojom bismo procenili stvarnu izloženost osobe ili populacije u nekom području elektromagnetskom polju koje potiče i od korisničkih uređaja i od baznih stanica, za stvarnu upotrebu mobilnih tehnologija, korišćenjem merenja iz operativne mreže, u realnom vremenu ili u dužem periodu, uzimajući u obzir korisnikovu dob i navike, stvarne servise koje koristi i stvarno vreme korišćenja. Nova metoda za proračun izloženosti razvijena u ovoj disertaciji ima za cilj da utvrdi stvarnu, ukupnu izloženost stanovništva EM polju baznih stanica i korisničkih uređaja. Nova metoda za proračun izloženosti koristi mrežna merenja iz realne mreže u realnom vremenu, kao i druge podatke koji su mogli da se dobiju iz operativne mreže, u statističkom obliku, uz podatke iz spoljnih izvora i merenja na terenu. Cilj je bio upotrebiti maksimalno mogući obim podataka iz mobilne mreže, uključujući podatke o stvarnim korisnicima i njihovom korišćenju mobilnih tehnologija pod stvarnim uslovima u mreži [103]. Srednja ukupna izloženost EM polju procenjuje se novom metodom uzimajući u obzir stvarne izloženosti i u *uplinku* i u *downlinku* i usrednjavanjem po populaciji i u vremenu. Izloženost koja potiče od korisničkih uređaja korisnika u blizini pojedine osobe se zanemaruje.

Osnova za određivanje srednje stvarne izloženosti populacije u nekom području je indeks izloženosti (EI) [15][89], definisan u projektu LEXNET [88][14]. Indeks izloženosti usrednjuje stvarni SAR tako što sabira primljene ukupne doze izloženosti (u *uplinku* i u *downlinku*), odnosno specifičnu brzinu apsorpcije SAR [19] u vremenu, po populaciji i po vremenu, po statističkim kategorijama. On kombinuje izloženost za različite kategorije populacije (deca/odrasli), za sve pristupne radio tehnologije (RAT), 3GPP i one koje nisu 3GPP, tipove ćelija (makro, mikro, piko, femto), okruženja (unutar objekata i na otvorenom), korisničke profile (intenzivno/umereno/slabo korišćenje), vrste korišćenja (govor, podaci), stavove tela (stojeći/sedeći) i korisničke uređaje (telefon/laptop), uzimajući u obzir više vremenskih perioda u kojima se ove veličine mogu smatrati stacionarnim. Kao što je prethodno napomenuto, proračun EI sa tačno korelisanim podacima potrebnim za usrednjavanje po konfiguracijama odnosno kombinacijama gornjih kategorija nije izvodljiv bez simulacija i aproksimacija. Procenti korisnika po konfiguracijama se u mobilnoj mreži zapravo stalno menjaju jer se, čak i da su korisnici statični, radio uslovi stalno menjaju, kao i zahtevani servisi, što uz podešavanje parametara prijema na mreži utiče na to preko kojeg RAT-a će korisnik

biti povezan sa mrežom, a u graničnim područjima, i na koji tip ćelije. Srednja predajna snaga korisničkog uređaja odnosi se na neko vreme korišćenja određenog servisa preko određenog uređaja za određeni segment korisnika, što znači da je potrebno imati korelaciju izmerene snage i korišćenog servisa radi kombinovanja sa odgovarajućim SAR-om. Ovu korelaciju moguće je uspostaviti uz simulacije [16], za pretpostavljenu raspodelu korisnika i korišćenih servisa, ili uz aproksimacije, ukoliko bi se za realne korisnike grupisane u kategorije korelirali radio parametri (predajna snaga) sa podacima o korišćenim servisima, uz pretpostavke o ostalim parametrima (populacija, okruženje, stav) ili korišćenje nekih prosečnih vrednosti. Zatim, pojam područja nije strogo geografski ograničen. Za simulaciju, to može biti definisano geografsko područje, ali je u modelu potrebno uzeti u obzir sve okolne ćelije, promene granica pokrivanja u realnom vremenu u odnosu na opterećenje mreže i radio uslove. Područjem se može smatrati oblast pokrivanja određenih ćelija, pri čemu granica nije konstantna u vremenu. Kako je već napomenuto u odeljku 2.4.3, za najprostiju podelu po kategorijama postoji više stotina kombinacija kategorija za koje bi bilo potrebno izmeriti predajnu snagu i vreme korišćenja.

Na osnovu definicije i koncepta indeksa izloženosti, zatim dostupnih podataka iz različitih sistema operativne mobilne mreže kao i iz spoljnih izvora, uključujući vrednosti SAR-a po konfiguracijama korisnika dobijene numeričkim simulacijama, razvijena je nova metodologija i izvedene su nove formule za određivanje srednjeg stvarnog SAR-a ($\overline{SAR}_{actual(area,population)}$) po populaciji u definisanoj zoni od interesa i u vremenu. U nekom periodu posmatra se populacija u nekom području koje predstavlja zonu pokrivanja jedne ili više ćelija koje po tipu mogu biti makro ćelije i/ili male ćelije, a po tehnologiji bilo koja od dostupnih mobilnih tehnologija.

Nova metodologija koristi merenja snage sa mreže, iz zadatih mrežnih izveštaja, i merenja na terenu, a takođe i dodatne podatke dobijene iz mobilne mreže – ćelijsku statistiku u dužem periodu za saobraćajne profile korisnika, stvarnu ćelijsku statistiku tokom posmatranog perioda (testiranja) za stvarno korišćenje servisa prenosa govora i podataka, podatke o korišćenju aplikacija sa sondi u *core* mreži, podatke iz signalizacionih poruka ili podatke iz sistema za analitiku korisnika za raspodelu korisnika po slojevima mreže, podatke o uređajima u mreži. Pored ovih podataka, koriste se i podaci iz spoljnih izvora – normalizovane vrednosti SAR-a dobijene numeričkim simulacijama, popis za raspodelu starosnih grupa, podaci iz stručne literature za raspodelu korisnika unutar objekata i na otvorenom, pretpostavke zasnovane na anketama o korišćenju informaciono-komunikacionih tehnologija (IKT), pretpostavke o stavu zasnovane na obrascima korišćenja mobilnih tehnologija. Jedine simulirane vrednosti kod ove metode su normalizovane vrednosti SAR. Svrha pribavljanja ovolike količine podataka iz žive mreže bila je da se ocene stvarni, realni uslovi po pitanju izloženosti i da se istraži mogućnost, odnosno kapacitet mreže da u budućnosti bude „svesna“ EM izloženosti, odnosno da postoji način da sa podacima dostupnim unutar mreže proceni izloženost stanovništva EM polju koje potiče od mreže. Rezultati istraživanja prikazani u ovom poglavlju objavljeni su u članku „Comparison of Average Total EMF Exposure for Microcell/Macrocell Topologies Using Novel Methodology Based on Operational Network Measurements“ u časopisu IEEE Access [103].

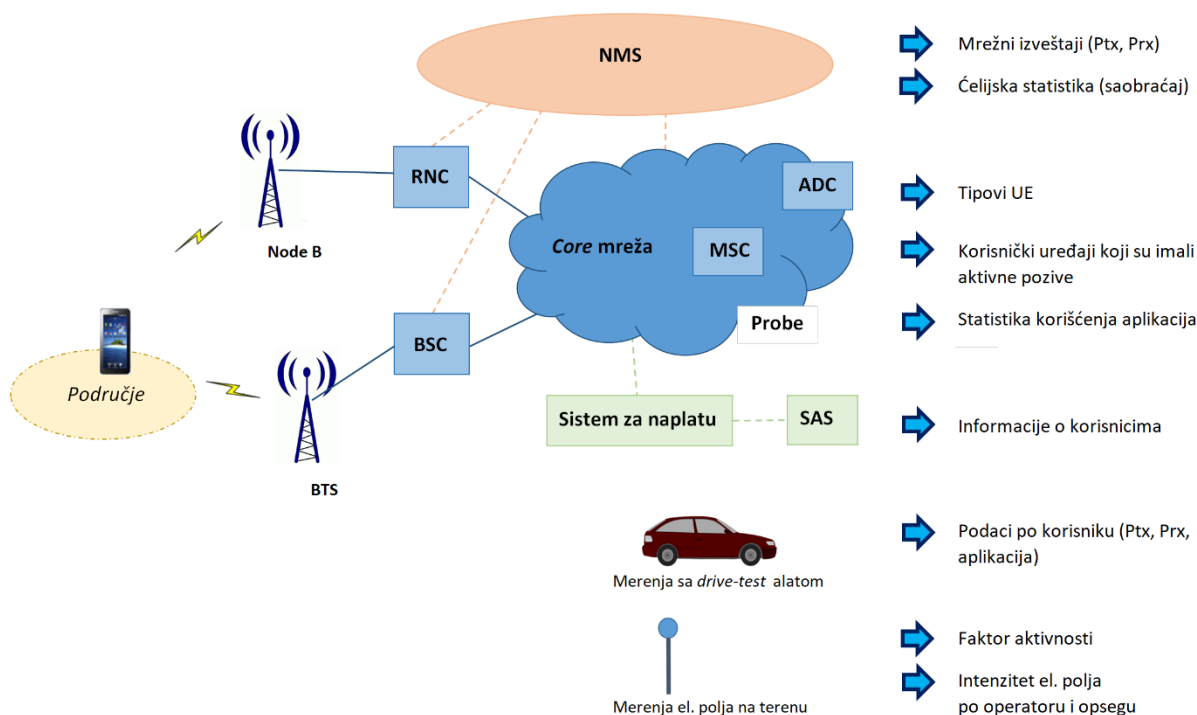
5.2 Izvori podataka

U ovom istraživanju je cilj bio da se iskoristi što više podataka koji se mogu dobiti iz operativne mreže u realnom vremenu ili u skoro realnom vremenu, zatim da se iskoriste statistički podaci iz mreže dobijeni u dužem periodu (iz kojih se dobijaju predefinisane vrednosti), kao i podaci iz spoljnih izvora i merenja na terenu. Evaluacijom izloženosti korišćenjem što više podataka iz same mreže za tačno vreme merenja otvaraju se vrata za buduću „svest“ mreže o EM izloženosti i za buduću samo-optimizaciju mreže u pogledu izloženosti. Analiza otvara prostor za razvoj alata koji bi umanjili nesigurnosti ove ocene izloženosti pomoću naprednog prikupljanja i korelacije podataka. Ovakva svest mreže o izloženosti zahteva sisteme sa velikom količinom podataka i kompleksnu analizu, ali

se princip ne razlikuje mnogo od prikupljanja i korelisanja dostupnih podataka u mreži iz radio i *core* dela, mapiranja podataka korisničke ravni sa signalizacijom na radio interfejsu, u sistemima za upravljanje korisničkim iskustvom (CEM: Customer Experience Management).

Izvori podataka koji se koriste u ovoj metodi su: ćelijska statistika, zadati mrežni izveštaji, merenja sa *drive-test* alatom, zapisi o pozivima, sistem za analitiku korisnika (SAS), platforma za automatsku konfiguraciju uređaja (ADC: Automatic Device Configuration), sonde na mrežnim interfejsima, merenja na terenu sa laboratorijskom opremom, popis, izveštaji regulatora i IKT izveštaji. Ćelijska statistika predstavlja skup ključnih pokazatelja performansi proračunatih iz brojača događaja na ćelijskom nivou. Korisnička oprema razmenjuje razne kontrolne poruke sa mrežom, posebno u svrhe kontrole snage, i te poruke se mogu snimiti korišćenjem zadatih mrežnih izveštaja, sa sistema za upravljanje mrežom (NMS: Network Management System), i potom analizirati. Podaci o korišćenju različitih aplikacija, kao i signalizacione poruke, mogu se dobiti sa sonde koje prikupljaju saobraćaj na mrežnim interfejsima. Zapisi o pozivima (CDR: Call Data Records) služe za izradu računa, a mogu se koristiti za dobijanje vrednih podataka o statistici korisnika u ćeliji. Sistem za analitiku korisnika (SAS) sadrži statistiku o korišćenju usluga za registrovane korisnike. Platforma za automatsku konfiguraciju uređaja (ADC) služi za slanje automatizovanih konfiguracionih poruka ka korisničkoj opremi (UE) i sadrži podatke o svim korisničkim uređajima u mreži. Svrha svakog izvora u proceni izloženosti biće objašnjena niže.

Izvori podataka koji se tiču same mreže prikazani su na slici 5.1. Neki od njih se koriste u posmatranom periodu evaluacije izloženosti, neki u dužem periodu da bi se ustanovili obrasci opterećenja mreže [86], korisnički profili, aplikacije koje se koriste, da se uporede odbirci snage iz mrežnih izveštaja i oni dobijeni alatom za *drive-test* merenja.



Slika 5.1 Izvori podataka u vezi sa mrežom

Izvori podataka za procenu izloženosti na osnovu podataka iz operativne mreže mogu se podeliti u dve velike grupe:

- Mrežni resursi – sistem za upravljanje mrežom (NMS), razne baze podataka, platforme i sistemi uključujući zapise o pozivima, sistem za analitiku korisnika, sonde na mrežnim interfejsima itd;

- Spoljni resursi – merenja polja na terenu sa laboratorijskom opremom, merenja *drive-test* alatom, statistički podaci o populaciji, podaci o korišćenju mobilnih tehnologija, merenja ili simulacije SAR-a.

Podaci se dalje mogu klasifikovati kao unapred određeni, predefinisani podaci i podaci koji se prikupljaju i obrađuju gotovo u realnom vremenu. Podaci koji se koriste prikazani su u tabeli 5.1.

Pre perioda testiranja prikupljeni su sledeći podaci koji će se koristiti u proračunu:

- Podaci iz sistema za analitiku korisnika: profili korisnika (intenzivno/umereno/slabo korišćenje);
- Podaci sa platforme ADC: vrste korisničkih uređaja i njihova raspodela;
- Sonde na mrežnim interfejsima: raspodela vremena korišćenja (*minutes of use: MoU*) aplikacija;
- Merenja faktora aktivnosti pojedinih aplikacija u određenim radio uslovima i preko pojedine tehnologije;
- Normalizovane vrednosti SAR-a za celo telo (*whole body: wb*) za *uplink* i za *downlink*.

Normalizovane vrednosti SAR-a za celo telo mogu se dobiti korišćenjem numeričkih simulacija, za određeni anatomski model ljudskog tela (dete, odrasli), određeni stav (stajanje, sedenje) i različite tipove korišćenja servisa odnosno mobilnog uređaja (mobilni telefon blizu glave za govorni servis, korišćenje prenosa podataka preko mobilnog telefona ili tableta ili laptopa u krilu ili na stolu), za *uplink* i za *downlink*, u različitim frekvencijskim opsezima [89]. Normalizovane vrednosti SAR-a za celo telo koje se koriste u ovoj disertaciji dobijene su u okviru projekta LEXNET [88] korišćenjem platformi za 3D simulaciju elektromagnetskog polja koje su zasnovane na metodi konačnih razlika u vremenskom domenu (FDTD) i tehnici konačne integracije (FIT: Finit Integration Technique). Izračunate su za izloženost u bliskom polju i u dalekom polju za dva anatomska modela ljudskog tela, 34-godišnjeg muškarca i 8-godišnju devojčicu. Korišćeni su prethodno navedeni stavovi i načini upotrebe mobilnih uređaja [89].

Tokom perioda testiranja prikupljaju se sledeći podaci:

- UE Tx (predajna) i Rx (primljena) snaga, raspodela odbiraka (P_{TX} , P_{RX}) uzetih iz mrežnih izveštaja na nivou ćelije, za govorni servis i za servis prenosa podataka, preko svake od tehnologija, za makro ćelije i za male ćelije;
- Alternativno, odbirci predajne i primljene snage iz mrežnih izveštaja po korisniku;
- Ćelijska statistika: prosečno trajanje servisa prenosa govora i prenosa podataka u UL i DL, prosečno preneti količina podataka u UL, za sve ćelije od interesa;
- Frekvencijski selektivna merenja intenziteta električnog polja izvršena sa opremom za merenje polja u određenom broju tačaka unutar područja od interesa, za sve opsege od interesa;
- Signalizacione poruke sa sonde u *core* mreži (poruke Location Update) ili alternativno, podaci sa sistema za analitiku korisnika (u dužem periodu).

Metoda se može primeniti na bilo koji bežični sistem uz adekvatno prikupljanje podataka, a može se svesti i na pojedinca i na komponente izloženosti.

Tabela 5.1 Izvori podataka za procenu ukupne izloženosti u opretnoj mreži.

Izvor	Podatak	Svrha
Ćelijska statistika	<input type="checkbox"/> ključni pokazatelji performansi mreže: saobraćajno opterećenje, trajanje korišćenja servisa prenosa govora i podataka, obim prenetog saobraćaja, protok	<input type="checkbox"/> procena saobraćajnog opterećenja po tipu ćelija, određivanje sati visokog i niskog opterećenja, klasa korišćenih servisa (govor, podaci interaktivni sadržaji) itd. <input type="checkbox"/> dobijanje srednjih vremena trajanja poziva sa prenosom govora i prenosom podataka za period od interesa, srednjih obima prenetih podataka i protoka
Mrežni izveštaji	<input type="checkbox"/> merenja snage UE Tx/Rx po korisniku, po ćeliji	<input type="checkbox"/> statistički podaci o profilu snage, za područje <input type="checkbox"/> usrednjavanje u vremenu zahteva skaliranje snimljenih odbiraka snage na osnovu faktora aktivnosti za datu tehnologiju i korišćene servise
Merenja sa <i>drive-test</i> alatom	<input type="checkbox"/> merenja snage UE Tx/Rx po korisniku	<input type="checkbox"/> podaci po korisniku, čija je namena procena izloženosti pojedinačnog korisnika, na osnovu tipa UE, korišćenih aplikacija, radio uslova, vremena u danu (saobraćajno opterećenje), tipa ćelije itd.
Zapisi o pozivima (CDR: Call data records)	<input type="checkbox"/> korisnici (MSISDNs, IMEIs) koji su ostvarili aktivan poziv tokom posmatranog perioda u ćeliji	<input type="checkbox"/> podaci o korisnicima koji su napravili aktivan poziv, kao ulazni podatak za druge sisteme <input type="checkbox"/> nema podataka o povezanim korisnicima u ćeliji koji nisu napravili poziv
Customer analytics system (SAS)	<input type="checkbox"/> po MSISDN-ovima, podaci o korišćenju (srednje trajanje poziva, srednji broj poziva, srednje trajanje sesije, srednja količina prenetih podataka, podaci o profilu)	<input type="checkbox"/> korisnički profili i tipično ponašanje <input type="checkbox"/> sa podacima iz CDR-a o aktivnim pozivima u ćeliji: tipični profil korišćenja za određeno područje
Platforma Automatic Device Configuration (ADC)	<input type="checkbox"/> povezivanje broja IMEI sa tipom i modelom UE	<input type="checkbox"/> segmentacija po tipu UE: telefon, laptop <input type="checkbox"/> pretpostavka o stavu, poziciji UE relativno u odnosu na telo na osnovu tipa UE i servisa (govor/podaci)
Sonde na mrežnim interfejsima	<input type="checkbox"/> poruke koje se razmenjuju u <i>core</i> mreži	<input type="checkbox"/> podaci o korišćenju određenih aplikacija <input type="checkbox"/> poruke Location Update za određivanje raspodele korisnika po posmatranim ćelijama u posmatranom periodu

Merenja na terenu sa laboratorijskom opremom	<input type="checkbox"/> merenja faktora aktivnosti (po aplikaciji, tehnologiji, radio uslovima) <input type="checkbox"/> ukupan intenzitet polja u DL po frekvencijskim opsezima operatora	<input type="checkbox"/> vremensko usrednjavanje odbiraka snage u UL zabeleženih u mrežnim izveštajima/ <i>drive-test</i> merenjima <input type="checkbox"/> procena izloženosti u DL
Popis	<input type="checkbox"/> segmentacija populacije	<input type="checkbox"/> raspodela populacije po starosnim kategorijama
IKT izveštaji	<input type="checkbox"/> korišćenje mobilnih tehnologija	<input type="checkbox"/> ukupna penetracija mobilne telefonije
Izveštaji regulatornog tela	<input type="checkbox"/> tržišni udeo operatora po broju aktivnih korisnika	<input type="checkbox"/> procenat korisnika pojedinog operatora u ukupnom broju korisnika mobilne telefonije
Laboratorije / numeričke simulacije	<input type="checkbox"/> normalizovane vrednosti SAR za UL i DL	<input type="checkbox"/> normalizovane vrednosti SAR po kategorijama korisnika za određivanje izloženosti u UL i u DL

5.3 Razvoj metode

Procena izloženosti stanovništva zasnovana na merenjima iz mreže ima za cilj budući nadzor stvarne EM izloženosti i optimizaciju mreže u cilju smanjenja izloženosti. Uz podatke koji se mogu dobiti iz operativne mreže, koriste se podaci iz spoljnih izvora i merenja kad je to potrebno. Jedan od ciljeva istraživanja bio je ustanoviti podatke koji bi se mogli prikupljati u budućim mrežama da bi se omogućila procena izloženosti skoro u realnom vremenu.

Ključni izazovi za evaluaciju izloženosti korišćenjem dostupnih podataka iz mreže su:

1. Pojam područja

Jedinica „područja“, kad je mreža u pitanju, jeste ćelija. Granice ćelije se menjaju sa promenljivim radio uslovima i opterećenjem mreže. Kolocirane ćelije različitih tehnologija imaju različito pokrivanje. Stoga je teško definisati rigidnu geografsku oblast i u njoj proceniti izloženost. Drugi način procene izloženosti bio bi po korisniku, za sve korisnike u geografskoj oblasti, ali bi ovo zahtevalo alate za geolokaciju i naprednu obradu podataka.

2. Faktor aktivnosti na radio interfejsu

Odbirci snage u mrežnim izveštajima kao i odbirci snage koje beleži alat za *drive-test* merenja ne sadrže podatak o pauzama između emitovanja, a koje su važne za usrednjavanje snage u vremenu. Stoga je potrebno posebno izmeriti faktor aktivnosti na radio interfejsu, za različite aplikacije, u različitim radio uslovima (dobri, srednji, loši) i preko različitih tehnologija, pod sličnim uslovima opterećenja mreže. Ovakvo merenje na terenu se ne može sprovesti u vreme testiranja, tako da se u proračunu za konkretno vreme testiranja primenjuje predefinisani podatak dobijen prethodnim merenjima za skup tipičnih slučajeva.

3. Povezivanje podataka sa radio interfejsa sa podacima o korišćenju iz *core* mreže

Da bi se pravilno usrednjili odbirci snage, potrebno je primeniti pravi faktor aktivnosti, odnosno faktor aktivnosti koji odgovara datim radio uslovima i uslovima opterećenja mreže, datoj tehnologiji i korišćenju aplikaciji. Bez specijalizovanog softvera na telefonu ili naprednih softverskih alata koji bi povezali podatke sa radio interfejsa sa podacima sa sonde na interfejsima *core* mreže, faktor aktivnosti i srednja snaga mogu se kombinovati samo na bazi ukupne srednje vrednosti, preko celog područja odnosno zone pokrivanja predmetnih ćelija. Bez ove korelacije ne možemo znati jesu li viši odbirci predajne snage korisnikovog uređaja zabeleženi kada je korisnik koristio zahtevan servis prenosa podataka blizu bazne stanice, u dobrim radio uslovima, ili kada je bio daleko od bazne stanice, u lošim radio uslovima. Dalje, merenja na nivou ćelije ne uzimaju u obzir sve korisnike u ćeliji, samo uzorak. Mapiranje podataka o predajnoj i primljenoj snazi bilo bi moguće samo uz merenja po korisniku, a bez naprednih alata ove podatke ne možemo dobiti za sve korisnike u ćeliji. Takođe, merenja po ćeliji nisu bila moguća za prenos podataka preko GSM-a [100].

4. Dobijanje podataka o korisnicima

Podaci u sistemu za analitiku korisnika dostupni su samo za registrovane korisnike. Dalje, raspodela korisnika po kategorijama odrasli/dete, da bi se primenila prava vrednost SAR-a, može se samo pretpostaviti na bazi spoljnih izvora (popis), jer registrovan korisnik može biti samo odrasla osoba. Podaci o stavu mogu se pretpostaviti na osnovu tipa mobilnog uređaja i korišćenja.

5. Izloženost zračenju drugih korisnika i operatora

Izloženost zračenju mreže drugih operatora može se samo statistički proceniti korišćenjem merenja na terenu u području od interesa, bez dostupnih podataka drugog operatora. Isto važi i za izloženost zračenju koje potiče od uređaja drugih korisnika.

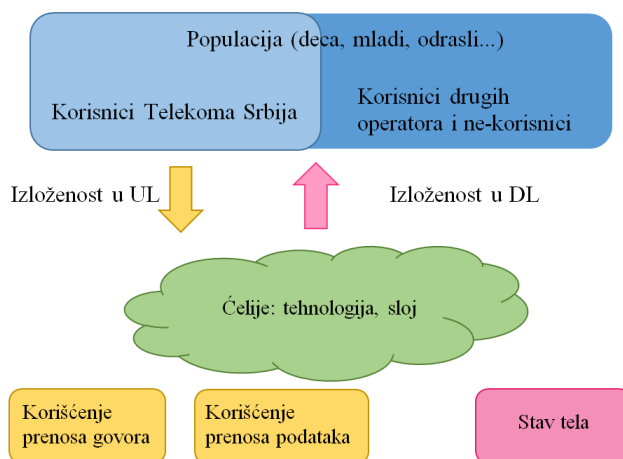
5.3.1 Polazna osnova

Metoda usrednjavanja određena je u odnosu na dostupne podatke u operativnoj mreži i dostupne podatke o SAR-u.

Podaci iz mreže prikupljeni su na ćelijskom nivou, što je odredilo ćeliju kao osnovnu jedinicu za statističko usrednjavanje. Ćeliju karakterišu tehnologija (RAT) i tip ćelije (npr. mikro/makro). Korisnici unutar područja mogu se podeliti u frakcije koje pripadaju svakoj ćeliji (koje opslužuje svaka ćelija) ili sloju kao grupi ćelija, ako zanemarimo stanje mekog *handovera* u WCDMA [104], i ove frakcije omogućuju statističko kombinovanje podataka za različite ćelije. Unutar svake ćelije, mešavina korisnika koji su povezani sa mrežom preko nje, njihovih servisa i trajanja korišćenja istih, kao i njihovi telesni stavovi, doprinose srednjem stvarnom SAR-u za *uplink*. Unutar zone pokrivanja ćelije, populacija je izložena zračenju u *downlinku* te ćelije i svih kolociranih ćelija i ćelija u okruženju. Izloženost od uređaja korisnika u blizini zanemarena je u ovom proračunu.

Servise prenosa govora i podataka karakterišu određeni saobraćajni obrasci. Statistika za servis prenosa govora i statistika za prenos podataka mogu se dobiti zasebno u okviru ćelije. Korišćenje svakog servisa karakteriše specifična pozicija korisničkog uređaja u odnosu na telo, pa su SAR vrednosti simulirane i grupisane u skladu sa tim. Servisi prenosa govora i prenosa podataka predstavljaju prema tome drugi nivo statističkog usrednjavanja.

Posmatrajući servis prenosa govora u ćeliji, različite kategorije populacije sa različitim korisničkim saobraćajnim profilima koriste ovaj servis u nekim vremenskim intervalima. Isto je i sa servisom prenosa podataka, gde ljudi koriste različite aplikacije sa različitim saobraćajnim profilima, koji indukuju različite profile predajne snage korisničkog uređaja i stoga imaju različit uticaj na srednju izloženost. Isti korisnici koriste i govorni servis i servis prenosa podataka i proračun srednje izloženosti mora uzeti u obzir trajanje korišćenja za oba servisa. Konačno, deo populacije u opštem slučaju ne koristi mobilne tehnologije, što se takođe mora uzeti u obzir prilikom usrednjavanja po populaciji u nekom području.



Slika 5.2 Komponente srednjeg stvarnog SAR-a: UL komponenta za korisnike zavisi od korišćenja servisa prenosa govora i podataka, a DL komponenta za populaciju zavisi od telesnog stava, za svaku tehnologiju

Proces proračuna srednjeg stvarnog SAR-a prikazan je na Slici 5.2. U tom procesu procenjujemo izloženost populacije EM polju koje potiče od mrežne opreme (baznih stanica) i uređaja korisnika povezanih sa mrežom Telekoma Srbija. UL komponenta ($\overline{SAR}_{actual}^{UL}(area, population)$) zavisi od korišćenja servisa prenosa govora i podataka, po RAT-u i sloju (npr. makro/mikro sloj), dok DL komponenta ($\overline{SAR}_{actual}^{DL}(area, population)$) zavisi od stavova tela, po frekvencijskom opsegu odnosno

RAT-u. Srednji stvarni SAR ($\overline{SAR}_{actual (area, population)}^{DL}$) za područje je suma komponenata za *uplink* i za *downlink*, za populaciju u nekom području:

$$\overline{SAR}_{actual (area, population)} = \overline{SAR}_{actual (area, population)}^{UL} + \overline{SAR}_{actual (area, population)}^{DL} \quad (5.1)$$

5.3.2 Odnos broja korisnika po slojevima u području od interesa

Budući da u opštem slučaju u nekom području imamo više slojeva mreže (makro, mikro, piko, femto sloj, odnosno makro sloj i sloj malih ćelija), sa više tehnologija, u više frekvencijskih opsega, proračun izloženosti treba da uvaži sve ove slojeve i da na pravilan način kombinuje pojedine komponente izloženosti. Pojedini slojevi mreže imaju svoje zone pokrivanja, tako da se komponente izloženosti u *uplinku* odnose na delove populacije u zonama pokrivanja pojedinih ćelija. Sa druge strane, na izloženost u *downlinku* utiču sve okolne bazne stanice, tako da je merodavna ukupna zona posmatranja. Kako se tema istraživanja odnosi na poređenje scenarija u vezi sa arhitekturom mreže, dakle tehnologijama i topologijom, možemo posmatrati promenu izloženosti u različitim oblastima tj. zonama pokrivanja, tako da se i izloženost u *downlinku* može posmatrati po istim zonama kao za *uplink* i kombinovati na odgovarajući način. Odnos broja korisnika po slojevima c tehnologije r , $f_{r,c}$, opisuje koliko je korisnika u proseku bilo povezano sa slojem (r , c) u posmatranom periodu.

Posmatramo u opštem slučaju dva sloja, makro sloj sa većom zonom pokrivanja i sloj malih ćelija, npr. mikro sloj, koji se uvodi da poboljša kapacitet ili pokrivanje u nekoj manjoj oblasti unutar zone pokrivanja makro sloja. Zonu pokrivanja makro sloja, kad nije uključen mikro sloj, možemo nazvati makro oblašću. Zonu pokrivanja mikro sloja, kad je uključen, možemo nazvati mikro oblašću i ona izgleda kao ostrvo unutar pokrivanja makro sloja. Kada su oba sloja uključena, sa makro slojem su povezani korisnici koji se nalaze u delu makro oblasti bez mikro oblasti. Isto posmatranje može se primeniti i na piko i femto sloj. U slučaju piko sloja, manja oblast zauzima prostor npr. tržnog centra, a u slučaju femto sloja (ili kućne WiFi mreže), nečiji dom.

Zone pokrivanja pojedinih slojeva određuju i oblasti po kojima se može posmatrati izloženost, dakle, u slučaju dva sloja, mikro oblast i ukupno područje od interesa, makro oblast. Ove oblasti, posmatrane prema pokrivanju, nemaju konstantnu geografsku granicu, budući da se zone pokrivanja menjaju sa uslovima u mreži. Takođe, ove oblasti nisu kompaktne – usred mikro ili makro zone, opet usled uslova u mreži i na radio putanji, korisnici mogu kratko vreme ili duži period biti povezani sa nekom udaljenijom stanicom, usled slabljenja signala ćelija od interesa. Međutim, posebno u gradovima gde postoji relativno gusta mreža baznih stanica, može se smatrati da su granice pokrivanja kolociranih ćelija u različitim tehnologijama relativno slične i da imaju mala pomeranja u periodima od interesa (kada se posmatrani parametri mogu smatrati stacionarnim). Takođe se mogu zanemariti, u odnosu na celokupnu statistiku ćelija od interesa, manji delovi geografske zone u kojima su korisnici u nekom vremenu mogli biti povezani sa drugim ćelijama.

Fracije korisnika ($f_{r,c}$) po tehnologijama (r) i tipovima ćelija (c), odnosno procenti korisnika koji su u datom vremenskom periodu povezani sa pojedinim slojevima, mogle su se u vreme ovog istraživanja dobiti iz signalizacionih poruka Location Update [105], kao srednja vrednost za posmatrani period, ili iz sistema za analitiku korisnika (SAS), naknadnom analizom. Location Update poruke mreži šalje korisnički uređaj, sadrže podatke o ćeliji sa kojom je povezan, a njihova učestalost zavisi od mrežnih podešavanja. Fracije korisnika po ćelijama menjaju se u vremenu sa promenljivim radio uslovima i opterećenjem mreže, kao i sa kretanjem korisnika. Sve promene ne mogu se uhvatiti pomoću ovih poruka. Kod UMTS-a, korisnik može biti povezan sa mrežom preko nekoliko ćelija u isto vreme [104], i obično privremeno, dok se u porukama prijavljuje samo jedna. Čak i na istom mestu, korisnik može ispasti iz pokrivanja dominantne ćelije na području i vratiti joj se u kratkom vremenskom periodu. Međutim, ovi podaci daju informacije o korisnicima koji su stvarno bili

povezani sa posmatranim ćelijama u posmatranom periodu, pri čemu se podaci mogu obraditi u relativno kratkom vremenu nakon merenja. Iz sistema za analitiku korisnika mogli su se dobiti podaci o korisnicima koji su ostvarili aktivnu konekciju, čime se u proseku uzimaju u obzir svi korisnici koji su obično aktivni u datom području, a obrada se ne može brzo obaviti.

5.3.3 Određivanje izloženosti u UL

Ako posmatramo nekog korisnika, ono što ga karakteriše u određenom trenutku, i što utiče na stvarni SAR u *uplinku*, jeste njegova dob (p : population), stav (pos : posture), način korišćenja tj. uređaj i servis (u : usage) i ćelija na koju je povezan (r,c). Njegova pozicija (e : environment), unutar objekta (*indoor*) ili na otvorenom (*outdoor*), može biti korelisana sa položajem tela. Kombinaciju (p),(e),(pos),(u), za određene (r) i (c), možemo nazvati konfiguracijom korisnika od koje zavisi normalizovani SAR.

Srednja izloženost u *uplinku* za korisnike nekog operatora ($\overline{SAR}_{actual (area,operator's users)}^{UL}$) u vremenskom periodu T , u području koje pokrivaju ćelije tehnologija r i tipova ćelija c , procenjuje se na osnovu sledeće formule (5.2). Za svaku frakciju korisnika $f_{r,c}$ koje opslužuje ćelija tipa c tehnologije r računa se doprinos srednjem stvarnom SAR-u za UL. Ovaj proračun uključuje srednju predajnu snagu korisničkih uređaja ($\overline{P}_{TX}^{r,c}$) u ćelijama sloja (r,c), srednja trajanja servisa prenosa govora ($\overline{TD}_{r,c,voice}^{UL}$) i podataka ($\overline{TD}_{r,c,data}^{UL}$) za komunikaciju u *uplinku* u ovim ćelijama, kao i srednje normalizovane vrednosti SAR za ova korišćenja ($\overline{SAR}_{r,voice}^{UL,norm}$, $\overline{SAR}_{r,data}^{UL,norm}$).

$$\overline{SAR}_{actual (area,operator's users)}^{UL} = \frac{1}{T} \sum_r^{GSM,UMTS} \sum_c^{macrocells,microcells} f_{r,c} \overline{P}_{TX}^{r,c} \{ \overline{TD}_{r,c,voice}^{UL} \overline{SAR}_{r,voice}^{UL,norm} + \overline{TD}_{r,c,data}^{UL} \overline{SAR}_{r,data}^{UL,norm} \} \quad (5.2)$$

Ovaj statistički metod zasniva se na kombinovanju srednjih trajanja korišćenja servisa prenosa govora i podataka u ćelijama istog sloja sa srednjim normalizovanim vrednostima SAR za te vrste korišćenja. Doprinos pojedinog sloja srednjem stvarnom SAR-u za UL se onda računa množenjem dobijene vrednosti sa srednjom predajnom snagom korisničkih uređaja povezanih sa tim slojem i odgovarajuće frakcije korisnika koje opslužuju ćelije tog sloja ($f_{r,c}$) u vremenskom periodu T , a zatim deljenjem dobijene vrednosti sa tim ukupnim periodom posmatranja. Suma doprinosa ćelija od interesa predstavlja srednji stvarni SAR koji generiše komunikacija u *uplinku* za sve korisnike operatora u posmatranom području koje pokrivaju posmatrane ćelije.

Srednja predajna snaga, srednje vreme korišćenja i srednje normalizovane vrednosti SAR sve uzimaju u obzir mešavinu korisnika, njihovih uređaja, servisa koje koriste i njihovih telesnih stavova, kao što je objašnjeno niže.

5.3.3.1 Srednja predajna snaga

Srednja predajna snaga zavisi od tehnologije, opterećenja mreže, pozicije u ćeliji (dobri, srednji, loši radio uslovi), kao i od korišćenog servisa (govor ili podaci, koja aplikacija u slučaju prenosa podataka). Za svaki korišćeni servis preko određene tehnologije i u specifičnim radio uslovima i uslovima u mreži, predajna snaga će se razlikovati, kao i periodi tišine kada korisnički uređaj ne emituje. Svaka aplikacija ima specifičan saobraćajni obrazac i njeni paketi se obrađuju za prenos na fizičkom sloju, gde i dodati *overhead* (dodatni biti) zavisi od radio uslova, dok vreme prenosa zavisi i od uslova u mreži i od radio uslova. Za usrednjavanje predajne snage u nekom periodu, važno je poznavati vremenski obrazac predajne snage na radio interfejsu.

Glavni izazov u proračunu srednjeg stvarnog SAR-a u operativnoj mreži je korelisanje podataka iz korisničke ravni sa radio merenjima. Merenja na bazi ćelije u mrežnim izveštajima daju profil snage ćelije [106], na osnovu statističkog uzorka korisnika, i ne postoji veza između odbiraka snage i

korišćenih aplikacija, što direktno utiče na vremensko usrednjavanje snage. Odbirci snage beleže se kad predajnik emituje (i u mrežnim izveštajima i u merenjima sa *drive-test* alatom), a periodi tišine između emitovanja moraju se odrediti statistički, merenjima na terenu, za svaki tip aplikacije, tehnologije, opterećenja mreže (visoko/nisko), radio uslove (jak/slab prijemni signal). Faktor aktivnosti na radio interfejsu uzima u obzir i aktivnost aplikacije spuštenu na radio interfejs (uključujući obradu nižih slojeva, tj. zaglavljaja, kodiranje) i specifična svojstva radio interfejsa (na primer, u GSM-u se jedan *time-slot* u frejmu od 8 *time-slotova* koristi za prenos govora, 1-3 za prenos podataka za većinu tipova UE [107]; UMTS Radio Resource Control (RRC) prelazi između stanja za prenos podataka [108]).

Faktor aktivnosti određen merenjima na terenu laboratorijskom opremom služi za skaliranje odbiraka iz mrežnih merenja, što odgovara usrednjavanju u vremenu. Skaliranje implicira korelaciju između snimljenih nivoa snage u UL u vremenu sa radio uslovima (jačina primljenog signala) i sa korišćenom aplikacijom. Visoki odbirci predajne snage u UL mogu se pripisati zahtevnom slanju podataka ka mreži blizu bazne stanice ili manje zahtevnim servisima kada je korisnik daleko od bazne stanice – dve situacije sa različitim faktorima aktivnosti [102]. Bez korelacije, ne možemo tačno povezati zabeležene nivoe snage sa tačnim faktorom aktivnosti za korišćenu aplikaciju u datim radio uslovima. Mapiranje podataka o predajnoj i prijemnoj snazi bilo bi moguće samo kroz merenja na bazi korisnika.

Kako bi se dobila stvarna vremenski usrednjena vrednost predajne snage UE ($\bar{P}_{TX}^{r,c}$), srednja vrednost odbiraka izvučenih iz mrežnih izveštaja o predajnoj snazi UE (UE Tx power) po ćeliji ($average\{P_{TX1}^{r,c}, P_{TX2}^{r,c}, \dots, P_{TXn}^{r,c}\}$) mora se skalirati srednjim faktorom aktivnosti za dati sloj i RAT ($\overline{DF}^{r,c}$, (5.3)). Budući da su odbirci snage reprezentativni za mešavinu svih konfiguracija korisnika i servisa, faktori aktivnosti za različite aplikacije i radio uslove moraju se sažeti na jednu vrednost, na osnovu trajanja ovih servisa (5.3):

$$\bar{P}_{TX}^{r,c} = average\{P_{TX1}^{r,c}, P_{TX2}^{r,c}, \dots, P_{TXn}^{r,c}\} * \overline{DF}^{r,c}, P_{TXi}^{r,c} \neq 0, i = 1..n \quad (5.3)$$

Faktor aktivnosti na radio interfejsu meren je korišćenjem laboratorijske opreme za sisteme GSM 900 MHz i UMTS 2100 MHz, u dobrim, srednjim i lošim radio uslovima, za devet tipičnih tipova saobraćaja: prenos govora, pretraživanje interneta, audio i video striming, TV, postavljanje datoteke (*upload*), preuzimanje datoteke (*download*), Skype VoIP i video [102].

Na osnovu raspodele odbiraka prijemne snage UE (UE Rx power) određuje se statistička raspodela trajanja servisa u dobrim, srednjim i lošim radio uslovima, pretpostavljajući uniformnu raspodelu korišćenih servisa u ove tri oblasti, za svaku grupu ćelija (iste tehnologije i istog sloja). Granične vrednosti za snagu primljenog signala određene su po tehnologiji. Ovo je bila osnova za statističko usrednjavanje faktora aktivnosti po tehnologiji i radio uslovima. U slučaju GSM-a, odbirci snage zabeleženi su samo za servis prenosa govora. U slučaju UMTS-a, odbirci snage odnose se na korišćenje i govora i podataka, tako da statističko usrednjavanje faktora aktivnosti mora da uzme dodatno u obzir:

- Procenat korišćenja servisa prenosa govora i podataka u odnosu na ukupno trajanje; ovaj podatak se dobija iz ćelijske statistike [109];
- Za servis prenosa podataka, raspodelu korišćenih aplikacija po procentima vremena: ovaj podatak je evaluiran analizom podataka sa sonde u *core* mreži. Aplikacije su podeljene u kategorije za koje je meren faktor aktivnosti (tabela 5.2).

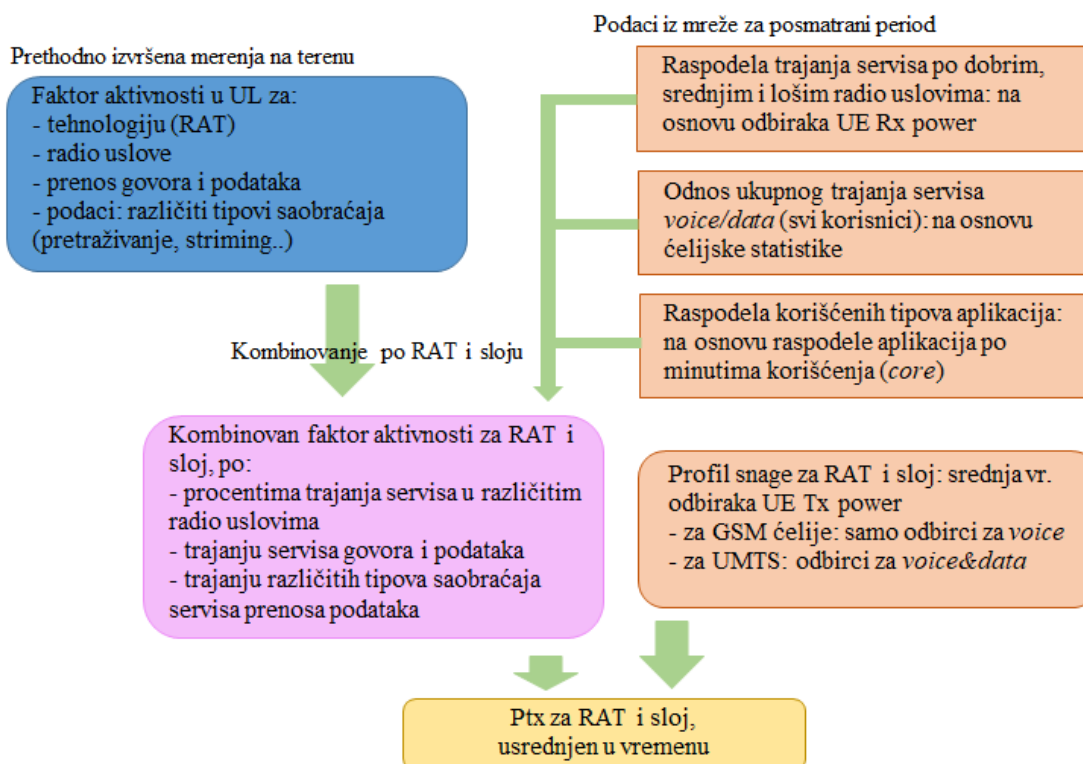
Dakle, faktor aktivnosti za govorni servis preko GSM-a je statistički kombinovan prema radio uslovima, dok je faktor aktivnosti za servise prenosa govora i podataka preko UMTS-a statistički kombinovan uzimajući u obzir, pored radio uslova, tip servisa i korišćenu aplikaciju. Proces

usrednjavanja faktora aktivnosti i njegove primene na srednju vrednost snimljenih odbiraka predajne snage UE za RAT i sloj (agregirane vrednosti za ćelije istog RAT-a i sloja) prikazan je na slici 5.3.

Za GSM predajna snaga u *uplinku* na ćelijskom nivou može se meriti samo za govorni servis. Ovo sa druge strane predstavlja prednost budući da svi odbirci merene snage mogu biti korelisani sa jednim servisom.

Tabela 5.2 Raspodela tipova saobraćaja prema vremenu korišćenja

Tip saobraćaja	% vremena
Pretraživanje interneta	59,39%
Audio striming	1,65%
Video striming	11,42%
TV	0,79%
Skype VoIP	4,55%
Skype video	0,10%
Upload datoteka	15,71%
Download datoteka	6,39%



Slika 5.3 Usrednjavanje faktora aktivnosti po tehnologiji i sloju i dobijanje člana P_{tx}

5.3.3.2 Normalizovane vrednosti SAR usrednjene po konfiguracijama korisnika

Konfiguracija korisnika uključuje starosnu kategoriju stanovništva (p), okruženje (e), telesni stav tokom korišćenja (pos), korisnički uređaj, za servise prenosa govora i podataka (u). Normalizovane vrednosti SAR-a date su u skladu sa ovom podelom ($SAR_{p,pos,voice,r}^{UL,norm}$, $SAR_{p,pos,data,r}^{UL,norm}$).

Normalizovane vrednosti SAR-a za *uplink*, za celo telo, dobijene numeričkim simulacijama i korišćene u ovoj disertaciji date su u tabeli 5.3 [89]. Kategorije za koje su dobijene vrednosti SAR-a odredile su i kategorije po kojima se vrši usrednjavanje na osnovu dostupnih podataka iz mreže i iz spoljnih izvora.

Kako bismo dobili normalizovane vrednosti SAR-a usrednjene po konfiguracijama korisnika, za servise prenosa govora i podataka, $(\overline{SAR}_{r,voice}^{UL,norm}, \overline{SAR}_{r,data}^{UL,norm})$, (5.4), (5.5), neophodno je odrediti udeo svake konfiguracije $(f_{p,e,pos,device,voice}, f_{p,e,pos,device,data})$ u korisničkoj populaciji područja.

$$\overline{SAR}_{r,voice}^{UL,norm} = \sum_p^{child,adult} \sum_e^{indoor,outdoor} \sum_{pos}^{sitting,standing} \sum_{device}^{phone} f_{p,e,pos,device,voice} SAR_{p,pos,voice,r}^{UL,norm} \quad (5.4)$$

$$\overline{SAR}_{r,data}^{UL,norm} = \sum_p^{child,adult} \sum_e^{indoor,outdoor} \sum_{pos}^{sitting,standing} \sum_{device}^{phone,laptop-lap,laptop-desk} f_{p,e,pos,device,data} SAR_{p,pos,data,r}^{UL,norm} \quad (5.5)$$

Tabela 5.3 Normalizovane vrednosti SAR (na 1 W predajne snage UE) za *uplink* [W/kg]

Servis	Populacija	Stav	Uređaj	Pozicija laptopa	GSM900	UMTS1940
Govor	Dete	Sedeći	Telefon		0,029	0,011
	Dete	Stojeći	Telefon		0,029	0,01
	Odrasli	Sedeći	Telefon		0,012	0,0052
	Odrasli	Stojeći	Telefon		0,012	0,0052
Podaci	Dete	Sedeći	Telefon		0,011	0,0135
	Dete	Stojeći	Telefon		0,01	0,0109
	Dete	Sedeći	Laptop	U krilu	X	0,0035
	Dete	Sedeći	Laptop	Na stolu	X	0,0025
	Odrasli	Sedeći	Telefon		0,0056	0,0081
	Odrasli	Stojeći	Telefon		0,0049	0,0039
	Odrasli	Sedeći	Laptop	U krilu	X	0,0027
	Odrasli	Sedeći	Laptop	Na stolu	X	0,0035

Podaci koji se koriste za ovu segmentaciju su kako sledi:

- Udeo starosnih kategorija populacije (korisnika): može se preuzeti iz popisa [110], a na osnovu dostupnih vrednosti SAR-a, redukovati npr. na dve kategorije (deca, odrasli) (tabela 5.4). Pretpostavlja se da raspodela populacije po starosnim grupama kod korisnika operatora za čiju se mrežu računava izloženost prati raspodelu starosnih grupa u populaciji uopšte. Podaci o registrovanim korisnicima ne mogu se uzeti kao merodavni jer registrovani korisnici mogu biti samo odrasle osobe, dok su stvarni korisnici nekad njihova deca.

- Odnos korisnika koji su u unutrašnjosti objekta i na otvorenom, a prema vremenu korišćenja: uzima se kao pretpostavka (tabela 5.5), na osnovu statističkih anketa u različitim zemljama [16]; pretpostavlja se i da su deca malo više u objektima a odrasli nešto više na otvorenom.
- Korisnici telefona i laptopa: ovaj podatak se može dobiti iz sistema za automatsku konfiguraciju korisničkih uređaja (ADC) (tabela 5.6); za povezivanje podataka u matricu potrebne su pretpostavke, pretpostavljamo da se prenos podataka koristi i preko telefona i preko laptopa, dok se servis prenosa govora koristi samo preko telefona, a takođe da odrasli i deca proporcionalno koriste telefon i laptop.
- Telesni stav: o telesnom stavu nema statističkih podataka, pa je stoga pretpostavljeno da svi korisnici koji su unutar objekata sede, a svi koji su na otvorenom stoje (tokom korišćenja) [16]; dalje, uzima se i pretpostavka o poziciji laptopa (u krilu, na stolu); smatra se da se laptop koristi u sedećem stavu, a telefon u sedećem i stojećem.

Kombinacije gornjih kategorija daju matricu segmentacije korisnika, koja u opštem slučaju ima oblik predstavljen u tabeli 5.7.

Tabela 5.4 Kategorije populacije

Populacija (popis)	% populacije	Kategorija populacije	% populacije
Deca (ispod 15 god)	13,50%	Deca (ispod 15)	13,50%
Mladi (15-29)	18,40%	Odrasli (15 i više)	86,50%
Odrasli (30-59)	43,60%		
Seniori (60 i više)	24,50%		

Tabela 5.5 Korisnici u zatvorenom i na otvorenom

Kategorija populacije	% populacije u zatvorenom	% populacije na otvorenom
Deca (ispod 15)	80%	20%
Odrasli (15 i više)	70%	30%

Tabela 5.6 Korišćenje telefona i laptopa

Korisnički uređaj	% korisnika
Telefon	98,56%
Laptop	1,44%

Tabela 5.7 Matrica segmentacije korisnika

Korisnik	% korisnika	Uređaj	% uređaja	Okruženje	% okruženja	Stav	Pozicija laptopa	% pozicije	Udeo
Dete	13,50%	Telefon	98,56%	<i>Indoor</i>	79,71%	Sedeći			10,61%
	13,50%		100,00%	<i>Outdoor</i>	20,00%	Stojeći			2,70%
	13,50%	Laptop	1,44%	<i>Indoor</i>	100,00%	Sedeći	U krilu	10%	0,02%
	13,50%					Sedeći	Na stolu	90%	0,17%
Odrasli	86,50%	Telefon	98,56%	<i>Indoor</i>	69,56%	Sedeći			59,31%
	86,50%		100,00%	<i>Outdoor</i>	30,00%	Stojeći			25,95%
	86,50%	Laptop	1,44%	<i>Indoor</i>	100,00%	Sedeći	U krilu	30%	0,37%
	86,50%					Sedeći	Na stolu	70%	0,87%

Da bi se sračunao procenat korisnika koji koriste servise prenosa govora i podataka, preuzeti su podaci iz sistema za analitiku korisnika za korisnike koji koriste samo prenos govora, one koji koriste samo prenos podataka i korisnike koji koriste i prenos govora i prenos podataka. Kombinovanjem ovih podataka sa prethodno datom matricom segmentacije korisnika, napravljena je matrica korišćenja servisa prenosa govora i prenosa podataka (Tabela 5.8), koja dalje služi za kombinovanje sa dostupnim vrednostima normalizovanog SAR-a. Za GSM sistem se uzima da je procenat korisnika koji koriste servis prenosa govora 100%, dok se kod UMTS-a uzima procenat prema podacima iz sistema.

Tabela 5.8 Matrica korišćenja za kombinovanje sa normalizovanim vrednostima SAR za UL

Servis	Populacija	Stav	Uređaj	Pozicija laptopa	Udeo UMTS [%]	Udeo GSM [%]
Govor	Dete	Sedeći	Telefon		10,61	10,80
	Dete	Stojeći	Telefon		2,70	2,70
	Odrasli	Sedeći	Telefon		59,31	60,55
	Odrasli	Stojeći	Telefon		25,95	25,95
Podaci	Dete	Sedeći	Telefon		7,38	
	Dete	Stojeći	Telefon		1,88	
	Dete	Sedeći	Laptop	U krilu	0,02	
	Dete	Sedeći	Laptop	Na stolu	0,17	
	Odrasli	Sedeći	Telefon		12,55	
	Odrasli	Stojeći	Telefon		5,49	
	Odrasli	Sedeći	Laptop	U krilu	0,37	
	Odrasli	Sedeći	Laptop	Na stolu	0,87	

Procenti korisnika predstavljeni u tabeli 5.8 kombinuju se sa odgovarajućim normalizovanim vrednostima SAR-a za celo telo, za UL, za kategoriju populacije, stav, korišćenje i poziciju (tabela 5.3) da bi se dobile srednje vrednosti normalizovanog (po 1 W snage) SAR-a za celo telo, usrednjene za korišćenje prenosa govora i prenosa podataka.

Primenjeni statistički model za segmentaciju korisnika korišćenjem zbirnih podataka sa mreže i spoljnih statističkih podataka daje matricu segmentacije koja se ne menja u toku testiranja, na koju se dalje primenjuju konkretni podaci za date ćelije kako bi se procenila izloženost populacije u konkretnom području. Uz naprednije alate bi bilo moguće izvršiti segmentaciju i na nivou ćelije (korišćeni uređaji, statistika korišćenja).

5.3.3.3 Prosečno vreme korišćenja po korisniku

Prosečno vreme korišćenja potrebno je odrediti za servise prenosa govora i podataka, radi statističkog kombinovanja sa srednjim normalizovanim vrednostima SAR-a koje su prethodno dobijene za servise prenosa govora i podataka. Prosečno vreme korišćenja izračunava se na osnovu korisničkih profila, imajući u vidu prethodnu analizu korisničkih podataka.

Korisnički profili su izvedeni korišćenjem sistema za analitiku korisnika i informacija za naplatu saobraćaja u kombinaciji sa mesečnom ćelijskom statistikom, sa kontrolera baznih stanica, za urbane, suburbane i ruralne ćelije, za tehnologije 2G i 3G, i prikazani su u [89][16]. Za svaku kategoriju RAT-a i morfologiju područja, definisani su korisnici sa visokim, umerenim i niskim intenzitetom korišćenja mobilnih usluga (intenzivno, umereno, slabo korišćenje, odnosno profili

heavy/moderate/light), sa dnevnom i noćnom statistikom za: trajanje govorne komunikacije i obim saobraćaja podataka u *uplinku* (predati saobraćaj) i u *downlinku* (primljeni saobraćaj), u satu. Za kalkulaciju se mogu uzeti podaci za urbano okruženje, za dan, kada se obavljaju merenja. Raspodela korisničkih profila (*heavy, moderate, light*) po kategorijama populacije daje se kao pretpostavka (tabela 5.9), zasnovana na IKT anketama [89][16].

Tabela 5.9 Raspodela korisničkih profila po kategoriji populacije i servisa

Kategorija populacije	Servis	Udeo saobraćajnog profila korisnika		
		Intenzivno korišćenje	Umereno korišćenje	Slabo korišćenje
Deca	Govor	25,00%	50,00%	25,00%
	Podaci	60,00%	20,00%	20,00%
Odrasli	Govor	47,00%	25,00%	28,00%
	Podaci	26,28%	20,40%	53,32%

Srednje trajanje govornog poziva u UL ($\overline{TD}_{r,c,voice}^{UL}$) računa se kombinovanjem korisničkih profila sa njihovim udelima u populaciji. Srednje trajanje poziva sa prenosom podataka u UL ($\overline{TD}_{r,c,data}^{UL}$) računa se na osnovu kombinovanih korisničkih profila (obim podataka u UL po korisniku) i podataka iz ćelijske statistike (ukupan obim podataka u UL, ukupno trajanje poziva sa prenosom podataka), uzetih za vreme dana.

Dakle, da bismo dobili $\overline{TD}_{r,c,voice}^{UL}$ i $\overline{TD}_{r,c,data}^{UL}$ (usrednjeno po korisniku) služimo se definisanim profilima po urbanosti izvučenim iz dugoročnih mrežnih podataka i ćelijskom statistikom za dati period posmatranja. Ovo prosečno trajanje odgovara proseku za sve korisnike, decu i odrasle, sa različitim profilima. Konkretna prosečna trajanja zavise od konkretne dece i konkretnih odraslih osoba koji su korisnici ćelija koje pokrivaju područje od interesa, za vreme merenja, te bi se naprednijom analitikom mreže ovi podaci mogli dobiti direktno za konkretne korisnike tokom merenja, bez korišćenja prethodno izvučenih profila.

5.3.4 Određivanje izloženosti u DL

Izloženost u *downlinku* odnosi se ne samo na korisnike posmatrane mreže, već na sve ljude u posmatranom području. Izloženi smo signalima *downlinka* svih okolnih baznih stanica sve vreme, tako da je faktor aktivnosti za prenos u *downlinku* jednak 100%. Izloženost EM polju u *downlinku* zavisi od frekvencijskog opsega signala, kategorije populacije, okruženja i telesnog stava, te podaci sa mreže o korišćenju mobilnih tehnologija mogu biti od koristi za procenu stavova populacije uopšte. Možemo proceniti stavove korisnika posmatrane mreže tokom korišćenja mobilnih tehnologija, na osnovu podataka sa mreže, ali dalje treba da procenimo njihovo ponašanje kada ne koriste servise mobilne mreže, kao i ponašanje korisnika drugih operatora i ljudi koji ne koriste mobilnu telefoniju, za 100% vremena. Ovde pretpostavljamo da je ponašanje svih korisnika međusobno slično i da je takođe slično u periodima kada korisnici koriste mobilne tehnologije i u periodima kada ih ne koriste. Dalje, pretpostavlja se da se ponašanje ne-korisnika, koji predstavljaju mali procenat populacije [111], može podvesti pod isti obrazac kao ponašanje korisnika.

Srednja izloženost populacije u DL ($\overline{SAR}_{actual(area,population)}^{DL}$) u području pokrivenom ćelijama tipa c i tehnologije r , tokom perioda T , procenjen je na osnovu sledeće formule (5.6). Vrednosti SAR za celo telo za DL normalizovane na 1 W/m^2 gustine snage incidentnog talasa ($\overline{SAR}_{p,pos,r}^{DL,norm}$) kombinuju se sa procentima čovek-vreme ($f_{p,e,pos} \frac{TD_{p,e,pos}^{DL}}{T}$) po pojedinim stavovima

tela od ukupno 100% čovek-vremena (cela populacija u celom periodu posmatranja T), da bi se dobio srednji normalizovani SAR po RAT-u (r) za *downlink*. $f_{p,e,pos}$ predstavlja procenat populacije u određenom okruženju, sa određenim stavom, dok $TD_{p,e,pos}^{DL}$ predstavlja vreme provedeno u ovom stavu. $\bar{S}_{RXinc,area}^r$ predstavlja srednju gustinu incidentne snage u vremenu i po populaciji, za RAT r , usrednjen po području, gde područje (*area*) može biti oblast koji pokriva mala ćelija, npr. mikro oblast, ili makro oblast, $area = (micro\ area, macro\ area)$.

$$\overline{SAR}_{actual}^{DL}(area, population) = \sum_r^{GSM,UMTS} \bar{S}_{RXinc,area}^r$$

$$\sum_p^{child,adult} \sum_e^{indoor,outdoor} \sum_{pos}^{1..6} f_{p,e,pos} \frac{TD_{p,e,pos}^{DL}}{T} SAR_{p,pos,r}^{DL,norm} \quad (5.6)$$

5.3.4.1 Prosečno vreme zadržavanja u stavu i procenat populacije u stavu

Procenti čovek-vreme ($f_{p,e,pos} \frac{TD_{p,e,pos}^{DL}}{T}$), koji se odnose na procenat populacije i vremena u određenom stavu tela, dobijeni su na osnovu matrice segmentacije korisnika (tabela 5.7) i ćelijske statistike, preciznije na osnovu srednjeg korišćenja prenosa govora i prenosa podataka, u Erlanzima, za ćelije od interesa. Procenti se primenjuju na populaciju i isti odnosi koriste se za sve tehnologije kojima je populacija u području izložena u *downlinku*. Procenti se razlikuju za makro oblast i oblast male ćelije, što će kasnije biti objašnjeno.

Za proračun izloženosti u *downlinku*, telesni stav (*pos*) uzima jednu od 6 vrednosti: *sedeći-govor-telefon*, *sedeći-podaci-telefon*, *sedeći-podaci-laptop-u krilu*, *sedeći-podaci-laptop-na stolu*, *stojeći-govor-telefon*, *stojeći-podaci-telefon*. Ovi stavovi nazvani su prema načinima korišćenja mobilnih uređaja i zapravo odgovaraju respektivnim pozama, tj. sedenje sa telefonom blizu glave ili sa telefonom u ruci ispred tela itd.

Tabela 5.10, na primer, prikazuje procenat čovek-vreme po kategorijama populacije (p), okruženja (e) i stava (pos), na osnovu matrice segmentacije korisnika i ćelijske statistike jednog od slučajeva koji su testirani i analizirani u ovom istraživanju (odeljak 7.2). Ove vrednosti služe za kombinovanje odgovarajućih normalizovanih vrednosti SAR-a za celo telo. One pokazuju da je npr. 31,91% odraslih u području, u bilo kom trenutku, sedelo sa rukama dole, kao kad se koristi servis prenosa podataka na telefonu.

Normalizovane vrednosti SAR-a za *downlink*, za celo telo, dobijene numeričkim simulacijama i korišćene u ovom istraživanju date su u tabeli 5.11 ($SAR_{p,pos,r}^{DL,norm}$).

Tabela 5.10 Procenti čovek-vreme za kombinovanje normalizovanih vrednosti SAR-a za proračun izloženosti u downlinku, za makro oblast kad je mikro sloj uključen, testni slučaj Mirijevo

Populacija (<i>p</i>)	Okruženje (<i>e</i>)	Stav (<i>pos</i>)	Udeo čovek-vreme u makro oblasti
Dete	<i>Indoor</i>	Sedeći-govor-telefon	4,99%
Dete	<i>Outdoor</i>	Stojeći-govor-telefon	1,25%
Odrasli	<i>Indoor</i>	Sedeći-govor-telefon	27,97%
Odrasli	<i>Outdoor</i>	Stojeći-govor-telefon	11,99%
Dete	<i>Indoor</i>	Sedeći-podaci-telefon	5,71%
Dete	<i>Outdoor</i>	Stojeći-podaci-telefon	1,45%
Dete	<i>Indoor</i>	Sedeći-podaci-laptop-krilo	0,01%
Dete	<i>Indoor</i>	Sedeći-podaci-laptop-sto	0,09%
Odrasli	<i>Indoor</i>	Sedeći-podaci-telefon	31,91%
Odrasli	<i>Outdoor</i>	Stojeći-podaci-telefon	13,96%
Odrasli	<i>Indoor</i>	Sedeći-podaci-laptop-krilo	0,20%
Odrasli	<i>Indoor</i>	Sedeći-podaci-laptop-sto	0,47%

Tabela 5.11. Normalizovane vrednosti SAR-a (na 1 W/m^2 gustine snage) za downlink [W/kg]

Servis	Populacija	Stav	GSM900	UMTS1940
Govor	Dete	Sedeći-telefon	0,0082	0,0071
	Dete	Stojeći-telefon	0,0084	0,0077
	Odrasli	Sedeći-telefon	0,0056	0,0043
	Odrasli	Stojeći-telefon	0,0052	0,0046
Podaci	Dete	Sedeći-telefon	0,0088	0,0071
	Dete	Stojeći-telefon	0,009	0,0077
	Dete	Sedeći-laptop-krilo	X	0,0069
	Dete	Sedeći-laptop-sto	X	0,0069
	Odrasli	Sedeći-telefon	0,0046	0,0043
	Odrasli	Stojeći-telefon	0,0052	0,0047
	Odrasli	Sedeći-laptop-krilo	X	0,0053
	Odrasli	Sedeći-laptop-sto	X	0,0053

Kombinovanjem vrednosti iz tabela 5.10 i 5.11 dobijaju se srednje normalizovane vrednosti SAR-a za downlink za celo telo, po tehnologiji i području (za makro oblast i za mikro oblast).

5.3.4.2 Srednja gustina incidentne snage

Da bi se procenio činilac $\bar{S}_{RXinc,area}^r$, mogu se koristiti dva tipa merenja, pri čemu svaki od njih ima svoje prednosti i nedostatke:

- Izmereni odbirci intenziteta električnog polja u nekom broju određenih tačaka unutar područja, po operatoru i frekvencijskom opsegu;
- Odbirci prijemne snage, UE Rx power, iz zadatih mrežnih izveštaja.

Prvo, merenja intenziteta električnog polja treba raditi profesionalnom mernom opremom sa izotropnom sondom, da bi se uvažio celokupan vektor električnog polja. Ova merenja se rade po frekvencijskim opsezima operatora, tako da se uzima u obzir uticaj svih susednih baznih stanica, drugih sektora iste bazne stanice i različitih nosilaca u opsegu datog operatora. Ova merenja se vrše na otvorenom, što predstavlja nedostatak za procenu izloženosti budući da se visok procenat populacije nalazi u zatvorenom prostoru u svakom trenutku. U svrhe usrednjavanja, odbirci se mogu skalirati prema procentu populacije koji se nalazi unutar objekata i sa faktorima slabljenja za zatvoreni prostor koji se mogu naći u literaturi. Budući da je pretpostavljeno da se više od 70% populacije nalazi u zatvorenom (tabela 5.5), ove pretpostavke mogu voditi ka popriličnoj nesigurnosti rezultata.

Drugo, odbirci predajne snage UE (UE Rx power) iz zadatih mrežnih izveštaja uzimaju u obzir korisnike u lošim, srednjim i dobrim radio uslovima. Uzimaju se na osnovu uzorka korisnika (metodologije merenja razlikuju se po RAT-u, više detalja u [100]). Kod UMTS-a se meri ceo nosilac, što znači da merenja ciljnih ćelija sa različitim nosiocima sadrže nivoe primljene snage koja potiče i od okolnih baznih stanica/sektora. Nedostatak je to što se nivo prijemne snage koji meri UE ne može direktno povezati sa gustinom snage, koja je potrebna za proračun izloženosti, budući da veza zavisi od tipa antene i njenog relativnog položaja u odnosu na vektor nailazećeg talasa. Drugim rečima, odbirci Rx snage ne uzimaju u obzir celo polje.

Kada se koristi prvi metod, merenja na terenu u nekom broju tačaka u području, merene srednje vrednosti polja ($\bar{E}_{out,zone}^r, zone = (zone1, zone2..)$) moraju se skalirati prema procentima populacije u zatvorenom i na otvorenom i sa faktorom slabljenja za zatvoreni prostor. To se radi prema sledećoj formuli (5.7), da bi se procenio stvarni srednji intenzitet polja za populaciju u zoni merenja (\bar{E}_{zone}^r), gde je *AttFactor* jednak 0,5 (6 dB), prema [112]. Raspodela populacije u zatvorenom (*In*) i na otvorenom (*Out*) prema tabelama 5.4 i 5.5, je 71,35% u zatvorenom i 28,65% na otvorenom.

$$\bar{E}_{zone}^r = \sqrt{\bar{E}_{out,zone}^r{}^2 * Out + (\bar{E}_{out,zone}^r * AttFactor)^2 * In} \quad (5.7)$$

Vrednosti za više zona se mogu kombinovati u jednu srednju vrednost za uniju zona korišćenjem slične formule sa kvadratnim korenom i uzimajući u obzir procenat ljudi u svakoj od zona. Ukoliko posmatramo makro oblast, kombinuju se vrednosti dve zone, oblasti male ćelije, npr. mikro oblasti (*zone1*), i makro oblasti bez mikro (*zone2*), prema procentima populacije u svakoj od zona, koji se procenjuju na osnovu procenata korisnika po slojevima ($f_{r,c}$). U slučaju da imamo kolocirane stanice u GSM i UMTS tehnologiji, vrednosti dve zone se kombinuju na sledeći način da bi se dobila srednja vrednost za makro oblast (5.8). $f_{microcell}$ predstavlja procenat korisnika koji su povezani sa mrežom preko mikro sloja i jednak je zbiru procenata korisnika koji su povezani na GSM mikro sloj i UMTS mikro sloj. Slično, $f_{macrocell}$ predstavlja procenat korisnika u području koji je povezan sa makro slojem (ovo su, dakle, korisnici koji se nalaze u makro oblasti bez mikro oblasti).

$$\bar{E}_{macro\ area}^r = \sqrt{\bar{E}_{zone1}^r{}^2 * f_{microcell} + \bar{E}_{zone2}^r{}^2 * f_{macrocell}}$$

gde je $f_{microcell} = f_{GSM,microcell} + f_{UMTS,microcell}$,

$$a f_{macrocell} = f_{GSM,macrocell} + f_{UMTS,macrocell}. \quad (5.8)$$

Ako posmatramo mikro oblast, srednja vrednost E-polja od RAT-a r koje stiže do populacije jednako je srednjoj vrednosti E-polja u zoni $zone1$:

$$\bar{E}_{micro\ area}^r = \bar{E}_{zone1}^r \quad (5.9)$$

Srednja gustina snage za frekvencijski opseg određenog RAT-a (r) u određenom području $area$ ($\bar{S}_{RXinc,area}^r$) dobija se na osnovu formule:

$$\bar{S}_{RXinc,area}^r = (\bar{E}_{area}^r)^2 / Z_0, \quad (5.10)$$

gde Z_0 predstavlja karakterističnu impedansu slobodnog prostora ($Z_0 = 120\pi \approx 376.73 \Omega$).

5.3.5 Kombinovanje podataka u ukupnu izloženost

Kombinovanje podataka biće izloženo na primeru dva sloja, makro i mikro. Kao što je prethodno rečeno, promene srednjeg stvarnog SAR-a ($\bar{SAR}_{actual(area,population)}$) možemo posmatrati na mikro području, odnosno unutar zone pokrivanja mikro sloja, i na makro području, odnosno unutar zone pokrivanja makro ćelija, uključujući i mikro oblast. U ove svrhe, i podaci dobijeni iz mreže i podaci iz merenja na terenu moraju se grupisati u odnosu na ove dve oblasti. Merenja intenziteta električnog polja na terenu moraju se uraditi u celoj makro oblasti, ali tako da posebno budu izdvojene tačke i odbirci u mikro oblasti, a posebno oni u ostatku makro oblasti (bez mikro oblasti). Podaci iz mreže dobijaju se na ćelijskom nivou, pri čemu su oblasti i određene u odnosu na pokrivanje ćelija. Svi ulazni podaci po pitanju mrežnih merenja i statistike na ćelijskom nivou mogu se uzeti kao proseki za sve ćelije odgovarajućeg sloja i tehnologije, za iste zone pokrivanja po sloju i tehnologiji. Način na koji kombinujemo podatke zavisi od toga da li posmatramo manju, mikro oblast, ili veću, makro oblast. Usrednjavanje se vrši po populaciji, tako da u svim kombinovanjima podataka figurišu procenti populacije.

Posmatramo slučaj kolociranih makro baznih stanica tehnologija GSM i UMTS (r) koje pokrivaju šire područje i kolociranih mikro baznih stanica koje pokrivaju manje područje unutar ovog većeg područja.

Ako posmatramo mikro oblast koju pokrivaju ćelije sloja $c = mikro$, pretpostavljamo da su svi korisnici u mikro oblasti povezani sa mikro baznim stanicama. Stoga, UL komponenta stvarnog SAR-a ($\bar{SAR}_{actual(area,population)}$) odnosi se samo na mikro sloj (GSM i UMTS mikroćelije), dok se DL komponenta odnosi na sve ćelije koje zrače ka mikro oblasti. UL komponente koje potiču od dve tehnologije kombinuju se posmatrajući procenat korisnika po tehnologijama i slojevima ($f_{r,c}$) relativno u odnosu na mikro sloj (5.11). $f_{GSM(micro\ area)}$ predstavlja procenat korisnika povezanih preko GSM tehnologije u mikro oblasti, a $f_{UMTS(micro\ area)}$ procenat korisnika povezanih preko UMTS tehnologije u mikro oblasti, pri čemu je zbir ovih procenata 100% jer posmatramo mikro oblast.

$$f_{microcell} = f_{GSM,microcell} + f_{UMTS,microcell}$$

$$f_{GSM(micro\ area)} = \frac{f_{GSM,microcell}}{f_{microcell}}, f_{UMTS(micro\ area)} = \frac{f_{UMTS,microcell}}{f_{microcell}},$$

$$f_{GSM(micro\ area)} + f_{UMTS(micro\ area)} = 100\%. \quad (5.11)$$

DL komponenta odnosi se na srednji intenzitet polja meren unutar mikro oblasti, pa se u tom slučaju za određivanje procenata čovek-vreme za pojedine telesne stavove računa ćelijska statistika samo za mikro ćelije.

Ako posmatramo makro oblast koju pokrivaju ćelije sloja $c = \text{makro}$, pretpostavljamo i dalje da su korisnici unutar zone pokrivanja mikro bazne stanice povezani sa njom (za svaku od tehnologija), dok su oni izvan ove zone pokrivanja povezani sa makro slojem. Dakle, UL komponente makro i mikro sloja moraju da se kombinuju uzimajući u obzir procenat korisnika po svakoj tehnologiji i sloju ($f_{r,c}$). DL komponenta odnosi se na srednji intenzitet polja koji stiže do populacije u celoj makro oblasti. Dobija se kombinovanjem srednjih vrednosti odbiraka uzetih u mikro oblasti i makro oblasti bez mikro, uzimajući u obzir procenat korisnika u mikro oblasti i makro oblasti bez mikro (na osnovu procenata korisnika po tehnologijama i slojevima, $f_{r,c}$) i pretpostavljajući da prostorna raspodela populacije prati raspodelu korisnika. Procenat čovek-vreme za telesne stavove za DL komponentu računaju se iz ćelijske statistike za makro ćelije i za mikro ćelije.

Treba naglasiti da se UL komponenta računa za korisnike mreže operatora iz koje je dobijena statistika i mrežna merenja, dakle prema njihovim vremenima korišćenja i drugoj statistici. Da bi se sračunao srednji stvarni SAR za celu populaciju, UL komponenta ($\overline{SAR}_{actual (area, operator's users)}^{UL}$) se mora skalirati na niže, odnosno usrednjiti u odnosu na populaciju ($\overline{SAR}_{actual (area, population)}^{UL}$) korišćenjem udela korisnika datog operatora u celokupnoj populaciji (5.12). U slučaju ovog istraživanja, najpre je određen procenat korisnika mobilnih tehnologija u populaciji i to na osnovu podataka iz IKT ankete [111] o procentu korisnika mobilnih telefona u populaciji (*share of users*, 91.4%). Zatim, budući da je istraživanje vršeno sa podacima iz mreže operatora Telekom Srbija, uzet je tržišni udeo ovog operatora prema broju aktivnih korisnika (*operator share*, 44.56%) iz izveštaja regulatora [113]. Proizvod ove dve vrednosti daje udeo korisnika operatora Telekom Srbija u ukupnoj populaciji i ta vrednost iznosi 40,73%. Dakle, sabiranjem izračunate DL komponente (5.6) sa 40,73% prethodno izračunate UL komponente za korisnike (5.2) dobija se srednji stvarni SAR za celu populaciju u području od interesa, a koji se odnosi na izloženost zračenju koje potiče od mreže operatora Telekom Srbija (5.1).

$$\overline{SAR}_{actual (area, population)}^{UL} = \overline{SAR}_{actual (area, operator's users)}^{UL} * operator\ share[\%] * share\ of\ users[\%] \quad (5.12)$$

Kompletan spisak korišćenih notacija i simbola dat je u Prilogu 1.

5.4 Diskusija i unapređenja metode

Metodu definisanu u ovoj disertaciji bi svaki operator mogao da koristi za procenu izloženosti populacije EM polju koje generišu njegova mreža i korisnici svojim aktivnostima. Ukoliko bi svaki operator pratio izloženost koja potiče od njegove mreže i sprovodio korake na smanjenju izloženosti [34], izloženost populacije koja potiče od ćelijskih mreža u nekom području mogla bi se minimizovati.

Srednji stvarni SAR bi se mogao dalje redukovati na jednu osobu i njenu konkretnu konekciju, korišćenje, trajanje, predajnu snagu, poziciju, stav. Korisnik bi mogao da dobija notifikacije od aplikacije na telefonu da ga upozore u situacijama više izloženosti, međutim granične vrednosti i tolerancija bile bi upitne budući da bi zahtevale novu regulativu.

Prethodno pomenuti nedostaci metode pobrojani su niže, uz predloge za njihovo prevazilaženje, tako da mreža ostane glavni izvor podataka. Korišćenjem sistema koji prikupljaju velike količine podataka u mreži i primenjene statistike ublažile bi se nesigurnosti procene. To bi bio korak ka cilju

buduće mreže koja bi bila svesna EM izloženosti koju stvara, mreže koja bi imala način da proceni izloženost populacije i da se samo-optimizuje, računajući izloženost kao još jedan ključni pokazatelj performansi (KPI) [34].

5.4.1 Pojam područja

Kao što je napomenuto na početku ovog poglavlja, pojam područja je, budući da se vezujemo za statistiku i merenja sa mreže, „plivajući“ pojam jer se pokrivanje ćelija menja u vremenu. Dešavaju se promene ivica ćelije, povremeno ispadanje korisnika iz pokrivanja dominantne ćelije usled fedinga, korisnici se kreću te ulaze u područje pokrivanja i izlaze iz njega. Međutim, kako se stvarna izloženost odnosi na populaciju u području pokrivanja, a ne na kruto geografsko područje, možemo smatrati da su u statistiku za period posmatranja uračunate promene skupa korisnika koji su povezani sa ćelijom usled promena ivica pokrivanja, uz nedostatke navedene uz svaki prikupljeni podatak.

5.4.2 Frakcije korisnika

Procenti korisnika po ćelijama menjaju se u vremenu sa promenljivim radio uslovima i uslovima opterećenja u mreži, kao i sa kretanjem korisnika [114]. Korišćenje naprednih alata za obradu podataka sa mreže moglo bi da donekle smanji nesigurnost proračuna frakcija.

5.4.3 Mapiranje podataka iz korisničke ravni i radio parametara

Kao što je navedeno u odeljku o proračunu UL komponente izloženosti, glavni izazov za proračun srednjeg stvarnog SAR-a u operativnoj mreži je povezivanje podataka iz korisničke ravni (o korišćenju aplikacija) sa radio merenjima. Mapiranje podataka o nivoima prijemne i predajne snage bilo bi moguće samo po korisniku, preko mrežnih izveštaja po korisniku, ne i po ćeliji.

Srednji stvarni SAR mogao bi se preciznije izračunati na nivou mreže sa uvođenjem sofisticiranih alata koji kombinuju podatke iz radio dela mreže i podatke o korišćenim aplikacijama iz *core* mreže na bazi pojedinačnog korisnika (alati sa geolokacijom, sonde na mrežnim interfejsima u *core* mreži, alati za upravljanje korisničkim iskustvom). Na primer, alati sa geolokacijom prikupljaju poruke u radio mreži i korišćenjem patentiranih algoritama određuju poziciju pojedinačnih korisnika, kao i njihove radio parametre u vremenu. Sonde u *core* mreži prikupljaju signalizacije poruke i poruke korisničke ravni i mogu biti korisne da se odrede aplikacije koje se koriste. Alati za upravljanje korisničkim iskustvom kombinuju podatke iz radio mreže i iz *core* mreže kako bi identifikovali i rešili probleme u mreži i poboljšali korisničko iskustvo. Ovi sistemi koji obrađuju velike količine podataka u gotovo realnom vremenu mogli bi se koristiti da se korelišu podaci o nivoima snage i korišćenim aplikacijama, što nije moglo da se uradi sa dostupnim alatima u vreme ovog istraživanja u mreži Telekom Srbija. Dalje, uvođenje agenata na telefone, koji bi slali korelisane podatke o radio parametrima i korišćenim aplikacijama, pa čak i neke podatke o korisniku, takođe bi smanjilo nesigurnosti. Sa jedne strane bi ovakvi podaci bili korisni za proračun izloženosti, smanjili bi nesigurnost rezultata, a sa druge strane bi ipak povećali vreme aktivnosti mobilnog uređaja odnosno izloženost. Ovakvi podaci mogli bi se slati i u nekom predefinisanim vremenu, na primer noću, za kalibraciju postavljenog modela. Korelisani podaci o radio parametrima i korišćenim aplikacijama mogli bi se dobiti simulacijama, kao u [16], korišćenjem pretpostavki o saobraćaju po korisničkim profilima i podataka o stvarnom korišćenju izvedenih iz mreže u dužem periodu.

5.4.4 Merenja intenziteta električnog polja za izloženost u DL izvode se na terenu

Kod merenja u vezi sa DL komponentom, nesigurnosti rezultata odnose se pre svega na izbor tačaka u kojima se meri električno polje na terenu, zatim na visok procenat populacije u zatvorenom, gde nije moguće izvršiti merenje. Ukoliko bi se uzimali odbirci prijemne snage iz mrežnih izveštaja, rezultati ne bi uzeli u obzir ceo vektor E-polja i ne bi se mogli direktno povezati sa gustinom snage.

Međutim, eliminisala bi se potreba za merenjima na terenu. Mrežni izveštaji sadrže odbirke za reprezentativni uzorak korisnika, u dobrim, srednjim i lošim radio uslovima, i sa te strane uvažavaju direktno korisnike koji su u zatvorenom. Uz alate sa geolokacijom, mogli bi se dobiti rezultati za konkretne korisnike, ne samo za uzorak korisnika. Međutim, bilo bi potrebno modelovati vezu između srednje prijemne snage UE Rx power i srednje gustine snage.

5.4.5 Merenja DF su kompleksna i izvode se na terenu

Podaci sa sonde na mrežnim interfejsima mogli bi se iskoristiti za analizu podataka korisničke ravni i dobijanje podataka o korišćenim aplikacijama u gotovo realnom vremenu.

Međutim, faktor aktivnosti koji odgovara pojedinom tipu aplikacije, prenosu podataka preko određene tehnologije, određenim radio uslovima i određenim uslovima u mreži, morao bi se i dalje meriti na terenu i uzimati kao predefinisana vrednost.

5.4.6 Podaci o korisnicima, njihovoj upotrebi mobilnih servisa i stavu

U ovom proračunu koriste se predefinisani profili korisnika za dati tip ćelije (na osnovu dugoročne saobraćajne statistike), uz konkretnu ćelijsku statistiku. Uz povezivanje podataka iz radio mreže i sa sonde u *core* mreži, proračun bi se mogao izvršiti sa tačnom statistikom saobraćaja po korisniku. Podatke o stavovima bi i dalje trebalo proceniti, posebno za korisnike za ono vreme kada ne koriste servise ili za one koji nisu korisnici za sve vreme. Tačniji račun podrazumevao bi množenje procenata čovek-vreme svake od kategorija stavova sa srednjom gustinom snage za sve korisnike u tom stavu.

5.4.7 Broj korisnika servisa prenosa govora i prenosa podataka

Broj korisnika servisa prenosa govora (*voice*) i servisa prenosa podataka (*data*) mogao bi se dobiti i na nivou ćelije, sa naprednijom statistikom, i tada bismo po tehnologiji i sloju (*r*), (*c*) imali različite segmentacije.

U ovom istraživanju se za segmentaciju korisnika koriste podaci sa mreže izvučeni u dužem periodu (SAS), aktuelni podaci sa mreže zbirno (ADC) i spoljni statistički podaci (popis), uz neophodne pretpostavke o vezama radi dobijanja matrice segmentacije. Tačan odnos korisnika servisa *voice* i *data*, i podela po tipu uređaja, kao što je prethodno rečeno, mogli bi se dobiti naprednijim alatima u mreži, analizom po korisniku, za tačan period posmatranja. I dalje bi bile neophodne pretpostavke radi podele po kategorijama (*p*), (*pos*).

5.4.8 Kombinovanje

U narednim poglavljima biće reči o poređenju izloženosti populacije u području pokrivanja određenih makro ćelija za slučajeve kada su „podvučene“ mikro ćelije uključene i isključene. U ovakvim scenarijima, za slučaj kad su mikro bazne stanice isključene, nemamo tačan podatak o udelu korisnika unutar mikro oblasti, i ukupno i po tehnologijama, jer su svi korisnici povezani sa makro stanicama. Možemo samo pretpostaviti da se raspodela korisnika po oblastima nije mnogo promenila kad se isključi sloj malih ćelija u odnosu na slučaj kad je uključen. Takođe, potrebne su pretpostavke o sličnom načinu korišćenja mobilnih tehnologija po tehnologiji i radio uslovima u makro i mikro oblasti, kao i o tome da su korisnici slično raspoređeni po radio uslovima, kako bi se izloženost u UL za korisnike u makro oblasti primenila i na korisnike u mikro oblasti. I ovde bi alati sa geolokacijom koji uparuju poziciju i radio uslove po korisniku dali vredne podatke za precizniji proračun. Kod DL komponente, procenti čovek-vreme za telesne stavove računaju se na osnovu saobraćajne statistike, pa se za mikro oblast mogu uvažiti isti kao kad je mikro sloj uključen, pod uslovom da se testiranja

izvode jedno za drugim u uslovima u mreži koji se mogu smatrati stacionarnim, tako da pretpostavljamo da populacija u mikro oblasti nije mnogo promenila ponašanje u tom periodu.

6 EKSPERIMENTALNA ANALIZA UTICAJA KORIŠĆENIH SERVISA NA IZLOŽENOST POJEDINCA

Iz preliminarne analize date u poglavlju 4 jasno je da korišćeni servis utiče na izloženost pojedincu EM polju koje potiče od mobilnog uređaja, odnosno na izloženost u *uplinku*. U okviru ovog istraživanja sprovedena je eksperimentalna analiza uticaja korišćenih servisa na izloženost pojedinca za različite servise, preko različitih tehnologija i u različitim radio uslovima [102], a rezultati su izloženi u ovom poglavlju. Veza korišćenih servisa i izloženosti važna je i za ocenu ukupne izloženosti stanovništva, koja će biti analizirana u sledećem poglavlju.

Prethodna istraživanja i studije u ovoj oblasti poredile su izloženost za izabrane servise analizom nivoa izračene snage, pri čemu su odbirci snage prikupljeni korišćenjem merne opreme sa sondom i operativne statistike sa mreže. U [115] analizirana je srednja izračena snaga normalizovana na maksimalnu izlaznu snagu pametnog telefona za VoIP i VoCS (Voice over Circuit Switched network) pozive preko 3G mreže kroz serije dvominutnih poziva u raznim situacijama korišćenja, te je izračunato da iznosi 0,75% za VoIP i 0,22% za VoCS servis. U [29] prikupljena je mrežna statistika iz cele mreže da bi se procenila srednja izlazna snaga korisničkog uređaja za servise prenosa govora, prenosa podataka, prenosa govora i podataka i video servis preko 3G mreže, a utvrđeno je da su srednje vrednosti normalizovane na maksimalnu izlaznu snagu iznosile 1%, 3%, 2% i 4% respektivno. U [85] analizirano je nekoliko servisa preko 3G i LTE mreže u različitim situacijama bežične komunikacije, a rezultati za 3G pokazali su da su servisi postavljanja podataka na internet generisali najviši nivo snage, kao i da su nivoi snage koje je generisao VoIP servis bili u proseku 1,4 puta veći od onih koje je generisao VoCS servis.

Predmet istraživanja u ovoj disertaciji je srednji stvarni SAR, koji predstavlja srednju dozu primljenu tokom korišćenja servisa podeljenu sa posmatranim periodom korišćenja. Eksperimentalna analiza sprovedena je korišćenjem mrežnih izveštaja po korisniku koji se zadaju sa sistema za nadzor, merenja na terenu sa laboratorijskom opremom i sa *drive-test* alatom, i korišćenjem SAR koeficijenata koji su dobijeni numeričkim simulacijama. Analizirano je devet tipičnih servisa kada se koriste preko GSM mreže, preko UMTS mreže i preko WLAN mreže, u dobrim, srednjim i lošim radio uslovima, uzimajući u obzir srednje vrednosti snimljenih odbiraka snage i srednju vrednost aktivnosti korisničkog uređaja na radio interfejsu. Izloženost osobe koja potiče od korišćenja mobilnog uređaja poredi se za različite testne slučajeve, u stvarnim situacijama korišćenja i na osnovu stvarnog srednjeg SAR-a. Zaključci u vezi sa kritičnim servisima su u skladu sa prethodnim istraživanjima u ovoj oblasti, o čemu će biti reči kasnije. Rezultati istraživanja prikazani u ovom poglavlju objavljeni su u članku „Experimental analysis of individual EMF exposure for GSM/UMTS/WLAN user devices“ u časopisu *Annals of telecommunications* [102].

6.1 Izloženost pojedinca u *uplinku*

Servisi koji su izabrani za analizu predstavljaju tipične vrste saobraćaja: govorni servis, pretraživanje interneta, video striming, TV, audio striming, preuzimanje i postavljanje/slanje datoteka, govorni servis preko Skype-a (VoIP) i video servis preko Skype-a. GSM i UMTS, kao 3GPP tehnologije, inherentno podržavaju govorni servis, dok WLAN mreže prenose govor samo kao VoIP saobraćaj korišćenjem aplikacija za prenos podataka poput Skypa, Vibera, WhatsAppa.

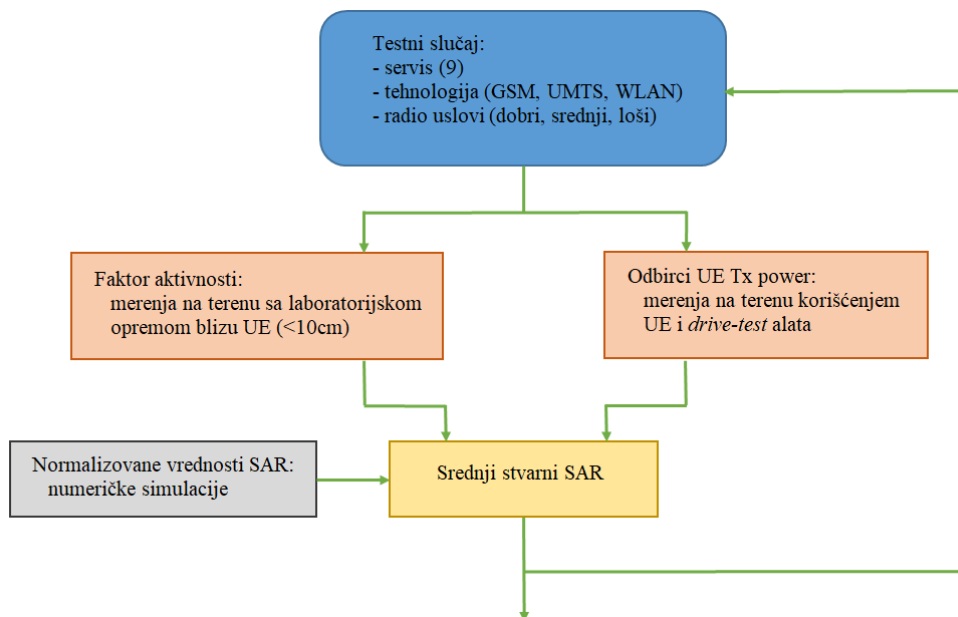
U ovom slučaju, analizira se izloženost u *uplinku*, koja zavisi od aktivnosti korisnika. Formula za izloženost u *uplinku* (jed. 5.2) svodi se na jednog korisnika (jed. 6.1) i analizira se kako njegovo

konkretno korišćenje mobilnih servisa utiče na njegovu sopstvenu izloženost. On je jedini u području (*area*) i jedini je predstavnik neke kombinacije kategorija ($\overline{SAR}_{r,service}^{UL,norm} = SAR_{p,pos,service,r}^{UL,norm}$), a evaluiramo izloženost za korišćenje jednog po jednog servisa (odnosno, ceo period posmatranja T korisnik koristi jedan servis ($\frac{T_{Dr,c,service}^{UL}}{T} = 1$)). Ovde posmatramo i uticaj tehnologije, pa se odvojeno posmatraju komponente izloženosti u *uplinku* za GSM i UMTS, preko makro ćelija.

$$\overline{SAR}_{actual}^{UL}(user,service,r) = \bar{P}_{TX,service}^{r,c} \overline{SAR}_{p,pos,service,r}^{UL,norm} \quad (6.1)$$

Srednji stvarni SAR, $\overline{SAR}_{actual}^{UL}(user,service,r)$ [W/kg], kao srednja primljena doza podeljena sa periodom posmatranja, računa se usrednjavanjem predajne snage korisničkog uređaja u vremenu, u periodu korišćenja određenog servisa, preko određene tehnologije i u određenim radio uslovima, i množenjem ove srednje vrednosti sa normalizovanom vrednošću SAR (na 1 W predajne snage) za odgovarajući frekvencijski opseg, kategoriju korisnika i uslove korišćenja.

Prvi parametar, srednja predajna snaga \bar{P}_{TX} [W], izračunava se korišćenjem snimljenih odbiraka predajne snage korisničkog uređaja i srednjeg faktora aktivnosti za date uslove i korišćen servis. Normalizovana vrednost SAR (na 1 W prijemne snage) uzima se za jednu kombinaciju kategorija, npr. SAR za celo telo, za model odraslog čoveka, u sedećoj pozi, sa telefonom blizu glave za govorni poziv i sa telefonom u ruci prilikom korišćenja prenosa podataka, normalizovan na izlaznu snagu mobilnog uređaja od 1 W. Srednji stvarni SAR se onda predstavlja kao proizvod tri činioaca: srednje vrednosti snimljenih odbiraka snage, faktora aktivnosti i normalizovane vrednosti SAR, kako je i prikazano na slici 6.1.

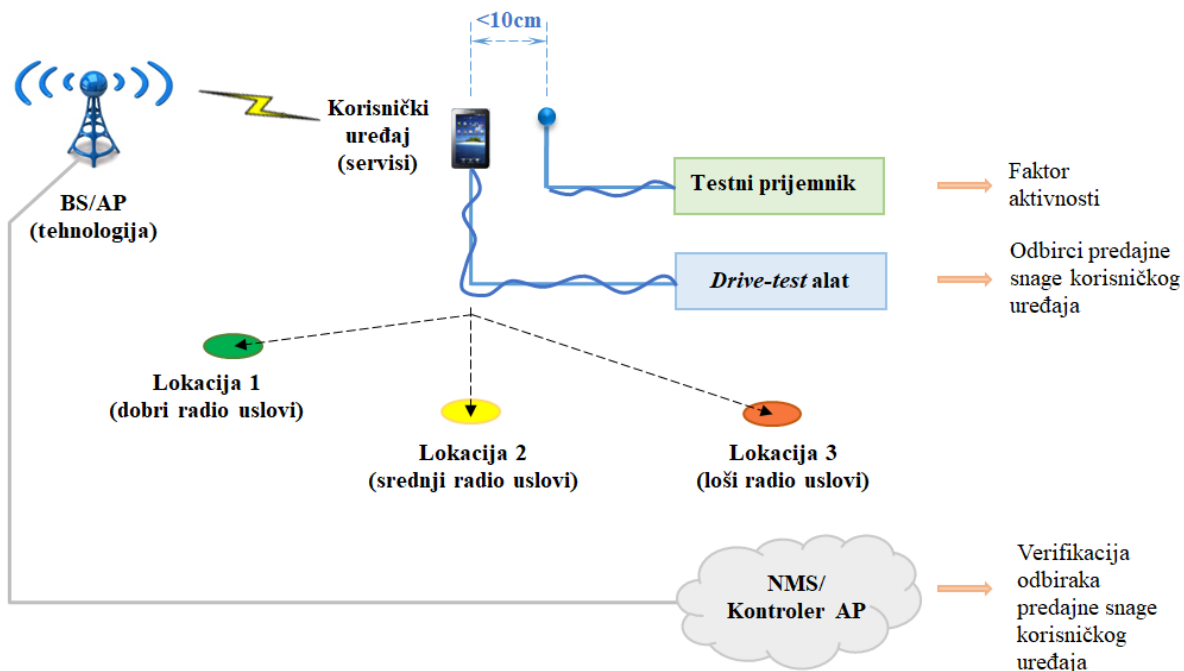


Slika 6.1 Dijagram toka merjenja

6.2 Merna postavka i metodologija merjenja

Merenja su izvedena u visoko urbanom delu grada Beograda, tokom sati visokog opterećenja mreže. Korišćen je mobilni telefon Sony Xperia V (pametni telefon sa operativnim sistemom Android). Merjenja su izvođena u mreži operatora Telekom Srbija i to u GSM, UMTS i WLAN mreži. Za svaki servis, preko svake tehnologije, na lokacijama sa dobrim, srednjim i lošim prijemnim signalom (odnosno radio uslovima), uzeti su odbirci predajne snage i zabeležena je aktivnost na radio

interfejsu, kao što je prikazano na slici 6.2. Trajanje svakog merenja bilo je 15 minuta. Neki servisi su se sve vreme izvršavali tokom perioda merenja, dok je za druge unapred definisana sekvenca ponavljana nekoliko puta.



Slika 6.2 Merna postavka

Odbirci predajne snage korisničke opreme prilikom korišćenja GSM i UMTS tehnologije su zabeleženi korišćenjem *drive-test* alata NEMO kompanije Keysight (softver koji prilikom kretanja mobilnog uređaja na terenu beleži ključne parametre). Ova merenja su verifikovana korišćenjem mrežnih izveštaja u kojima se beleže merenja snage po korisniku, za GSM i UMTS, zadata i zabeležena kroz različite module platforme za upravljanje mrežom (NMS) Ericsson Operations Support System, Radio and Core (OSS-RC), verzije 12.3.1. Za servis prenosa podataka preko GSM tehnologije nije bilo dostupno mrežno merenje (izveštaji) [100], tako da su merenja snage za ove servise izvedena samo korišćenjem *drive-test* alata.

Merenja aktivnosti na radio interfejsu izvedena su korišćenjem mernog prijemnika Rohde & Schwarz (R&S) ESPI Test Receiver, kojeg kontroliše softver R&S ROMES. Merna antena postavljena je blizu korisničkog uređaja, na manje od 10 cm, da bi se obezbedila ekstrakcija signala koji potiče upravo i samo od tog uređaja. Izvršena su frekvencijski selektivna merenja sa periodom uzorkovanja od 100 μ s (Slike 1-3). Za predefinisane sekvence servisa zabeležen je oblik signala na radio interfejsu i izračunati su procenti aktivnosti.

Vrednosti parametara tehnologije koji opisuju radio uslove u testnim slučajevima dati su u tabeli 6.1. U pitanju su primljena snaga signala, kodna snaga i odnos signal-šum za tehnologije GSM, UMTS i WLAN, respektivno, za dobre, srednje i loše radio uslove. Vrednosti prikazane u tabeli 6.1 predstavljaju srednje vrednosti na lokacijama merenja. Reprezentativne vrednosti su određene korišćenjem operativne mrežne statistike, kao tipične vrednosti za korisnike blizu bazne stanice ili pristupne tačke (AP: Access Point), korisnike u sredini zone pokrivanja BS/AP i korisnike na ivici zone pokrivanja, po svakoj tehnologiji. Korisnički uređaj sa mernom opremom postavljen je na merne lokacije koje zadovoljavaju predefinisane srednje vrednosti. Varijacija prijemnog signala tokom merenja bila je manja od 2 dB.

Tabela 6.1 Parametri tehnologija za dobre/srednje/loše radio uslove

Radio uslovi	Dobri	Srednji	Loši
UMTS RSCP [dBm]	-76	-94	-102
GSM DL Rx Lev [dBm]	-70	-88	-95
WLAN S/N [dB]	44	27	17,5

U slučaju WLAN mreže, korišćena je pristupna tačka AP Cisco 1240. WLAN interfejs korisničkog uređaja emitovao je konstantnom snagom od 50 mW (17 dBm). Merenja faktora aktivnosti izvršena su na isti način kako je prethodno opisano, za WLAN standard 802.11g. Budući da signal u *uplinku* i signal u *downlinku* (koji potiče od pristupne tačke) dele isti frekvencijski kanal, definisani su pragovi snage, na osnovu zabeleženih odbiraka, tako da se mogu izdvojiti samo signali u *uplinku*, koji potiču od korisničkog uređaja koji se nalazio u neposrednoj blizini merne opreme [116]. Za dodatnu kontrolu i verifikaciju, merenja su takođe izvedena sa softverom za analizu WiFi paketa instaliranim na korisničkom uređaju [116].

Servisi su realizovani na sledeći način. Za govorni servis, snimljena je sekvenca razgovora i puštana je i ponavljana u odgovarajućim testnim slučajevima. Govorni servis u bučnom okruženju za GSM testne slučajeve, servis koji je za cilj imao da prikaže uticaj aktivnosti govora na faktor aktivnosti u kanalu sa vremenskim multipleksom, realizovan je na isti način, samo sa jakim pozadinskim šumom. Testovi sa govornim servisom preko Skype-a vršeni su korišćenjem aplikacije Skype, verzija 6.11. i korišćenjem iste sekvence snimljene za uobičajeni govorni servis. Testovi sa pretraživanjem interneta izvođeni su korišćenjem unapred definisane sekvence internet stranica koje se otvaraju, sa intervalima „čitanja“ (pauzama) između njih. Automatizacija je postignuta korišćenjem ekstenzije Selenium IDE 2.7.0 za internet pretraživač Mozilla Firefox. Testovi sa video servisom preko Skype-a izvođeni su korišćenjem opcije za video poziv u aplikaciji Skype. Testovi sa video strimingom izvođeni su korišćenjem videa „Novak Djokovic tells David Letterman how he started playing tennis“ sa platforme Youtube. Rezolucija videa bila je 640x360p, brzina slika 30 fps i trajanje 3 min 49 s. Svaki test trajao je 15 minuta tokom kojih je video puštan nekoliko puta zaredom, tako da rezultati testa sadrže više sekvenci baferovanja video signala, onako kako se vide na radio interfejsu (povećana aktivnost). Televizijski (TV) servis, odnosno striming uživo, realizovan je korišćenjem TV kanala Al Jazeera English koji je emitovan na stranici „Live Station“ (<http://www.livestation.com/en/aljazeera-english>). Ovaj kanal imao je relativno uniformni sadržaj, obezbeđujući minimalan uticaj sadržaja na testne rezultate. Testovi servisa audio striminga izvođeni su korišćenjem online radija, „Naxi radio“ na internet stranici <http://www.naxi.rs/live>. Za testove prenosa datoteka (slanje i preuzimanje) napravljene su datoteke veličine koja omogućuje neprekidni prenos tokom trajanja testa, što je zavisilo od ostvarivog protoka za datu tehnologiju i radio uslove.

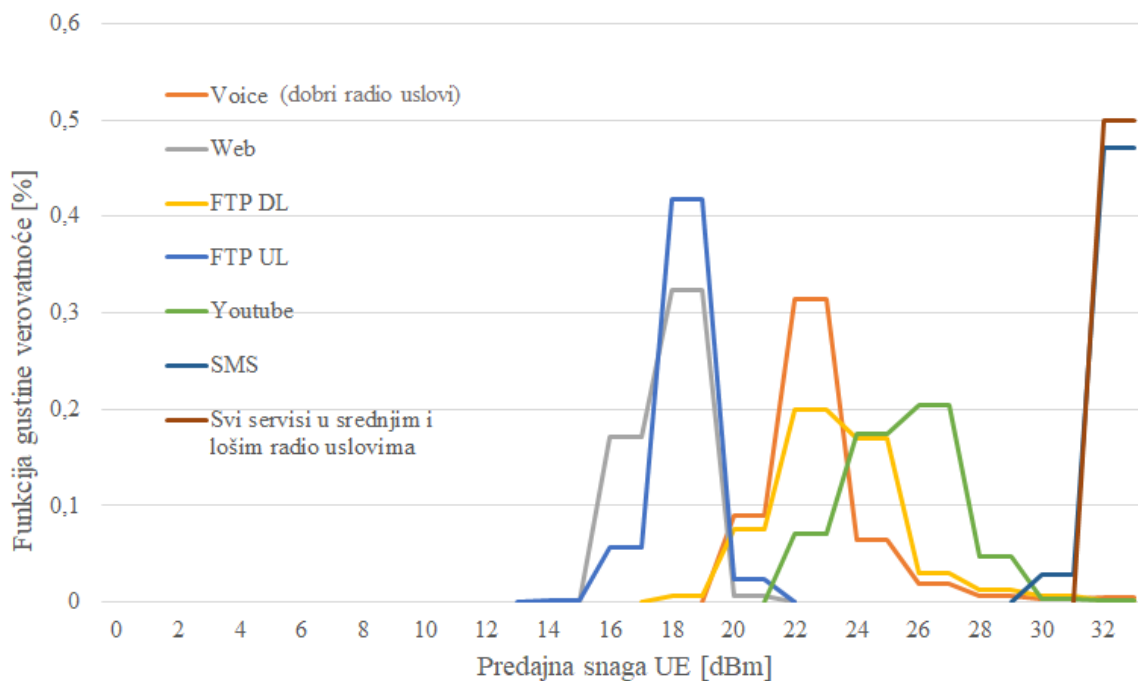
Normalizovane vrednosti SAR-a za celo telo koje su korišćene u proračunu uzete su iz prethodnog istraživanja u okviru projekta LEXNET [88], tabela 5.3. U ovoj analizi koristimo vrednosti za model odraslog čoveka, u sedećoj pozi, sa telefonom blizu glave za govorni poziv i sa telefonom u ruci prilikom korišćenja prenosa podataka. Korišćene su vrednosti za odgovarajuće frekvencijske opsege. Normalizovane vrednosti SAR-a koje su korišćene za proračun izloženosti u *uplinku* prikazane su u tabeli 6.2 [89].

Tabela 6.2 Normalizovane vrednosti SAR-a za celo telo $\left[\frac{W}{kg}\right] / W$ za uplink

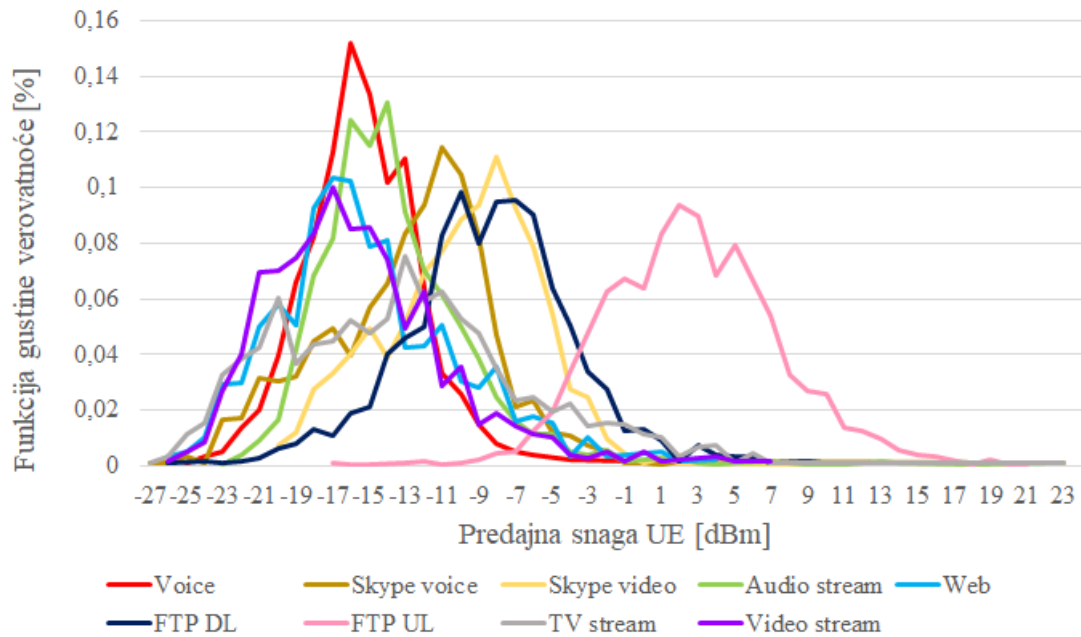
Konfiguracija	GSM 900	UMTS 2100	WLAN 2500
Odrasli, sedeći, telefon, govor	0,012	0,0052	0,0047
Odrasli, sedeći, telefon, podaci	0,0056	0,0081	0,0037

6.3 Rezultati merenja

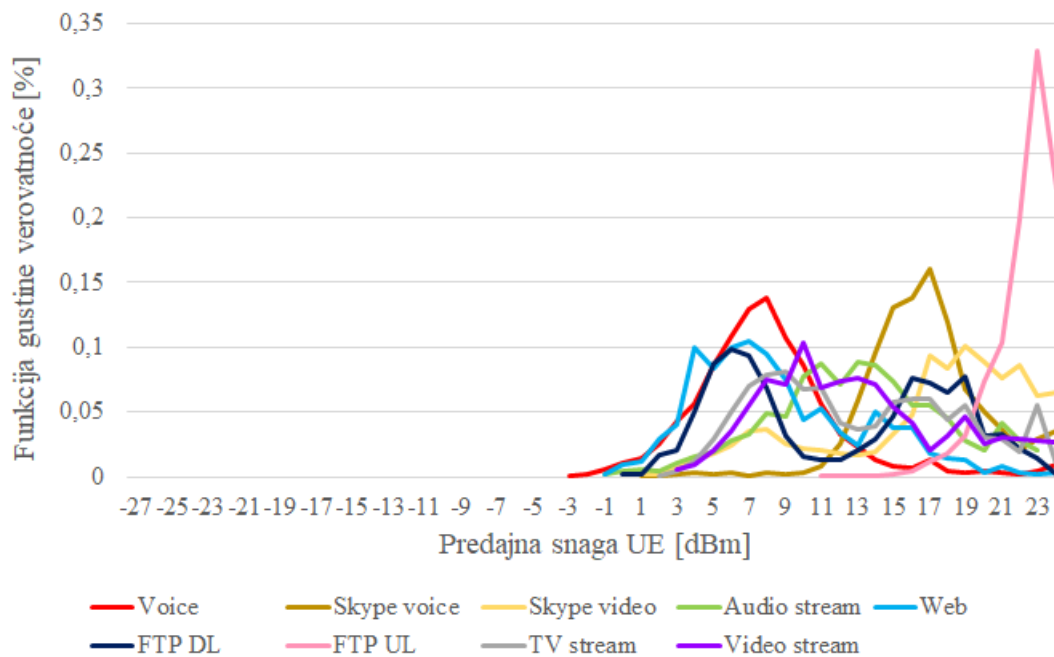
Uticaj tehnologije, korišćenog servisa i radio uslova na nivoe predajne snage prikazan je na slikama 6.3-6.5, za GSM i UMTS. Ovi 3GPP sistemi imaju mehanizam kontrole snage da bi obezbedili najbolje performanse po pitanju pokrivanja i kapaciteta. Pristupna mreža daje instrukcije korisničkom uređaju da koristi više ili manje snage u zavisnosti od uslova u radio kanalu i zahtevanog servisa. Kod GSM-a, slika 6.3, u dobrim radio uslovima, korisnički uređaj emitovao je višom snagom za servis prenosa govora i za SMS (Short Message Service), da bi obezbedio dobar prijem. U pogoršanim radio uslovima, visok nivo snage korišćen je za sve servise. Slike 6.4 i 6.5 prikazuju profil snage korisničkog uređaja kada se preko njega koriste različiti servisi u dobrim radio uslovima, odnosno u centru ćelije, i u lošim radio uslovima, odnosno na ivici ćelije, respektivno, preko UMTS-a. Profil snage pomera se ka višim vrednostima kako se korisnički uređaj udaljava od bazne stanice, budući da jačina primljenog signala opada. Posmatrajući pojedinačne servise, FTP *upload*, odnosno slanje datoteka, generisao je više nivoe snage u svim radio uslovima.



Slika 6.3 Funkcija gustine verovatnoće za odbirke predajne snage UE preko GSM-a za različite servise u dobrim, srednjim i lošim radio uslovima



Slika 6.4 Funkcija gustine verovatnoće odbiraka predajne snage UE preko UMTS-a za različite servise u dobrim radio uslovima



Slika 6.5 Funkcija gustine verovatnoće odbiraka predajne snage UE preko UMTS-a za različite servise u lošim radio uslovima

Srednje vrednosti odbiraka predajne snage korisničkog uređaja, za tipične vrste servisa u različitim radio uslovima, date su u tabeli 6.3, za tehnologije GSM i UMTS. Neki servisi nisu mogli biti realizovani na zadovoljavajući način preko tehnologije GSM, tako da su rezultati izostavljeni.

Ovi rezultati pokazuju da GSM tehnologija koristi više nivoa snage, što predstavlja inherentnu osobinu tehnologije. UMTS je sistem ograničen snagom, osetljiv na interferenciju, tako da su upotrebljeni nivoi snage dosta niži u odnosu na GSM. U dobrim radio uslovima, u zavisnosti od

servisa, srednja vrednost odbiraka predajne snage UE kada emituje preko GSM tehnologije bila je od 15,72 dB do 41,07 dB viša nego kad emituje preko UMTS tehnologije. U srednjim i lošim radio uslovima ova razlika bila je nešto manja i iznosila je između 10 dB i 30 dB.

Tabela 6.3 Srednja vrednost odbiraka UE Tx power za mobilni telefon tokom korišćenja tipičnih servisa preko GSM i UMTS mreže

Servis	Srednja vrednost UE TX Power [dBm]* po tehnologiji i radio uslovima					
	GSM			UMTS		
	Dobri	Srednji	Loši	Dobri	Srednji	Loši
<i>Web</i>	17,84	32,5	32,5	-15,14	5,25	8,67
<i>Voice</i>	22,77	32,5	32,5	-15,34	3,09	7,98
<i>Video streaming</i>	25,45	32,5	32,5	-15,62	2,06	13,01
<i>Skype VoIP</i>	-	-	-	-12,88	3,67	16,74
<i>Skype video</i>	-	-	-	-9,90	7,62	16,80
<i>TV</i>	-	-	-	-13,01	4,80	13,15
<i>File upload</i>	18,36	32,5	32,5	2,64	20,57	22,23
<i>File download</i>	23,34	32,5	32,5	-8,38	7,87	11,90
<i>Audio streaming</i>	-	-	-	-13,52	-0,13	13,04

* Predajna snaga kada predajnik emituje

Jasno je da u lošim radio uslovima mobilni uređaj emituje više puta jačom snagom nego u dobrim radio uslovima, usled prethodno opisanih mehanizama u 3GPP mrežama. Preko GSM-a, za svaki servis, UE je emitovala najvišom snagom i u srednjim i u lošim radio uslovima i ovi nivoi bili su od 7,05 dB (za video striming) do 14,66 dB (za pretraživanje interneta) viši nego u dobrim radio uslovima. Preko UMTS-a, pomerajući se iz dobrih ka srednjim radio uslovima, najviše povećanje srednje vrednosti odbiraka predajne snage uočeno je za servis pretraživanja interneta, 20,39 dB, a najniže za audio striming, 13,39 dB. Poredeći rezultate u dobrim i u lošim radio uslovima, predajna snaga povećala se najviše za servis Skype VoIP, 29,62 dB, a najmanje za slanje datoteka, 19,59 dB.

Slanje datoteka preko tehnologije UMTS dalo je više odbirke predajne snage u odnosu na druge servise, budući da ovaj prenos podataka zahteva dosta resursa pristupne mreže u svim radio uslovima. U dobrim radio uslovima, srednja vrednost odbiraka predajne snage za slanje datoteka bila je od 11,02 dB (u odnosu na preuzimanje datoteka) do 18,26 dB (u odnosu na video striming) veća nego za druge servise. U lošim radio uslovima, ovaj opseg bio je od 5,49 dB (u odnosu na Skype VoIP) do 14,25 dB (u odnosu na govorni servis). Servis Skype VoIP dao je u proseku više odbirke snage u svim radio uslovima u odnosu na govorni servis. Preko GSM tehnologije, u dobrim radio uslovima, video striming je generisao najvišu srednju vrednost odbiraka predajne snage, od 2,11 dB (za preuzimanje datoteka) do 7,61 dB (za pretraživanje interneta) višu nego kod drugih servisa. Usled mehanizama prenosa koji su različiti u odnosu na UMTS, sa malim brzinama koje se mogu postići za *upload*, servis preuzimanja datoteka dao je višu srednju vrednost nego slanje datoteka, za 4,98 dB, što je obrnuta situacija u odnosu na rezultate kad se koristi UMTS, za iste radio uslove. Korisnički uređaji kada koriste tehnologiju WLAN obično emituju unapred definisanom snagom, ali koriste različite modulacione šeme u zavisnosti od uslova radio kanala, i kao posledica, postižu različite realne protoke (odnosno, različit faktor aktivnosti).

Rezultati merenja faktora aktivnosti prikazani su u tabeli 6.4 za tehnologije GSM 900, UMTS 2100 i WLAN 802.11g, respektivno.

Tabela 6.4 Faktor aktivnosti (DF) korisničkog uređaja za tipične servise preko mreža GSM 900, UMTS 2100 i WLAN 802.11g

	DF (%) po tehnologiji i radio uslovima								
	GSM 900			UMTS 2100			WLAN 802.11g		
	Dobri	Srednji	Loši	Dobri	Srednji	Loši	Dobri	Srednji	Loši
<i>Web</i>	6,00	5,98	9,88	49,17	50,74	31,49	0,89	0,68	0,91
<i>Voice (bučno)</i>	12,41	11,63	12,42	-	-	-	-	-	-
<i>Voice (normalno)</i>	5,0	6,7	6,7	97,90	94,41	99,40	-	-	-
<i>Video streaming</i>	6,75	8,15	10,48	48,69	54,02	45,22	1,9	1,96	3,51
<i>Skype VoIP</i>	21,21	23,58	22,07	45,92	46,33	71,12	2,22	3,02	4,55
<i>Skype video</i>	22,11	22,04	17,44	55,76	59,26	62,58	8,77	13,41	20,32
<i>TV</i>	Bez servisa	Bez servisa	Bez servisa	72,24	74,41	48,82	2,23	3,1	3,46
<i>File upload</i>	23,68	19,86	24,09	99,18	95,26	40,50	56,81	71,26	73,66
<i>File download</i>	6,99	9,29	12,06	83,77	48,81	37,54	8,1	8,27	10,17
<i>Audio streaming</i>	5,30	6,49	10,11	30,89	54,09	66,58	0,4	0,53	0,56

*Sredina sa visokim akustičkim šumom

Razlike tehnologija se opet jasno vide. Govorni signal preko UMTS tehnologije, sistema sa višestrukim pristupom sa kodnim multipleksom, proizveo je aktivnost na radio interfejsu od skoro 100% vremena. Kod GSM-a, govorni poziv korisnika zauzima jedan od osam vremenskih slotova, šta daje faktor aktivnosti blizu ili ispod 12,5%, gde tačna vrednost zavisi takođe od aktivnosti govora (korisnik ne govori sve vreme) i funkcionalnosti diskontinualne transmisije (DTX: Discontinuous Transmission). Ovi efekti vidljivi su kad se uporede govorni poziv u normalnom okruženju (mali DF) i govorni poziv u bučnom okruženju (DF blizu maksimalne vrednosti) za tehnologiju GSM.

Faktor aktivnosti na radio interfejsu zavisi od trenutnog stanja opterećenja mreže i uslova u radio kanalu, koji se menjaju čak i kad se korisnik ne pomera. Ove varijacije opterećenja i uslova kanala u vremenu imaju uticaj na zabeleženi DF.

Gledajući rezultate za dobre radio uslove, može se videti da je i za GSM i za UMTS servis slanja datoteka generisao najviše aktivnosti na radio interfejsu. Kod GSM-a, aktivnost se približila teorijskih 25% za dva od osam vremenskih slotova koji se koriste za prenos podataka korisnika (broj korišćenih vremenskih slotova vidi se na *drive-test* alatu). Kod UMTS-a, *upload* stvara gotovo potpuno kontinualan signal, sa faktorom aktivnosti 99,18%. Kada su bežični resursi dostupni, blizu bazne stanice, aplikacija za slanje datoteka koristi ih na efikasan način da prenese sav sadržaj za kratko vreme. U WLAN mreži *upload* karakteriše prenos koji se odvija tokom više od pola posmatranog perioda, dok je za sve ostale servise aktivnost na radio interfejsu mnogo niža, manja od 10%.

DF tačno odslikava kako različite tehnologije i servisi reaguju na pogoršanje radio uslova. Loši radio uslovi impliciraju umetanje više zaštitnih bita i robusniju modulaciju, nižeg stepena, što je karakteristično za sve tri tehnologije. Za isti faktor aktivnosti na radio interfejsu, ovo bi značilo da se manja količina korisnog sadržaja prenese preko radio interfejsa u istom vremenskom intervalu. Ovo nije prihvatljivo za kritične prenose, kao što je govor. Obe tehnologije sa inherentnim servisom govora, GSM i UMTS, štite govorni servis podizanjem aktivnosti (da bi se isti sadržaj preneo u istom vremenskom intervalu). Ako pogledamo govorni saobraćaj koji se prenosi kao saobraćaj podataka (VoIP), sama radio mreža ne može da razlikuje ovaj saobraćaj od ostalog saobraćaja prenosa

podataka, koji generalno ima niži prioritet prenosa u odnosu na govor. Stoga sama VoIP aplikacija mora da primeni mehanizme koji bi zaštitili kvalitet govornog saobraćaja u realnom vremenu. DF za VoIP u lošim radio uslovima značajno je porastao, bio je veći od DF-a svih ostalih servisa prenosa podataka. Ovo znači da VoIP aplikacija prati svoj QoS i koristi obradu signala na nižim slojevima (OSI) na način koji joj omogućuje da svoje pakete šalje preko radio interfejsa vremenski efikasnije u odnosu na druge aplikacije koje prenose podatke, kao što je prenos datoteka koji je elastičan, tj. prilagođava se dostupnom protoku i nije kritičan po pitanju vremena prenosa. Ovde treba primetiti da za aplikacije koje komuniciraju sa udaljenim serverima, razmena paketa u vremenu, i posledično izgled signala na radio interfejsu, mogu zavisiti od dostupnog protoka s-kraja-na-kraj veze i od algoritama u protokol steku aplikacije.

6.4 Analiza izloženosti

Prethodna analiza izložila je kompleksne mehanizme i razlike u tehnologijama koje oblikuju faktore izloženosti. Izračunate vrednosti srednjeg stvarnog SAR-a za različite servise preko različitih tehnologija i u različitim radio uslovima, na osnovu jed. 6.1 date su u tabeli 6.5 [102].

Tabela 6.5 Poređenje srednjeg stvarnog UL SAR-a za različite servise koji se koriste na korisničkom uređaju preko tehnologija GSM, UMTS i WLAN 802.11g u različitim radio uslovima, za odraslu osobu koja sedi

Servis	Srednji stvarni SAR x10 ⁶ [W/kg] po tehnologiji i radio uslovima								
	GSM 900			UMTS 2100			WLAN 802.11g		
	Dobri	Srednji	Loši	Dobri	Srednji	Loši	Dobri	Sred.	Loši
<i>Web</i>	20,43	595,51	983,89	0,12	13,77	18,78	1,65	1,26	1,68
<i>Voice</i>	113,54	1429,74	1429,74	0,15	10,00	32,46	-	-	-
<i>Video streaming</i>	132,58	811,61	1043,64	0,11	7,03	73,25	3,52	3,63	6,49
<i>Skype VoIP</i>	-	-	-	0,12	5,61	174,58	5,22	7,10	10,69
<i>Skype video</i>	-	-	-	0,46	27,75	242,62	16,22	24,81	37,59
<i>TV</i>	-	-	-	0,29	18,20	81,67	4,13	5,74	6,40
<i>File upload</i>	90,90	1977,73	2398,97	14,75	879,82	548,20	105,10	131,83	136,27
<i>File download</i>	84,46	925,13	1200,98	0,99	24,21	47,10	14,99	15,30	18,81
<i>Audio streaming</i>	-	-	-	0,11	4,25	108,60	0,74	0,98	1,04

Najviše vrednosti stvarnog UL SAR-a generišu se korišćenjem tehnologije GSM (slika 6.6), što je i očekivano usled njenih inherentnih svojstava i viših nivoa snage po klasama snage korisničkog uređaja u poređenju sa UMTS-om i WLAN-om. U dobrim radio uslovima, izloženost u *uplinku* kada se koristi GSM bila je preko 6 puta (za slanje datoteka) do 1200 puta (za video striming) veća nego kad se koristi UMTS. Razlika između dve tehnologije nije bila tako izražena u srednjim i lošim radio uslovima, budući da i UMTS povećava snagu korisničkog uređaja kad se ovaj udaljava od bazne stanice. U poređenju sa WLAN-om, GSM je indukovao nešto manju izloženost za slanje datoteka i 5-37 puta veću izloženost za druge servise u dobrim radio uslovima. U srednjim i lošim radio uslovima, nivoi izloženosti kad se koristi GSM bili su mnogo viši od onih kad se koristi WLAN

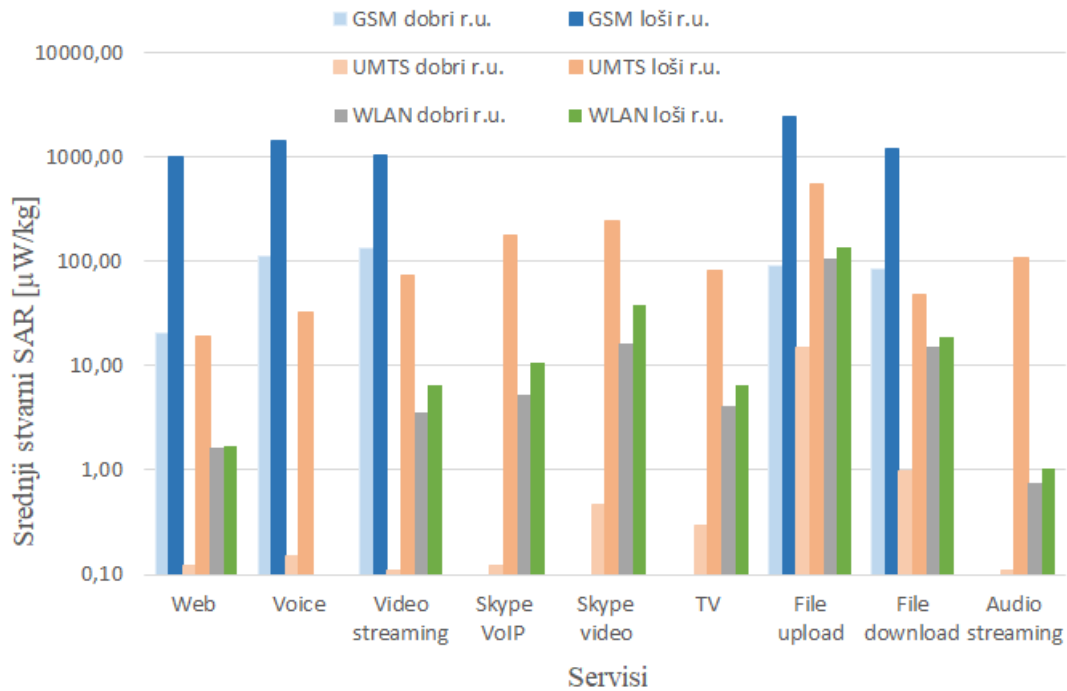
mreža, najviše usled povećanja snage preko GSM-a. Poredeći UMTS i WLAN, konstantna predajna snaga WLAN interfejsa bila je prilično visoka u poređenju sa nivoima snage kod UMTS-a, ali je veoma mali faktor aktivnosti preko WLAN-a, za sve servise osim slanja datoteka, smanjio srednju izloženost. U dobrim radio uslovima, izloženost kad se koristi UMTS bila je manja nego kad se koristi WLAN za sve servise, do 42 puta (slanje datoteka). Naprotiv, u lošim radio uslovima, rezultati su pokazali da je po pitanju izloženosti bolje koristiti WLAN tehnologiju (slika 6.6), budući da je generisala oko 2,5 puta (preuzimanje datoteka) do 105 puta (slanje datoteka) manju izloženost.

Kod tehnologije UMTS, VoIP je generisao nešto manju izloženost nego obični servis prenosa govora u dobrim i srednjim radio uslovima, ali je u lošim radio uslovima generisao više puta veću izloženost. Ovo je bio rezultat povećane snage i veoma povećanog faktora aktivnosti za VoIP u lošim radio uslovima, što je dalo 5,4 puta višu srednju vrednost izlazne snage i pokazalo, u poređenju sa [115][29][85], da radio uslovi igraju značajnu ulogu u oceni izloženosti. Premda je srednja vrednost odbiraka snage za VoIP servis bila viša u svim radio uslovima od one za govorni servis, smanjen faktor aktivnosti za VoIP doprineo je tome da VoIP servis generiše manju izloženost u dobrim i srednjim radio uslovima nego govorni servis (VoCS).

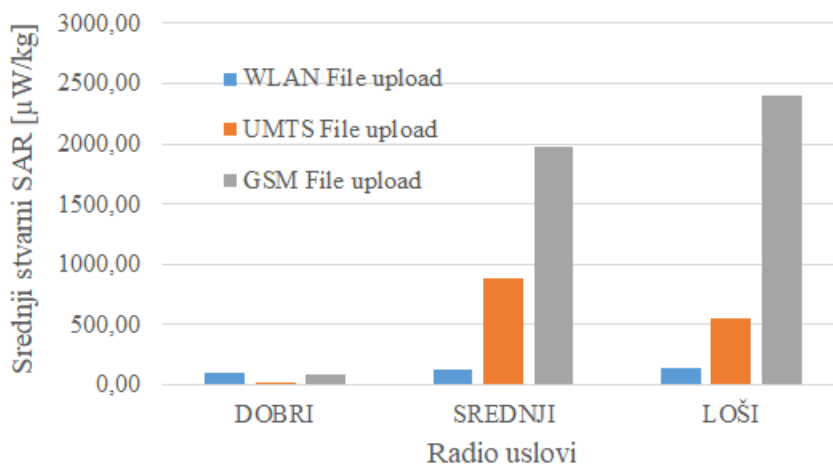
Govorni servis preko UMTS-a, i onaj koji se ostvaruje preko komutacije kola i onaj preko IP-ja, generalno su imali najniže srednje predajne snage u dobrim radio uslovima, manje od 1% normalizovano u odnosu na maksimalnu izlaznu snagu, što je u skladu sa prethodnim istraživanjima [115][29]. Međutim, u lošim radio uslovima srednja snaga premašila je nekoliko puta nivoje prijavljene kao prosek za uzorak korisnika i radio uslova u [115][29], popevši se do 3% za govorni servis i skoro 17% maksimalne izlazne snage za VoIP. Skype VoIP preko WLAN mreže generisao je 16 puta manju izloženost u lošim radio uslovima nego preko UMTS-a, iako je WLAN interfejs koristio višu snagu u odnosu na UMTS. Ovo je bila posledica mnogo nižeg DF-a kada se koristi WLAN. Postavlja se pitanje kako je aplikacija Skype preko dve različite tehnologije generisala dosta različite DF-ove: 4,55% za 802.11g i 71,12% za UMTS. Razlog leži u mehanizmima specifičnim za tehnologiju u sprezi sa vlasničkim (zaštićenim) IP telefonskim protokolom aplikacije.

Sa pogoršanjem radio uslova, izloženost se povećava za sve korišćene servise i tehnologije, uz nekoliko izuzetaka (slika 6.6). Izuzetak je servis *uploada* podataka (slika 6.7) preko UMTS-a, gde se stvarna izloženost smanjuje u lošim radio uslovima u odnosu na srednje radio uslove, za skoro 40%. U pitanju je veoma zahtevan servis i normalno, kada se pomera iz dobrih u srednje radio uslove, DF je visok i sistem pokušava da kompenzuje pogoršane radio uslove povećanjem predajne snage, da bi održao kvalitet servisa. Ovo je rezultiralo povećanjem izloženost od gotovo 60 puta kada se pomera iz dobrih u srednje radio uslove. U lošim radio uslovima snaga je još i viša, gotovo na maksimumu, tako da se kvalitet servisa ne može održati daljim povećanjem snage. Isti sadržaj ne može se preneti u istom periodu, odnosno protok se smanjuje, usled korišćenja nižih stepena modulacije i više zaštitnog sadržaja u radio okvirima. Razlog zbog kojeg DF pada na polovinu, u poređenju sa srednjim radio uslovima, verovatno leži u samom FTP protokolu i u njegovom transportnom protokolu (TCP: Transmission Control Protocol). Krajnje tačke TCP protokola vide transportni kanal kao zagušen, smanjenog propusnog opsega, tako da njegova kontrola toka prilagođava prenos podataka ovim uslovima. Sa pogoršanjem radio uslova kod WLAN servisa se izloženost veoma malo povećala u odnosu na GSM i UMTS, od povećanja od 2% (pretraživanje interneta) do 132% (Skype video). Ovaj sistem primenjuje različite mehanizme raspoređivanja resursa (*scheduling*) i kvaliteta servisa (QoS) u poređenju sa 3GPP sistemima. Spori rast faktora aktivnosti kada se udaljava od pristupne tačke može se pripisati samo aplikaciji koja pokušava da održi protok kako stepen modulacije opada. Još jedan izuzetak je pretraživanje interneta preko WLAN mreže u srednjim radio uslovima, gde je smanjenje faktora aktivnosti u poređenju sa dobrim radio uslovima dalo skoro 24% smanjenu izloženost i može biti posledica trenutnih uslova saobraćajnog opterećenja u mreži. Uopšteni rast izloženosti pojedinca u lošim radio uslovima je očekivan i dosta doprinosi ukupnoj izloženosti stanovništva.

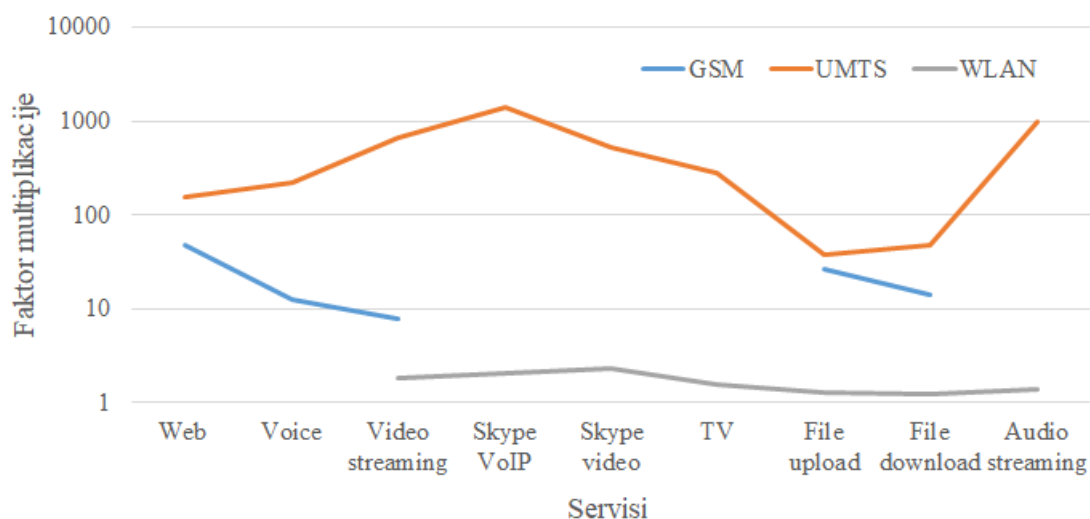
Prethodna istraživanja pokazala su da korisnici prenose značajne količine podataka u vreme kada imaju loš prijemni signal preko 3G-a [117]. Slika 6.8 prikazuje razmeru pogoršanja (odnosno povećanja) izloženosti kada se kreće od dobrih ka lošim radio uslovima, po tehnologiji i servisu, sa izraženim porastom izloženosti kod UMTS-a, posebno za servise Skype VoIP (1419 puta viša izloženost) i audio striming (976 puta viša izloženost). Servis slanja datoteka generisao je najviše nivoe izloženosti za sve tehnologije i radio uslove, osim za GSM u dobrim radio uslovima, što je u skladu sa prethodnim istraživanjem [85].



Slika 6.6 Srednji stvarni UL SAR za posatrani servis, po tehnologiji, u dobrim i lošim radio uslovima



Slika 6.7 Srednji stvarni UL SAR za servis slanja datoteka (file upload), po radio uslovima i po tehnologiji



Slika 6.8 Poređenje izloženosti u uplinku u lošim i u dobrim radio uslovima, po servisu i po tehnologiji

Tabela 6.5 takođe pokazuje da su servisi prenosa podataka preko GSM-a, osim video striminga, generisali manju izloženost nego servis prenosa govora u dobrim radio uslovima. Ovo je delom posledica više predajne snage za govorni servis u dobrim radio uslovima, u poređenju sa servisom prenosa podataka, a delom posledica više vrednosti normalizovane vrednosti SAR-a za korišćenje govornog servisa. U srednjim i lošim radio uslovima, predajne snage su bile na maksimumu tako da su razlike posledica odnosa DF-a i normalizovanog SAR-a. Normalizovani SAR je viši za govorni servis, ali je za servis slanja datoteka DF bio višestruko viši od DF-a za normalnu govornu konverzaciju, tako da je izloženost tokom korišćenja slanja datoteka bila viša.

6.5 Zaključak

Izloženost osobe koja potiče od korišćenja mobilnog uređaja zavisi od mnogo faktora, koji uključuju tehnologiju koja se koristi, frekvencijski opseg, uslove opterećenja u mreži i radio uslove, korišćene servise, ali takođe i starost, stav tela, sam uređaj kao izvor i njegovu poziciju relativno u odnosu na telo. Izgled signala na radio interfejsu zavisi i od protokola koji su karakteristični za aplikaciju i od protokola i procedura na radio interfejsu sa podešavanjima koja su specifična za mrežu. Ovako kompleksne zavisnosti mogu se analizirati samo statistički.

Srednji stvarni SAR, kao mera izloženosti koju generiše određeno korišćenje mobilnog uređaja, proporcionalan je srednjoj stvarnoj snazi koju uređaj emituje u nekom vremenskom periodu. Periodi aktivnosti na radio interfejsu su od suštinske važnosti za vremensko usrednjavanje odbiraka snage. Servisi i tehnologije mogu se porediti prema izloženosti u *uplinku* samo uzimajući u obzir i radio uslove kao važan faktor koji utiče i na predajnu snagu i na faktor aktivnosti.

U dobrim radio uslovima GSM tehnologija je generisala najvišu izloženost u *uplinku* za sve posmatrane servise osim slanja datoteka. Za slanje datoteka, WLAN tehnologija je generisala najvišu izloženost, oko 7 puta veću nego UMTS i oko 15% veću nego GSM. UMTS tehnologija je generisala najnižu izloženost u *uplinku* za sve servise. Ekstremni primer je servis video striming, gde je WLAN generisao 32,5 puta, a GSM 1226 puta veću izloženost nego UMTS.

Gledajući servise po tehnologijama, slanje datoteka je generisalo najvišu izloženost kod UMTS-a i WLAN-a, dok su za GSM to bili video striming i prenos govora. Pretraživanje interneta i audio striming bili su servisi sa najnižom generisanom izloženošću za sve tehnologije.

U srednjim radio uslovima, GSM je bio daleko najnepoželjnija tehnologija za korišćenje po pitanju izloženosti. Najbolja je bila WLAN, osim za servis prenosa govora putem Skype aplikacije, za koji je izloženost preko WLAN mreže u *uplinku* bila 26,5% viša nego preko UMTS-a. Po pitanju servisa, audio striming je generisao najmanju izloženost, dok je slanje datoteka generisalo najvišu. Kod UMTS-a je ovaj servis generisao 31,7 puta veću izloženost nego „drugi najgori“ servis, Skype video, i 206,9 puta veću izloženost od audio striminga. Prenos govora putem Skype aplikacije je bio bolji od inherentnog prenosa govora kod UMTS-a i u dobrim i u srednjim radio uslovima, na šta je prevashodno uticao niži faktor aktivnosti budući da je srednja vrednost odbiraka snage bila viša za Skype VoIP u svim radio uslovima.

U lošim radio uslovima GSM je opet bio najmanje poželjna tehnologija za korišćenje, dok je WLAN bio najbolja, budući da su nivoi izloženosti bili niži od 40% nivoa koje je generisao UMTS i čak ispod 1% nivoa koji je generisao UMTS za servis audio striminga. Slanje datoteka je opet bio najgori servis za korišćenje, sa izloženošću koja je bila 1,7 do 3,6 puta viša od drugog najgoreg servisa, govornog servisa za GSM i Skype videa za UMTS i WLAN. Pretraživanje interneta je za sve tri tehnologije bio prvi ili drugi najbolji servis po pitanju izloženosti u *uplinku*.

Loši radio uslovi predstavljaju najgori slučaj po pitanju izloženosti za sve tehnologije i servise, sa izuzetkom servisa slanja datoteka preko UMTS-a, za koji su srednji radio uslovi dali najviše odbirke snage, najviši faktor aktivnosti i posledično najvišu izloženost. Po tehnologiji, GSM je najmanje poželjna tehnologija, sa izuzetkom servisa slanja datoteka u dobrim radio uslovima, za šta je WLAN tehnologija generisala najviši nivo izloženosti. Po servisu, slanje datoteka je generisalo najviše nivoa izloženosti, sa izuzetkom servisa prenosa govora i video striminga preko GSM-a u dobrim radio uslovima. Analiza je pokazala da su zaključci po pitanju izloženosti u jednu ruku očekivani, usled svojstava određenih tehnologija, a u drugu ruku, nisu uvek jednostavni. Na srednji stvarni SAR utiču velike razlike u nivoima snage i u faktoru aktivnosti, budući da normalizovane vrednosti SAR-a imaju male varijacije (do 3 puta za model odrasle osobe i različita korišćenja i do 5,4 puta za model deteta, uzimajući u obzir i korišćenje telefona i korišćenje laptopa). Razlike u izloženosti od nekoliko redova veličine u različitim testnim slučajevima ne bi se mnogo promenile da je korišćen drugi uređaj, jer njih diktiraju tehnologija i mehanizmi karakteristični za aplikaciju više nego sam korisnički uređaj. Sami rezultati bi se promenili jer zavise i od korisničkog uređaja, njegovog softvera i podešavanja.

Smernice za smanjenje izloženosti pojedinca tiču se njegovog ponašanja. Pojedinaac može smanjiti sopstvenu izloženost pre svega držanjem korisničkog uređaja dalje od tela, zatim izbegavanjem korišćenja kada je prijemni signal loš, izbegavanjem uključivanja više bežičnih interfejsa u isto vreme. Na ponašanje pojedinca mreža nema uticaj, a današnji tempo života nameće potrebu da pojedinac bude dostupan uvek i svuda i ljudi, u opštem slučaju, pokušavaju da ostvare vezu bez obzira na to kakav je signal mobilne mreže, te se dosta saobraćaja ostvaruje u uslovima lošeg signala [117]. Iz rezultata je takođe jasno da korišćenje novije mobilne tehnologije, UMTS, za isti servis smanjuje izloženost, međutim pojedinac nije u situaciji da bira dostupnost pokrivanja pojedine tehnologije na svojoj lokaciji. Treba istaknuti i da korišćenje WLAN mreža, koje su danas veoma rasprostranjene, u situacijama lošeg signala mobilne mreže predstavlja preferirano rešenje u pogledu izloženosti.

7 EKSPERIMENTALNA ANALIZA UTICAJA ARHITEKTURE MREŽE NA UKUPNU SREDNJU IZLOŽENOST STANOVNIŠTVA

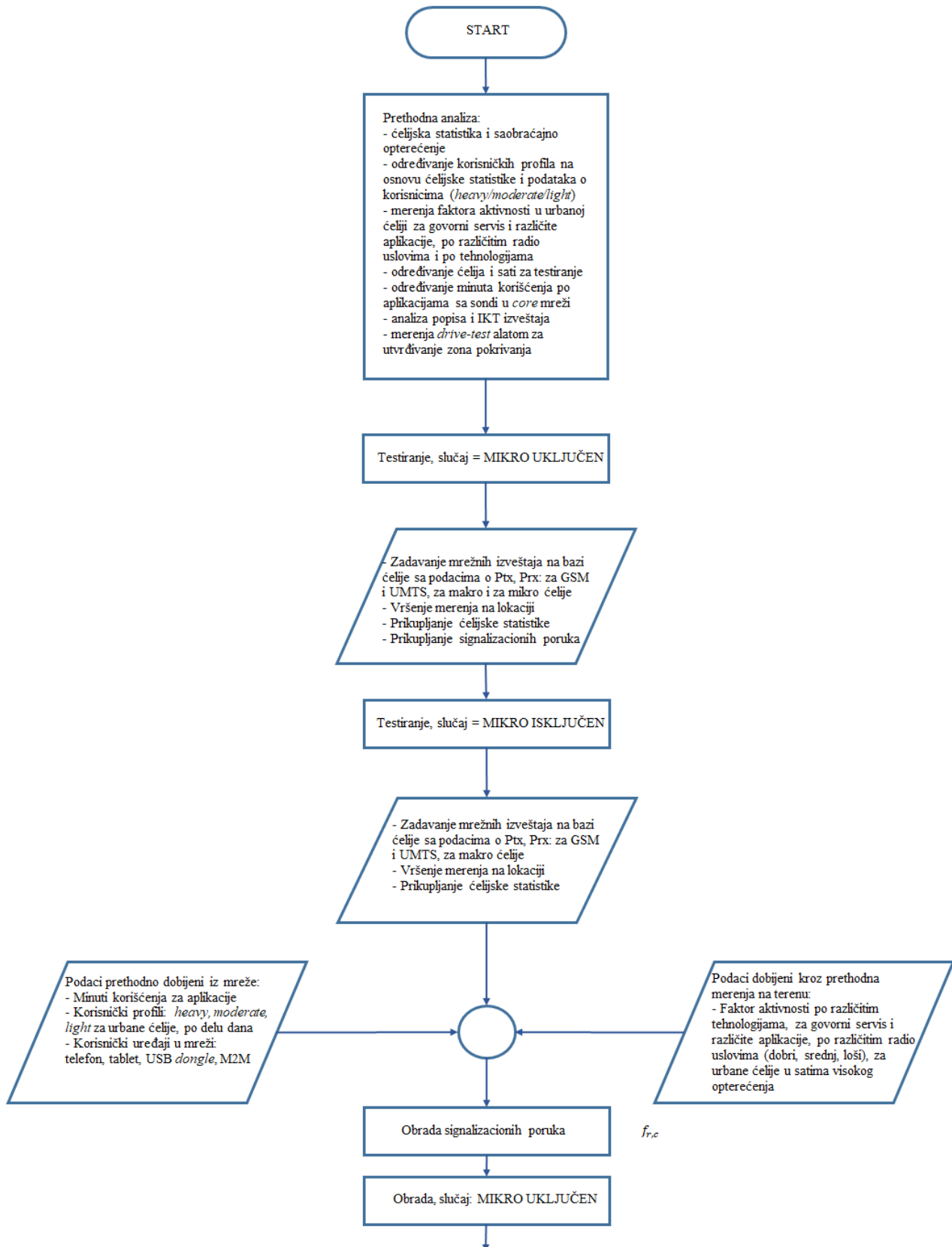
U ovom poglavlju će primena metode za procenu izloženosti biti prikazana kroz poređenje topologija stvarne, operativne mreže po pitanju srednje stvarne izloženosti populacije. Biće istaknute i prednosti korišćenja malih ćelija u smislu smanjenja izloženosti, pri čemu konkretno smanjenje veoma zavisi od konkretne topologije.

U poglavlju će biti analiziran uticaj dodavanja malih ćelija na dve lokacije, u dve različite topologije, na način da se u jednom testnom scenariju male ćelije uključe, a u drugom isključe. Dodaju se mikro ćelije, što je uobičajena topologija u mreži Telekoma Srbija. Razmatrane su tehnologije GSM i UMTS, a biće poređena izloženost populacije zračenju koje potiče od baznih stanica (svih baznih stanica u okruženju) i od korisničkih uređaja, po tehnologijama, po slojevima (makro sloj i sloj manjih ćelija) i po oblastima pokrivanja (oblast pokrivanja makro ćelija i oblast pokrivanja malih ćelija).

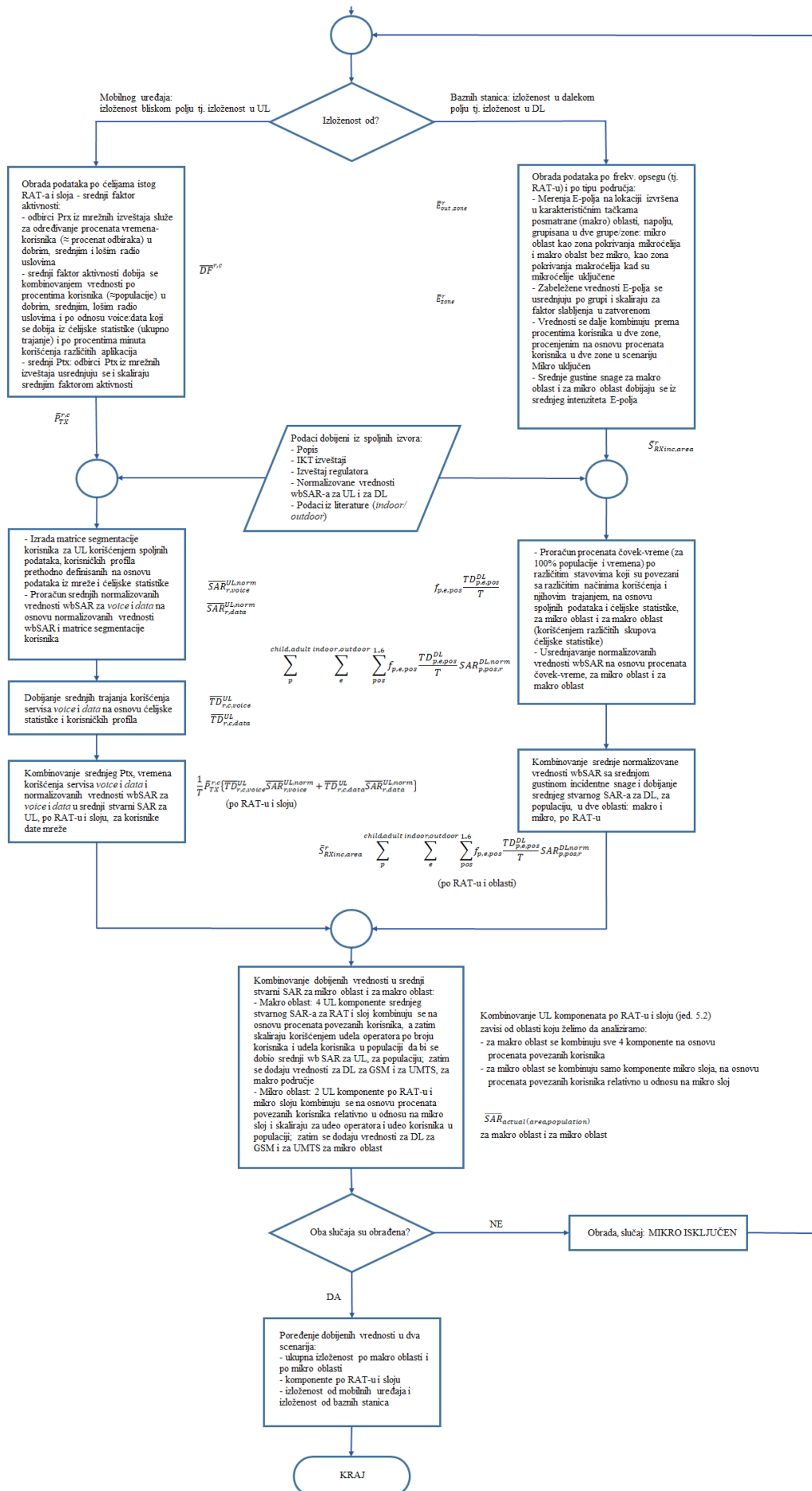
Nova metodologija je demonstrirana korišćenjem mrežnih merenja snage i merenja na terenu, uključujući i merenja faktora aktivnosti izložena u prethodnom poglavlju [102], dodatnih podataka koji su ekstrahovani iz mobilne mreže (dugoročna ćelijska statistika za saobraćajne profile korisnika, stvarna ćelijska statistika tokom perioda testiranja za stvarnu upotrebu servisa prenosa govora i podataka, podaci sa sonde u *core* mreži za statistiku korišćenja aplikacija, podaci iz signalizacionih poruka za određivanje raspodele korisnika po slojevima mreže) i dodatnih eksternih podataka (normalizovane vrednosti SAR dobijene numeričkim simulacijama, popis radi određivanja raspodele starosnih grupa, literatura za određivanje raspodele populacije u zatvorenom i na otvorenom, pretpostavke zasnovane na anketama o korišćenju IKT, pretpostavke o stavu zasnovane na obrascima korišćenja). Jedine simulirane vrednosti u ovoj studiji su normalizovane vrednosti SAR. Svrha ekstrahovanja ovolike količine podataka iz žive mreže bila je da se ocene realni, stvarni uslovi izloženosti i da se istraže mogućnosti da mreža u budućnosti bude „svesna“ EM zračenja, odnosno da evaluiru i nadzire izloženost stanovništva RF EM polju.

7.1 Dijagram toka procesa i dijagram kalkulacije

Za eksperimentalnu analizu uticaja arhitekture mreže na srednju stvarnu izloženost populacije u području od interesa izabrane su dve lokacije. Prva lokacija je pijaca Mirijevo, gde je analiziran uticaj dodavanja GSM i UMTS mikro ćelija na otvorenom na izloženost populacije, a druga lokacija je poslovna zgrada Lola, gde je analiziran uticaj dodavanja GSM i UMTS malih ćelija sa distribuiranim antenskim sistemom u zatvorenom prostoru. Na svakoj lokaciji su izvedena po dva testna slučaja – sa uključenim i sa isključenim mikro slojem. Eksperimentalna analiza je opisana dijagramom toka prikazanim na slici 7.1.



Slika 7.1 Dijagram toka eksperimenta (1)



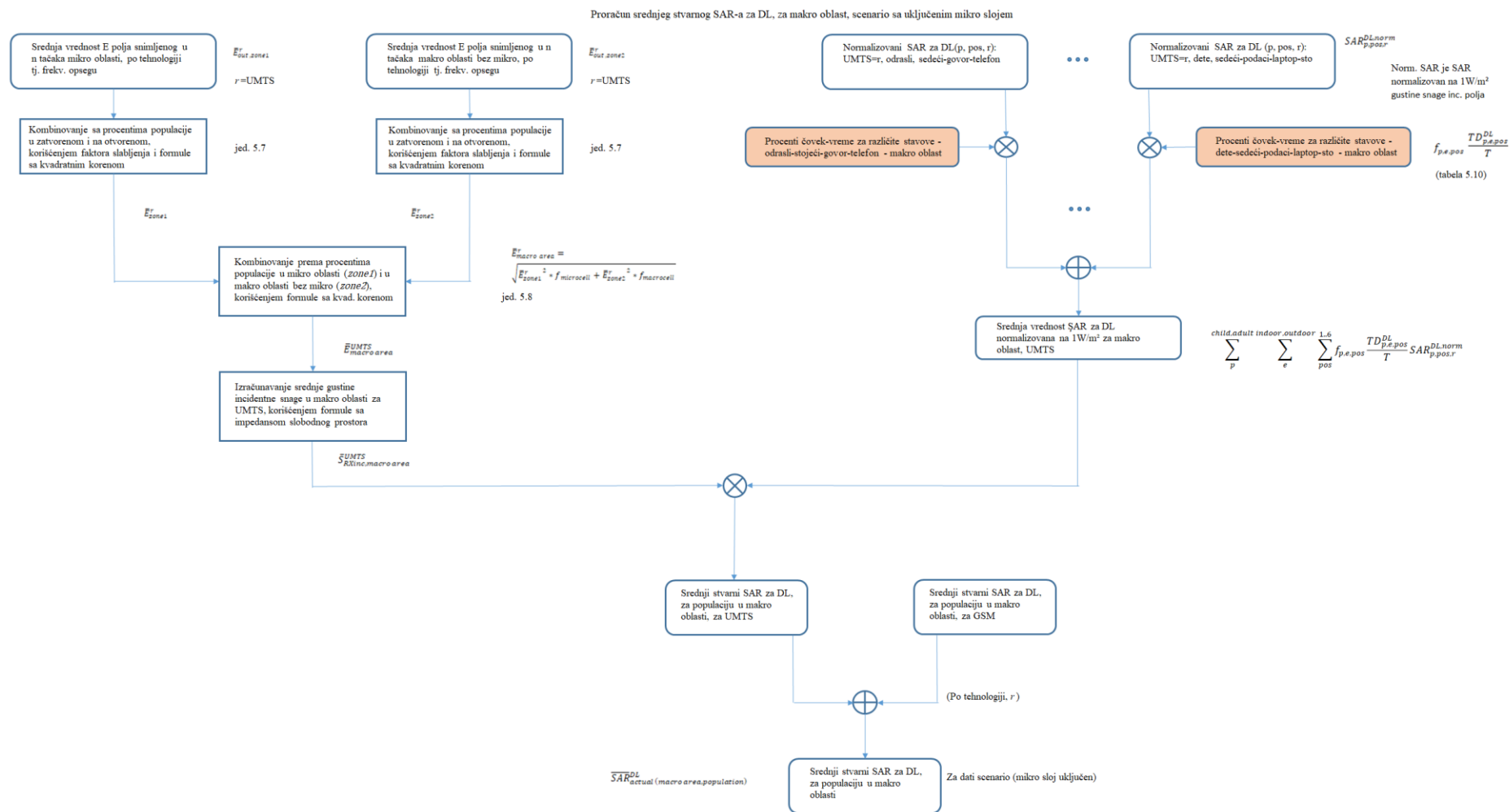
Slika 7.1 Dijagram toka eksperimenta (2)

Prethodnom analizom dobijaju se saobraćajni profili korisnika (intenzivno, umereno i slabo korišćenje, *heavy/moderate/light*). Merenjima na terenu u definisanim uslovima određen je i faktor aktivnosti za tipične vrste saobraćaja, preko različitih tehnologija, pod sličnim opterećenjem mreže kao u vreme ova dva eksperimenta (sati visokog opterećenja u urbanoj sredini), i u različitim radio uslovima. Unapred je određena i vremenska raspodela korišćenja aplikacija na osnovu podataka sa sonde u *core* mreži, prema vremenu korišćenja, tzv. *minutes of use*. Određena je i raspodela korisničkih uređaja (telefon, laptop) u mreži.

Testiranje dva scenarija kod oba testna slučaja obavljeno je jedno za drugim, po sat vremena, u dnevnim satima visokog opterećenja mreže, tako što je mikro sloj najpre bio uključen, a zatim isključen. U toku testiranja je prikupljana ćelijska statistika relevantnih ćelija, signalizacija, zadata su mrežna merenja snage i izvedena su merenja na terenu, kako je opisano u poglavlju 5.

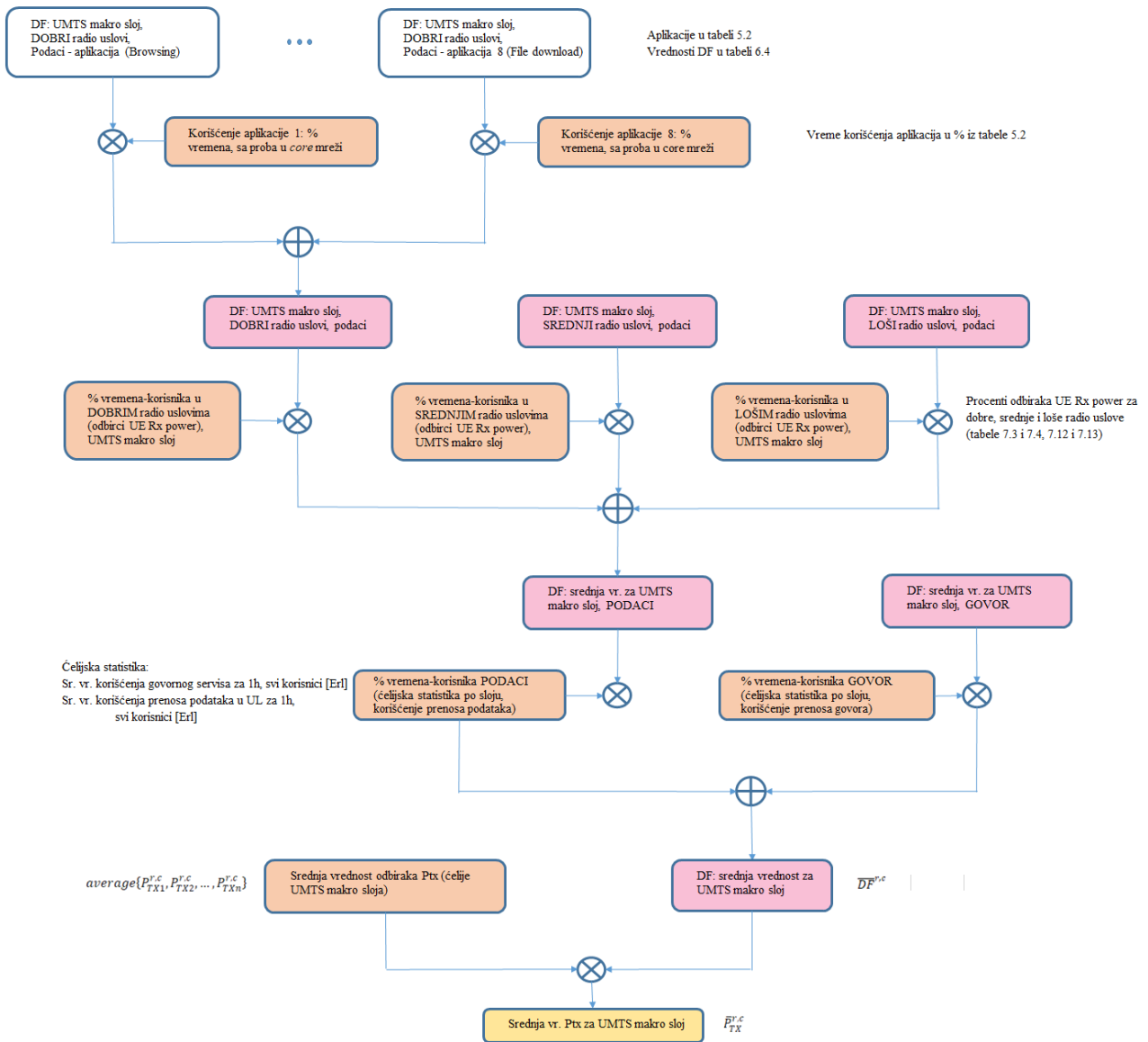
Za svaki od testnih slučajeva vršena je obrada podataka i proračun izloženosti u bliskom polju (*uplink*) i dalekom polju (*downlink*), po tehnologiji, na način opisan u poglavlju 5. Dobijene vrednosti su kombinovane u ukupnu izloženost u području pokrivanja makro ćelija i u području pokrivanja mikro ćelija, takođe na način opisan u poglavlju 5. Na kraju je izvršeno poređenje izloženosti koju generišu bazne stanice i korisnički uređaji, poređenje po tehnologiji i po slojevima, kao i po oblastima pokrivanja, makro oblasti i mikro oblasti.

Dijagram kalkulacije prikazan je na sledećim slikama 7.2-4. Dijagram kalkulacije detaljnije prikazuje ceo proračun, prema metodi izloženoj u poglavlju 5.

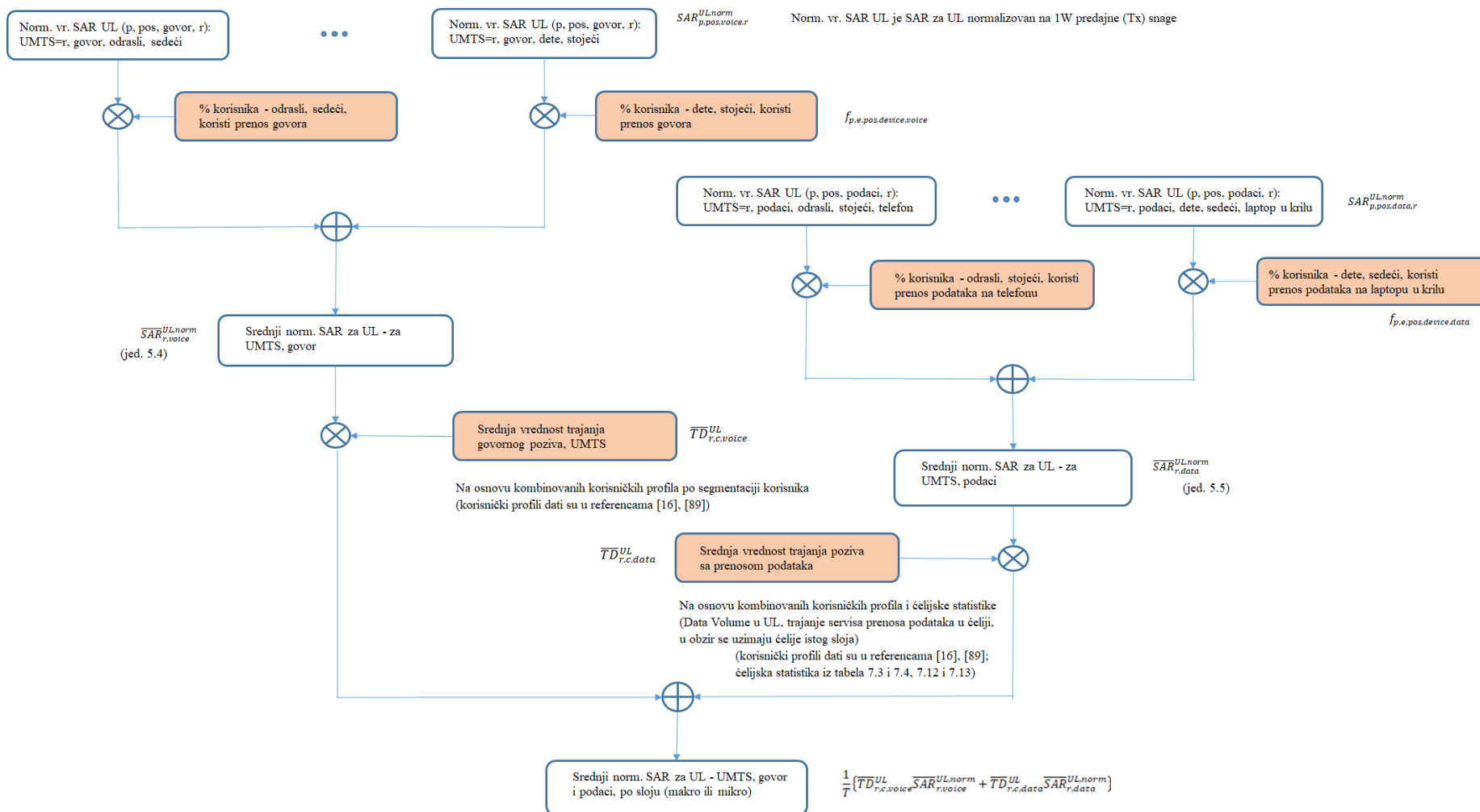


Slika 7.2 Dijagram kalkulacije – račun za izloženost u DL

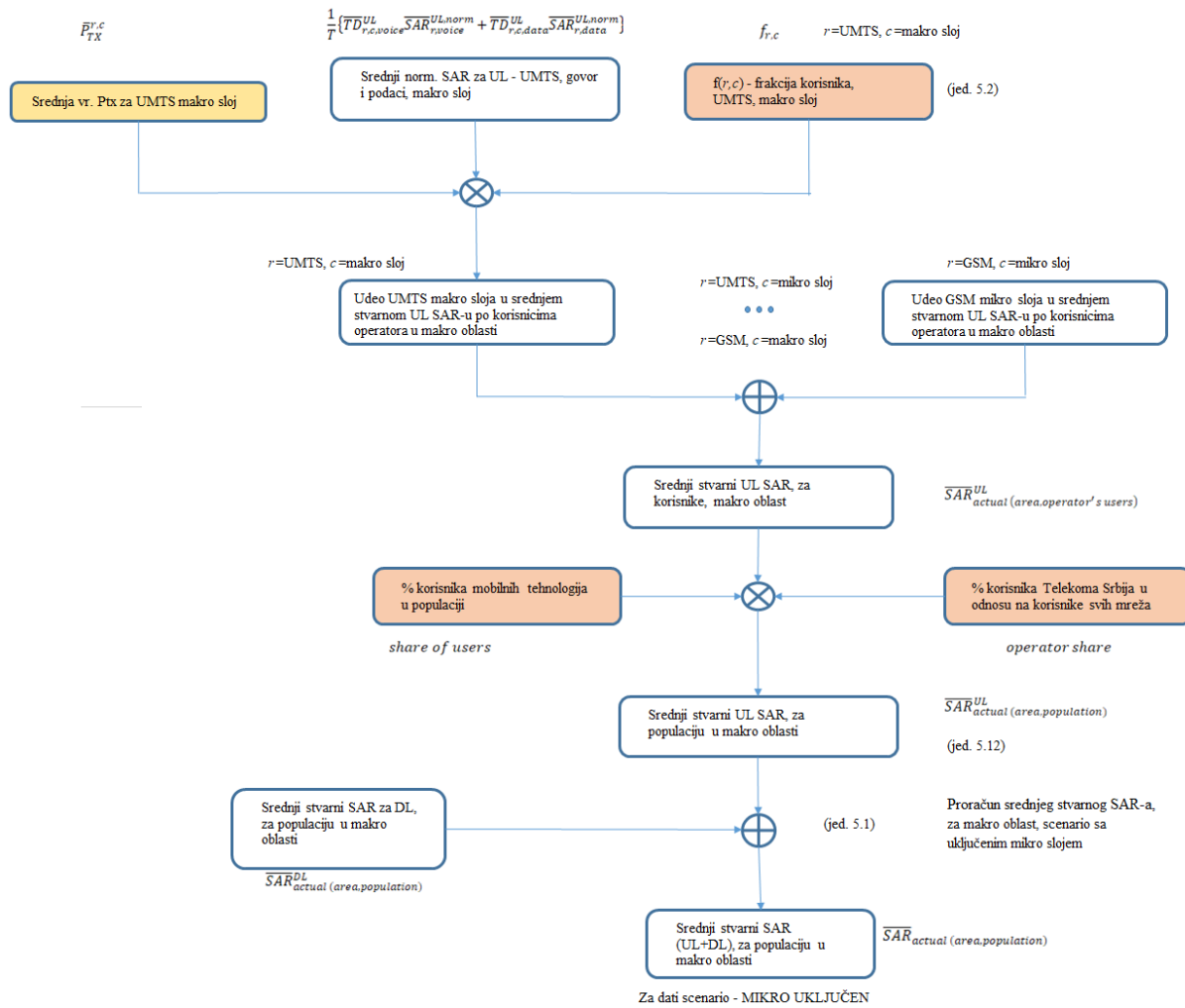
Proračun srednjeg stvarnog SAR-a za UL, za makro oblast, scenario sa uključenim mikro slojem



Slika 7.3 Dijagram kalkulacije – račun za izloženost u UL i ukupnu izloženost (1)



Slika 7.3 Dijagram kalkulacije – račun za izloženost u UL i ukupnu izloženost (2)



Slika 7.3 Dijagram kalkulacije – račun za izloženost u UL i ukupnu izloženost (3)

Srednji stvarni SAR računa se za izloženost koja potiče od mobilne mreže operatora Telekom Srbija u tehnologijama 2G i 3G i od uređaja povezanih sa mrežom, za populaciju u posmatranoj oblasti pokrivanja. Ovo je deo ukupnog stvarnog SAR-a koji sabira doprinose svih mreža i operatora. I za mreže drugih operatora očekivani su slični rezultati, budući da postoje male razlike u ponašanju korisnika, a u pitanju su slične konfiguracije mreže. Kada bi svaki operator pratio srednji stvarni SAR koji generiše njegova mreža i povezani korisnički uređaji, mogao bi i da preduzme korake ka njegovom smanjenju, što bi dovelo do smanjenja ukupne izloženosti (od svih mreža).

7.1.1 Merenja

Mrežni izveštaji po ćeliji za GSM i UMTS su zadati i beleženi kroz različite module platforme za upravljanje mrežom Ericsson Operations Support System, Radio and Core (OSS-RC), verzija 12.3.1. Ćelijska statistika je takođe prikupljena korišćenjem ovog sistema.

Za proračun izloženosti u *downlinku* vršena su merenja na terenu u određenom broju tačaka koje su grupisane po oblastima: mikro oblast (zona pokrivanja mikro sloja, *zone 1*) i makro oblast bez mikro (zona pokrivanja makro sloja, bez mikro oblasti, *zone 2*). Kalibrisani Rohde&Schwarz (R&S) prenosni merni sistem koji se sastoji od analizatora spektra R&S FSH6 (frekvencijski opseg 100kHz-6GHz) i R&S TS-EMF Tri-Axis Probe (frekvencijski opseg 30MHz-3GHz) korišćen je za izvođenje frekvencijski selektivnih merenja na terenu. Ovaj sistem je projektovan za frekvencijski selektivna merenja intenziteta električnog polja u frekvencijskom opsegu od 30 MHz do 3 GHz. Sistem je

kontrolisao softverski modul White Tigress Baby – Measurements, specijalno razvijen za prostorna merenja u Laboratoriji za radio komunikacije Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta u Beogradu. Frekvencijski selektivna merenja intenziteta električnog polja po frekvencijskim opsezima sprovedena su za frekvencijske opsege sistema GSM 900 MHz i UMTS 2100 MHz operatora Telekom Srbija. Sledeći parametri su korišćeni za merenja:

- Centralna frekvencija – 944.3 MHz i širina kanala – 9.6MHz (opseg GSM 900MHz), i
- Centralna frekvencija – 2132.5MHz i širina kanala – 15MHz (opseg UMTS 2100MHz).

Merenja su obavljena sa mernom sondom montiranom na tripod, a osoba koja je radila sa mernom opremom bila je barem 2 m udaljena od sonde.

7.1.2 Kombinovanje podataka za date scenarije

Merenja na obe lokacije uključuju dva sloja mreže: makro i mikro, sa odgovarajućim oblastima pokrivanja. Kao što je prethodno navedeno u poglavlju 5, varijacije srednjeg stvarnog SAR-a, $\overline{SAR}_{actual(are,population)}$, mogu se posmatrati u makro oblasti i u mikro oblasti, odnosno unutar oblasti pokrivanja mikro stanica i unutar oblasti pokrivanja makro ćelija, uključujući i mikro oblast. Stoga se merenja na terenu i merenja sa mreže moraju grupisati u odnosu na ove dve oblasti. Merenja intenziteta električnog polja na terenu grupisana su u dve grupe, po mikro oblasti i po makro oblasti bez mikro, za oba scenarija (uključen i isključen mikro sloj). Takođe, mrežna merenja i ćelijska statistika prikupljaju se po ćelijama, tako da odgovaraju ovim oblastima (zone pokrivanja ćelija), a grupisani su i po tehnologiji i sloju, tako da srednje vrednosti predstavljaju prosek za određenu tehnologiju i sloj.

U slučaju kada su mikro stanice uključene, rezultati se kombinuju na način opisan u poglavlju 5. Međutim, kada su mikro stanice isključene, da bi se dobila izloženost u mikro oblasti potrebne su određene aproksimacije, kao što je naznačeno u diskusiji u poglavlju 5.

Kada je mikro sloj isključen, svi korisnici povezani su sa makro slojem. Bez alata za geolokaciju nemamo informaciju o udelu korisnika unutar mikro sloja, ukupno i po tehnologiji. Budući da su na obe lokacije scenariji izvođeni jedan za drugim, pretpostavljamo da relativni procenti korisnika po tehnologiji i po oblasti slede raspodelu koja je zabeležena za scenario kad je mikro sloj uključen. Ako posmatramo makro oblast, UL komponenta $\overline{SAR}_{actual(are,population)}$ računa se uobičajeno. Za DL komponentu kombinuju se srednje vrednosti odbiraka snage snimljenih u mikro oblasti i u makro oblasti bez mikro korišćenjem procenata korisnika u mikro oblasti i makro oblasti bez mikro u scenariju Mikro uključene. Ako posmatramo mikro oblast, za proračun UL komponente potrebna je pretpostavka u vezi sa srednjom predajnom snagom. Pretpostavljamo da je UL komponenta po tehnologiji jednaka proseku za makro oblast, što implicira isti obrazac korišćenja po tehnologiji i po radio uslovima. Alati sa geolokacijom koji uparuju poziciju i radio uslove po korisniku dali bi značajne podatke za ovaj proračun. UL komponente za GSM i UMTS kombinuju se korišćenjem relativnih procenata korisnika po tehnologiji za scenario Mikro uključene. Za DL kalkulaciju, odbirci snage snimljeni u mikro oblasti uzimaju se u obzir za proračun srednje gustine snage incidentnog talasa. Procenti čovek-vreme za raspodelu telesnih stavova u mikro zoni uzimaju se kao za kalkulaciju kad je mikro sloj uključen, budući da se testiranje vršilo sat za satom, pa je pretpostavljeno da populacija u mikro oblasti nije promenila ponašanje za ovo vreme.

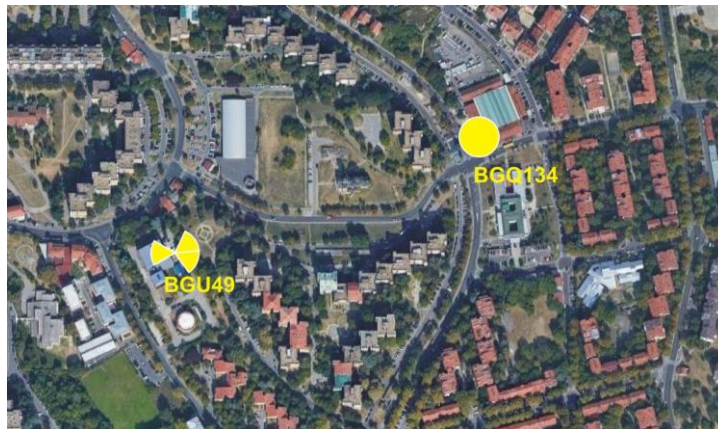
7.2 Lokacija Mirijevo, testni slučaj sa malim ćelijama instaliranim na otvorenom (pijaca Mirijevo)

U ovom scenariju porede se dve topologije 2G i 3G i prikazuje promena izloženosti sa uvođenjem sloja sa mikro baznim stanicama na otvorenom, u urbanom kraju Beograda [103]. Očekivano je smanjenje izloženosti stanovništva usled poboljšanja prijemnog signala, s tim da

konkretne vrednosti zavise od tehnologije, od topologije mreže i područja, kao i namene područja. Posmatra se promena izloženosti u makro oblasti, u širem području koje pokrivaju ćelije makro sloja, i u mikro oblasti, zoni unutar šireg područja koju pokriva mikro sloj.

7.2.1 Testno okruženje

Scenariji za evaluaciju varijacije izloženosti sa promenom topologije u operativnoj mreži obuhvatili su uključnje mikro ćelija u GSM tehnologiji u opsegu 900 MHz i UMTS tehnologiji u opsegu 2100 MHz u urbanom okruženju u Beogradu, na otvorenom, u okviru pokrivanja makro ćelija. Cilj ovog testnog slučaja bio je da se pokaže kako se menja izloženost sa uvođenjem mikro sloja, kao i da se demonstrira proračun izloženosti novom metodom, korišćenjem merenja i podataka koji su izvučeni iz mreže. Okruženje je prikazano na slici 7.4. LTE tehnologija nije bila uvedena u ovoj zoni u vreme merenja.



Slika 7.1 Okruženje od interesa, Beograd, pijaca Mirijevo

Mikro sloj se sastojao od jedne GSM ćelije i jedne UMTS ćelije, čije su bazne stanice kolocirane na lokaciji označenoj sa BGG134. Pokrivajući makro sloj sastojao se po dva sektora po kolociranim makro baznim stanicama u GSM i UMTS tehnologiji, na lokaciji označenoj sa BGU49. Svojstva primopredajnika data su tabeli 7.1. Pokrivanje je provereno izvođenjem merenja sa *drive-test* alatom u području i poređenjem sa predikcijom koju daje alat za radio planiranje. Usled gustine baznih stanica, moglo se smatrati da su granice pokrivanja GSM i UMTS makro ćelija slične i da predstavljaju područje od interesa.

.Tabela 7.1 Karakteristike makro sloja i mikro sloja

Tip lokacije	Tehnologija i frekvencijski opseg	UMTS nosioci/GSM primopredajnici (TRX)	Predajna snaga
Makro lokacija BGU49	GSM 900 MHz	4	42dBm po TRX
	UMTS 2100 MHz	3	43dBm po nosiocu
Mikro lokacija BGG134	GSM 900 MHz	2	37dBm po TRX
	UMTS 2100 MHz	2	34dBm po nosiocu

7.2.2 Testiranje

Izloženost je proračunata i poređena za dva scenarija: sa uključenim i sa isključenim mikro slojem. Merenja su izvedena u dva uzastopna sata, 10h-12h pre podne, po sat vremena, tokom perioda

visokog opterećenja mreže tokom dana, a prema posmatranju ćelijske statistike u dužem periodu. U satima visokog opterećenja očekuje se viša ukupna izloženost nego u ostatku dana. Međutim, stvarno opterećenje pojedine ćelije zavisi od njene zone pokrivanja, na primer da li je u pitanju rezidencijalna ili poslovna zona, da li ljudi samo prolaze kroz zonu ili borave u njoj tokom perioda posmatranja.

Zona pokrivanja mikro baznih stanica smatra se „mikro oblašću“ i izgledala je kao ostrvo unutar „makro oblasti“, koju opslužuju makro bazne stanice. Za svaki scenario, izloženost je procenjena i u makro oblasti i u mikro oblasti. Proračunata je za dnevne sate i predstavljala je doprinos Telekoma Srbija, kao jednog od tri mobilna operatora u području, ukupnoj izloženosti populacije u dnevnim satima. Očekivalo se da dodavanje mikro sloja smanji izloženost populacije u mikro zoni, gde bi odgovarajuće smanjenje zavisilo od tehnologije, topologije mreže i karakteristika područja, kao i od raspodele korisnika.

Da bi se odredila prostorna raspodela intenziteta električnog polja, merenja intenziteta električnog polja sprovedena su u određenom broju mernih tačaka približno uniformno raspoređenih na otvorenom, po zonama pokrivanja mikro i makro ćelija. Prikupljana su merenja sa mreže opisana u poglavlju 5.2, odbirci predajne i primljene snage u ćelijama od interesa, kao i ćelijska statistika za sate testiranja.

Frakcije korisnika ($f_{r,c}$) po tehnologijama (r) i tipovima ćelija (c) dobijene su iz signalizacionih poruka Location Update [105], kao srednja vrednost za posmatrani period. Ove poruke ka mreži šalje korisnički uređaj, sadrže informaciju o korišćenoj ćeliji, a njihova učestalost zavisi od mrežnih podešavanja. Frakcije korisnika po ćelijama menjaju se u vremenu sa promenljivim radio uslovima i opterećenjem mreže, kao i sa kretanjem korisnika. Ovde smo pretpostavili da je metoda koju koristimo dovoljno precizna za srednju vrednost u posmatranom periodu.

7.2.3 Rezultati

Frakcije korisnika po tehnologiji i sloju date su u tabeli 7.2.

Tabela 7.2 Frakcije korisnika po tehnologiji i sloju, izračunate na osnovu signalizacionih poruka

Tehnologija (r) i tip ćelije (c)	Procenti korisnika ($f_{r,c}$)
GSM makro ćelija	45,59%
GSM mikro ćelija	1,52%
UMTS makro ćelija	52,03%
UMTS mikro ćelija	0,86%

Ostali podaci prikupljeni tokom sati testiranja za proračun izloženosti prikazani su u tabeli 7.3 za scenario sa uključenim mikro slojem i u tabeli 7.4 za scenario sa isključenim mikro slojem.

Tabela 7.3: Ulazni podaci za scenario Mikro sloj uključen

Scenario MIKRO UKLJUČEN								
Izvor	Podatak	UMTS makro sloj			UMTS mikro sloj			Za proračun parametra
Zadati mrežni izveštaj	Srednja vrednost odbiraka UE Tx power [dBm]		-7,19			-23,68		$\bar{P}_{TX}^{r,c}$
Zadati mrežni izveštaj	Procenti odbiraka UE Rx power po radio uslovima [%]	Dobri	Srednji	Loši	Dobri	Srednji	Loši	\overline{DF}
		38,73%	39,40%	21,87%	64,19%	31,98%	3,83%	
Ćelijska statistika	Sr. vr. korišćenja govornog servisa u vremenu (na 1h), svi korisnici [Erl]		33,22			1,99		$\overline{DF}, TD_{p,e,pos}^{DL}/T$
Ćelijska statistika	Sr. vr. korišćenja prenosa podataka u UL za 1h, svi korisnici [Erl]		38,13			1,48		$\overline{DF}, \overline{TD}_{r,c,data}^{UL}$
Ćelijska statistika	Sr. vr. korišćenja prenosa podataka (UL i DL) za 1h, svi korisnici [Erl]		148			6,02		$TD_{p,e,pos}^{DL}/T$
Ćelijska statistika	Sr. vr. količine prenetih podataka u UL za 1h, svi korisnici [kbits]		3.412.947,00			101.895,00		$\overline{TD}_{r,c,data}^{UL}$
Merenja na terenu sa laboratorijskom opremom	Snimljen srednji intenzitet električnog polja [V/m]*		0,152			0,202		\bar{S}_{RXinc}^r
Izvor	Podatak	GSM makro sloj			GSM mikro sloj			Za proračun parametra
Zadati mrežni izveštaj	Sr.vr. UE Tx power za govorni servis [dBm]		29,79			22,28		$\bar{P}_{TX}^{r,c}$
Zadati mrežni izveštaj	Procenti odbiraka UE Rx power po radio uslovima [%]	Dobri	Srednji	Loši	Dobri	Srednji	Loši	\overline{DF}
		15,30%	59,05%	25,65%	35,50%	58,93%	5,57%	
Merenja na terenu sa laboratorijskom opremom	Snimljen srednji intenzitet električnog polja [V/m]*		0,103			0,121		\bar{S}_{RXinc}^r

* Vrednost data za makro sloj odnosi se na makro zonu bez mikro zone, dok se vrednost data za mikro sloj odnosi na mikro zonu.

Tabela 7.4 Ulazni podaci za scenario Mikro sloj isključen

Scenario MIKRO ISKLJUČEN					
Izvor	Podatak	UMTS makro sloj			Za proračun parametra
Zadati mrežni izveštaj	Srednja vrednost odbiraka UE Tx power [dBm]	-6,2			$\bar{P}_{TX}^{r,c}$
Zadati mrežni izveštaj	Procenti odbiraka UE Rx power po radio uslovima [%]	Dobri	Srednji	Loši	\overline{DF}
		36,76%	43,15%	20,09%	
Ćelijska statistika	Sr. vr. korišćenja govornog servisa za 1h, svi korisnici [Erl]	36,52			$\overline{DF}, TD_{p,e,pos}^{DL}/T$
Ćelijska statistika	Sr. vr. korišćenja prenosa podataka u UL za 1h, svi korisnici [Erl]	41,96			$\overline{DF}, \overline{TD}_{r,c,data}^{UL}$
Ćelijska statistika	Sr. vr. korišćenja prenosa podataka (UL i DL) za 1h, svi korisnici [Erl]	159			$TD_{p,e,pos}^{DL}/T$
Ćelijska statistika	Sr. vr. količine prenetih podataka u UL za 1h, svi korisnici [kbits]	3.452.109,00			$\overline{TD}_{r,c,data}^{UL}$
Merenja na terenu sa laboratorijskom opremom	Snimljen srednji intenzitet električnog polja u makro zoni bez mikro zone [V/m]	0,152			\bar{S}_{RXinc}^r
Merenja na terenu sa laboratorijskom opremom	Snimljen srednji intenzitet električnog polja u mikro zoni [V/m]	0,199			\bar{S}_{RXinc}^r
Izvor	Podatak	GSM makro sloj			Za proračun parametra
Zadati mrežni izveštaj	Sr. vr. odbiraka UE Tx power za govorni servis [dBm]	29,76			$\bar{P}_{TX}^{r,c}$
Zadati mrežni izveštaj	Procenti odbiraka UE Rx power po radio uslovima [%]	Dobri	Srednji	Loši	\overline{DF}
		14,88%	61,31%	23,81%	
Merenja na terenu sa laboratorijskom opremom	Snimljen srednji intenzitet električnog polja u makro zoni bez mikro zone [V/m]	0,103			\bar{S}_{RXinc}^r
Merenja na terenu sa laboratorijskom opremom	Snimljen srednji intenzitet električnog polja u mikro zoni [V/m]	0,107			\bar{S}_{RXinc}^r

Za proračun izloženosti u DL, procenti čovek-vreme po stavovima tokom korišćenja dobijeni upotrebom matrice segmentacije korisnika i konkretne ćelijske statistike tokom sati testiranja prikazani su u tabeli 7.5, za scenario Mikro isključene, za makro oblast i za mikro oblast.

Tabela 7.5 Procenti čovek-vreme za kombinovanje sa normalizovanim vrednostima SAR-a za proračun izloženosti u downlinku za makro oblast i mikro oblast kad je mikro sloj isključen

Populacija (p)	Okruženje (e)	Stav (pos)	Udeo čovek-vreme u makro oblasti	Udeo čovek-vreme u mikro oblasti
Dete	<i>Indoor</i>	Sedeći-govor-telefon	4,83%	7,21%
Dete	<i>Outdoor</i>	Stojeći-govor-telefon	1,21%	1,80%
Odrasli	<i>Indoor</i>	Sedeći-govor-telefon	27,11%	40,41%
Odrasli	<i>Outdoor</i>	Stojeći-govor-telefon	11,62%	17,32%
Dete	<i>Indoor</i>	Sedeći-podaci-telefon	5,86%	3,53%
Dete	<i>Outdoor</i>	Stojeći-podaci-telefon	1,49%	0,90%
Dete	<i>Indoor</i>	Sedeći-podaci-laptop-krilo	0,01%	0,01%
Dete	<i>Indoor</i>	Sedeći-podaci-laptop-sto	0,10%	0,06%
Odrasli	<i>Indoor</i>	Sedeći-podaci-telefon	32,76%	19,73%
Odrasli	<i>Outdoor</i>	Stojeći-podaci-telefon	14,33%	8,63%
Odrasli	<i>Indoor</i>	Sedeći-podaci-laptop-krilo	0,21%	0,12%
Odrasli	<i>Indoor</i>	Sedeći-podaci-laptop-sto	0,48%	0,29%

Tabela 7.6 prikazuje srednje normalizovane vrednosti SAR-a za celo telo za *downlink*, za makro oblast i za mikro oblast, za GSM i UMTS, u dva razmatrana scenarija. Ove vrednosti dobijaju se kombinovanjem prethodnih procenata čovek-vreme po stavovima i odgovarajućih normalizovanih vrednosti SAR-a za *downlink* po stavovima dobijenih simulacijama.

Tabela 7.6 Srednje normalizovane vrednosti SAR-a za proračun izloženosti u downlinku, po tehnologiji i po oblasti

Srednji normalizovani DL SAR [(W/kg)/(W/m ²)]			
Scenario	Oblast	GSM900	UMTS2100
MIKRO UKLJUČEN	Makro oblast	0,005570377	0,004792494
	Mikro oblast	0,005678153	0,004784687
MIKRO ISKLJUČEN	Makro oblast	0,005562891	0,004793037
	Mikro oblast	0,005678153	0,004784687

Proračunate vrednosti srednjeg stvarnog SAR-a za makro zonu i za mikro zonu, za dva scenarija, prikazani su u tabeli 7.7 [103].

Tabela 7.7 Vrednosti \overline{SAR}_{actual}

Razmatrana oblast	\overline{SAR}_{actual} [W/kg] po scenariju		$\Delta\overline{SAR}_{actual}$ kad je mikro uključen
	Mikro UKLJUČEN	Mikro ISKLJUČEN	
Makro oblast	1,38E-05	1,42E-05	-2,22%
Mikro oblast	2,97E-06	1,93E-05	-84,60%

Ukupni rezultati prikazuju poboljšanje izloženosti stanovništva sa uvođenjem mikro sloja i u makro zoni i u mikro zoni. Ukupno poboljšanje \overline{SAR}_{actual} bilo je preko 84% u mikro zoni i više od 2% u makro zoni. Malo smanjenje izloženosti u makro zoni bilo je očekivano usled malog udela korisnika u mikro zoni (tabela 7.2). Veliko smanjenje u mikro zoni dešava se iz razloga što je ovaj mali udeo korisnika u mikro zoni imao nižu srednju predajnu snagu nego što bi korisnici imali da mikro bazna stanica nije uključena. Iako je dodavanje novog sloja povećalo srednji intenzitet polja u mikro zoni, smanjenje predajne snage korisničkih uređaja je u smislu ukupne izloženosti višestruko kompenzovalo ovo povećanje.

U poređenju sa graničnom vrednošću SAR-a za celo telo od 0,08 W/kg za date frekvencijske opsege, prema preporukama [51] i nacionalnim propisima [47], vidimo da je i najviša agregirana vrednost iz tabele 7.7 nekoliko redova veličine niža od granične.

Dublji uvid dobija se posmatranjem komponenata \overline{SAR}_{actual} po tehnologiji i komponentama za *uplink/downlink*, po mikro oblasti i po makro oblasti. Tabela 7.8 prikazuje procentualne udele ovih komponenata izloženosti u ukupnom \overline{SAR}_{actual} (u mikro i u makro oblasti), dok tabela 7.9 prikazuje apsolutne vrednosti sa procentom rasta po komponenti.

Tabela 7.8 Udele u ukupnom \overline{SAR}_{actual} po tehnologiji i po *uplinku/downlinku*

Razmatrana oblast	Tehnologija	\overline{SAR}_{actual} , udele po tehnologiji i UL/DL		
		UL/DL	Mikro UKLJUČEN	Mikro ISKLJUČEN
Makro oblast	UMTS	UL	0,10%	0,14%
		DL	1,00%	0,98%
	GSM	UL	98,36%	98,37%
		DL	0,53%	0,51%
Mikro oblast	UMTS	UL	0,01%	0,07%
		DL	8,11%	1,21%
	GSM	UL	88,42%	98,30%
		DL	3,45%	0,42%

Najpre, GSM UL generisao je najveći deo \overline{SAR}_{actual} . Ovo je i bilo očekivano uzimajući u obzir inherentne karakteristike tehnologije, a takođe i usled činjenice da je veliki udeo korisnika u oblasti zapravo bio povezan sa GSM mrežom, slično kao u [112], budući da su mnogi od njih bili korisnici

samo govornog servisa, koji koriste telefon koji ima samo GSM mogućnosti ili koriste korisničku opciju „samo GSM“ na uređaju. Najveće poboljšanje sa uvođenjem mikro sloja uočeno je u mikro oblasti za GSM tehnologiju.

Takođe je jasno da je DL deo \overline{SAR}_{actual} koji predstavlja doprinos UMTS tehnologije bio veći od UL dela. UMTS je sistem ograničen interferencijom i njegova efikasna kontrola snage predstavlja jednu od najvažnijih funkcionalnosti, koja obezbeđuje niske nivoe snage UE Tx power. Usled prisustva okolnih baznih stanica i sektora sa do tri nosioca, UMTS DL komponenta bila je veoma jaka, u oba scenarija. U makro oblasti bila je nekoliko puta veća od UL komponente. U mikro oblasti, sa uključenim mikro slojem, razlika između DL i UL komponenta bila je još izraženija zbog smanjenja UL komponente (poboljšana kvaliteta kanala doveo je do nižih nivoa snage UE Tx power) i povećanja DL komponente zbog dodavanja novog sloja.

Tabela 7.9 Komponente \overline{SAR}_{actual} po tehnologiji i po uplinku/downlinku

\overline{SAR}_{actual} , komponente po tehnologiji i UL/DL								
Oblast	RAT	Mikro uključen [W/kg]	Mikro isključen [W/kg]	$\Delta\overline{SAR}_{actual}$ (uključen mikro sloj)	UL/DL	Mikro uključen [W/kg]	Mikro isključen [W/kg]	$\Delta\overline{SAR}_{actual}$ (uključen mikro sloj)
Makro oblast	UMTS	1,53E-07	1,58E-07	-3,04%	UL	1,44E-08	1,93E-08	-25,68%
					DL	1,39E-07	1,39E-07	0,11%
	GSM	1,37E-05	1,40E-05	-2,21%	UL	1,36E-05	1,39E-05	-2,22%
					DL	7,35E-08	7,29E-08	0,85%
Mikro oblast	UMTS	2,41E-07	2,47E-07	-2,33%	UL	2,89E-10	1,31E-08	-97,80%
					DL	2,41E-07	2,34E-07	3,04%
	GSM	2,73E-06	1,90E-05	-85,66%	UL	2,62E-06	1,89E-05	-86,14%
					DL	1,03E-07	8,02E-08	27,88%

Gledajući apsolutne vrednosti i procenata rasta u tabeli 7.9, jasno je da je uvođenje mikro sloja donelo veliko smanjenje UL komponenta izloženosti. UMTS UL komponenta u makro oblasti bila je smanjena za 25,68%, a u mikro oblasti za 97,80%, usled poboljšanja kvaliteta kanala. UMTS DL komponenta u mikro zoni povećala se nekoliko procenata sa uključenjem mikro sloja, zbog dodavanja još jednog izvora zračenja. U makro zoni, UMTS DL komponenta bila je tek malo veća sa dodavanjem novog sloja.

GSM UL komponenta u mikro zoni bila je smanjena za 86,14% usled poboljšanja prijemnog signala, što je rezultiralo smanjenjem od više od 2% u makro oblasti. GSM DL komponenta u mikro oblasti povećala se za 27,88%, što se odrazilo na makro oblasti kao povećanje od manje od 1%.

Gledajući po tehnologijama, ukupnu izloženost kao zbir UL i DL komponenta, \overline{SAR}_{actual} u mikro oblasti smanjio se za obe tehnologije. Iako se UMTS UL komponenta dosta smanjila sa uključenjem mikro sloja, DL komponenta je bila dominantna tako da procentualni dobitak u ukupnoj izloženosti nije bio visok (2,33% smanjenja u mikro oblasti). Za GSM, UL komponenta bila je dominantna tako da se njeno značajno smanjenje snažno odrazilo na ukupnu izloženost (85,66% smanjenja u mikro oblasti). U ovom slučaju je mikro zona specifična, jer se veća prisutnost ljudi očekuje nakon radnih sati i tokom vikenda. Da smo posmatrali izloženost tokom tih perioda, sa mnogo više ljudi u mikro oblasti, dobitak u \overline{SAR}_{actual} sa uvođenjem mikro sloja bio bi i veći.

7.2.4 Zaključak

Izložena analiza pokazuje da je uvođenje mikro ćelija u obe tehnologije, GSM i UMTS, dovelo do smanjenja srednje izloženosti populacije u oblasti pokrivanja, usled smanjenja izloženosti koja potiče od korisničkih uređaja. Ovo smanjenje je značajno u slučaju GSM tehnologije, više od 85%, dok je za UMTS bilo nešto preko 2%, sa razultujućim ukupnim smanjenjem izloženosti od preko 84,6% [103]. Ukupna izloženost od baznih stanica (pristupnih tačaka) i od korisničkih uređaja je evaluirana i uvid u veličine ove dve komponente dao je stvarnu sliku doprinosa korisničkih uređaja ukupnoj izloženosti. Njihov nezanimljiv i u nekim slučajevima dominantan doprinos posledica je rastuće upotrebe mobilnih tehnologija, a u opštem slučaju ovaj zaključak nije intuitivan za širu javnost niti je očigledan u pogledu procedura za proveru usklađenosti sa regulativom koje zasebno tretiraju izloženost od baznih stanica i od korisničkih uređaja. Tačno smanjenje izloženosti sa uvođenjem manjih ćelija zavisi najviše od dominantne tehnologije koja se koristi, rasporeda korisnika u posmatranoj oblasti i od opterećenja mreže, od navika korisnika, uređaja, tipa područja i topologije mreže. Korišćenje manjih ćelija je takođe u skladu sa zahtevima za većim pokrivanjem i većim kapacitetom.

Analiza je prikazala primenu nove metode za ocenu izloženosti EM polju koje potiče od bežičnih komunikacionih sistema, razvijene u ovoj disertaciji. Pokazala je kako se podaci iz operativne mreže, iz više mrežnih izvora, od zadatih izveštaja sa merenjima snage do ćelijske statistike, podataka o korišćenju, signalizacionih poruka i inspekcije saobraćaja, mogu koristiti za evaluaciju srednje stvarne izloženosti populacije u nekom području. Prikazana metoda može se koristiti za procenu izloženosti koja potiče od bilo koje bežične mreže u kojoj se mogu prikupiti potrebni podaci. Metoda otkriva potencijal mreže za buduću svesnost u pogledu EM zračenja, odnosno za samo-ocenjivanje u gotovo realnom vremenu i za kontrolu izloženosti EM polju. Rezultati istraživanja u ovom testnom slučaju objavljeni su u članku „Comparison of Average Total EMF Exposure for Microcell/Macrocell Topologies Using Novel Methodology Based on Operational Network Measurements“ u časopisu IEEE Access [103].

7.3 Lokacija Lola, testni slučaj sa malim ćelijama instaliranim unutar objekta

U ovom scenariju pored se dve topologije 2G i 3G i prikazuje se promena izloženosti sa uvođenjem sloja sa mikro baznim stanicama u zatvorenom, u poslovnoj zgradi u visoko urbanom delu Beograda. Lokaciju poslovne zgrade Lola pokriva makro bazna stanica instalirana na krovu susedne zgrade, kao i okolne bazne stanice, i dodatno je unutar zgrade instalirana mikro bazna stanica sa distribuiranim antenskim sistemom (DAS), da bi se obezbedilo pokrivanje unutar objekta i potreban kapacitet.

Ovde treba naglasiti razliku između jedne antene (koja se nalazi blizu mikro bazne stanice) i distribuiranog antenskog sistema. Bazna stanica sa DAS-om instalirana u zgradi Lola ima više prostorno distribuiranih antena koje su povezane sa zajedničkom baznom stanicom korišćenjem RF antenskih kablova. Na ovaj način se može obezbediti uniformnije bežično servisno pokrivanje unutar zatvorenog prostora. Po pitanju *downlinka*, DAS obično ima slične karakteristike sa mikro baznom stanicom sa rešenjem sa jednom antenom. Sa druge strane, povezivanje udaljenih antena RF kablovima može uvesti dodatno slabljenje u *uplinku* (u zavisnosti od dužine kablova). Ovo može uzrokovati da UE emituju većim predajnim snagama u poređenju sa slučajem jedne antene blizu mikro bazne stanice.

Očekivano je da dodatak mikro sloja smanji izloženost populacije unutar zgrade, pri čemu bi odgovarajuće smanjenje zavisilo od tehnologije, topologije mreže i karakteristika područja. Ovde se razmatra izloženost unutar zgrade, odnosno u mikro oblasti.

7.3.1 Testno okruženje

U ovom slučaju je područje od interesa bila poslovna zgrada Lola pokrivena sa 2G (GSM u opsegu 900 MHz) i 3G (UMTS u opsegu 2100 MHz) signalom sa makro lokacije na krovu susedne zgrade. Da bi se poboljšali pokrivanje i kapacitet unutar objekta, instalirana je unutrašnja mikro bazna stanica sa distribuiranim antenskim sistemom. Antene su postavljene na različite spratove zgrade. Razmatrana je srednja stvarna izloženost populacije u zgradi (mikro oblast, zatvoren prostor) za dva scenarija: sa uključenim i sa isključenim mikro baznim stanicama. Cilj je bio evaluirati eventualno smanjenje ukupne izloženosti populacije sa uvođenjem mikro sloja, kao i proceniti udele izloženosti u *uplinku* i izloženosti u *downlinku*, kao i udele izloženosti po tehnologijama.

Okruženje od interesa prikazano je na slici 7.5. LTE bazne stanice nisu bile instalirane u području tokom kampanje merenja.



Slika 7.5 Okruženje od interesa, Beograd, zgrada Lola (BGQ27)

Mikro sloj se sastojao od jedne GSM ćelije i jedne UMTS ćelije, kolociranih na lokaciji označenoj kao BGQ27. Makro sloj čije pokrivanje „prekriva“ zgradu sa mikro slojem sastojao se od dva sektora/ćelije po kolociranim GSM i UMTS makro baznim stanicama koje su se nalazile na lokaciji označenoj kao BQU44. Svojstva primopredajnika data su u tabeli 7.10. Usled gustine baznih stanica možemo smatrati da su granice pokrivanja GSM i UMTS ćelija slične i da predstavljaju područje od interesa.

Tabela 7.10 Karakteristike makro i mikro sloja

Tip lokacije	Tehnologije	UMTS nosioci / GSM primopredajnici	Predajna snaga
Makro lokacija	GSM	4	42 dBm po TRX
	UMTS	2	43 dBm po nosiocu
Mikro lokacija	GSM	2	32 dBm po TRX
	UMTS	2	30 dBm po nosiocu

Srednja izloženost stanovništva u zgradi izračunata je za dnevno vreme i predstavlja udeo mreže Telekoma Srbija, kao jednog od tri mobilna operatora u području, u ukupnoj izloženosti populacije u toku dana.

7.3.2 Testiranje

U ovom testnom slučaju analizirana je samo mikro oblast – zgrada Lola, zatvoren prostor. U pitanju je poslovna zgrada, tako da se može računati da se u mikro oblasti nalaze samo odrasli. Takođe, u konkretnom slučaju, budući da je u pitanju zgrada koju je koristio Telekom Srbija, može se smatrati da su populaciju u zgradi uglavnom činili korisnici mreže Telekoma Srbija.

Podaci su takođe prikupljeni u toku dva sata, 10h-12h pre podne. Dva scenarija, sa uključenim i sa isključenim mikro slojem, testirani su jedan za drugim, svaki po sat vremena. Ovo su inače sati visokog opterećenja i u mreži i na konkretnoj lokaciji poslovne zgrade, gde se očekuje viša ukupna izloženost.

Da bi se odredila prostorna raspodela intenziteta električnog polja, merenja intenziteta električnog polja sprovedena su na svakom trećem spratu zgrade Lola, odnosno na spratovima na kojima su montirane antene DAS sistema, u određenom broju mernih tačaka približno uniformno raspoređenih na spratu. U zgradi Lola merenja su izvršena u 102 pozicije.

U prethodno analiziranom slučaju, lokacija Mirijevo [103], su merenja intenziteta električnog polja za procenu izloženosti u DL vršena napolju, dok su vrednosti u unutrašnjosti objekata aproksimirane pomoću faktora slabljenja iz literature. Ovde su merenja vršena unutar objekta, ali na spratovima zgrade sa instaliranim antenama, tako da su vrednosti za spratove bez antena takođe dobijene primenom faktora slabljenja iz literature.

Frakcije korisnika ($f_{r,c}$) po tehnologijama (r) i tipovima ćelija (c) dobijene su iz sistema za analitiku korisnika SAS, naknadnom analizom, na osnovu broja korisnika koji su ostvarili aktivan poziv po ćelijama.

7.3.3 Rezultati

Frakcije korisnika po tehnologiji i sloju date su u tabeli 7.11.

Tabela 7.11 Frakcije korisnika po tehnologiji i sloju

Tehnologija (r) i tip ćelije (c)	Procenti korisnika ($f_{r,c}$)
UMTS makro sloj	21,54%
UMTS mikro sloj	6,22%
GSM makro sloj	56,39%
GSM mikro sloj	15,86%

Ostali podaci prikupljeni tokom sati testiranja za proračun izloženosti prikazani su u Tabeli 7.12 za scenario sa uključenim mikro slojem i u Tabeli 7.13 za scenario sa isključenim mikro slojem.

Tabela 7.12 Ulazni podaci za zgradu Lola, za mikro i makro sloj, kad je mikro sloj uključen

Scenario MIKRO UKLJUČEN						
Podatak	UMTS makro sloj			UMTS mikro sloj		
Srednja vrednost UE Tx power [dBm]	-9,4			-19,25		
Procenti odbiraka UE Rx power po radio uslovima [%]	Dobri	Srednji	Loši	Dobri	Srednji	Loši
	42,59%	43,40%	14,01%	78,55%	18,49%	2,96%
Sr. vr. korišćenja govornog servisa za 1h, svi korisnici [Erl]	25,48			0,99		
Sr. vr. korišćenja prenosa podataka u UL za 1h, svi korisnici [Erl]	64,88			1,07		
Sr. vr. korišćenja prenosa podataka (UL i DL) za 1h, svi korisnici [Erl]	172,87			4,26		
Sr. vr. količine prenetih podataka u UL za 1h, svi korisnici [Gbits]	3,19			0,06		
Snimljen srednji intenzitet električnog polja [V/m]* u mikro području	-			0,2882		
Podatak	GSM makro sloj			GSM mikro sloj		
Sr. vr. UE Tx power za govorni servis [dBm]	31,19			19,83		
Procenti odbiraka UE Rx power po radio uslovima [%]	Dobri	Srednji	Loši	Dobri	Srednji	Loši
	24,41%	45,57%	30,02%	69,08%	26,37%	4,55%
Snimljen srednji intenzitet električnog polja [V/m]u mikro oblasti	-			0,8954		

Tabela 7.13 Ulazni podaci za scenario sa isključenim mikro slojem

Scenario MIKRO ISKLJUČEN			
Podatak	UMTS makro sloj		
Srednja vrednost UE Tx power [dBm]		-13,35	
Procenti odbiraka UE Rx power po radio uslovima [%]	Dobri 42,59%	Srednji 43,4%	Loši 14,01%
Sr. vr. korišćenja govornog servisa za 1h, svi korisnici [Erl]		25,48	
Sr. vr. korišćenja prenosa podataka u UL za 1h, svi korisnici [Erl]		64,88	
Sr. vr. korišćenja prenosa podataka (UL i DL) za 1h, svi korisnici [Erl]		172,87	
Sr. vr. količine prenetih podataka u UL za 1h, svi korisnici [Gbits]		3,19	
Snimljen srednji intenzitet električnog polja u mikro području [V/m]		0,0692	
Podatak	GSM makro sloj		
Sr. vr. odbiraka UE Tx power za govorni servis [dBm]		30,07	
Procenti odbiraka UE Rx power po radio uslovima [%]	Dobri 24,41%	Srednji 45,57%	Loši 30,02%
Snimljen srednji intenzitet električnog polja u mikro području [V/m]		0,1341	

Budući da računamo da su u području od interesa, poslovnoj zgradi, samo odrasli, matrica segmentacije izgleda kao u tabeli 7.14. Svi korisnici su u zatvorenom, pri čemu je u stojećem stavu 20% korisnika koji koriste telefon, dok 90% korisnika laptopa isti drži na stolu.

Tabela 7.14 Matrica segmentacije korisnika za zgradu Lola

Korisnik	% korisnika	Uređaj	% uređaja	Okruženje	Stav	% stava	Pozicija laptopa	% pozicije	Udeo
Odrasli	100%	Telefon	98,56%	Indoor	Sedeći	80%			78,56%
	100%				Stojeći	20%		20,00%	
Odrasli	100%	Laptop	1,44%	Indoor	Sedeći	80%	U krilu	10%	0,14%
	100%				Sedeći	80%	Na stolu	90%	1,30%

Matrica korišćenja za kombinovanje sa normalizovanim vrednostima SAR za UL izgleda kao u tabeli 7.15.

Tabela 7.15 Matrica korišćenja za zgradu Lola

Servis	Populacija	Stav	Uređaj	Pozicija laptopa	Udeo UMTS [%]	Udeo GSM [%]
Govor	Dete	Sedeći	Telefon		0	0
	Dete	Stojeći	Telefon		0	0
	Odrasli	Sedeći	Telefon		78,56	80,00
	Odrasli	Stojeći	Telefon		20,00	20,00
Podaci	Dete	Sedeći	Telefon		0	
	Dete	Stojeći	Telefon		0	
	Dete	Sedeći	Laptop	U krilu	0	
	Dete	Sedeći	Laptop	Na stolu	0	
	Odrasli	Sedeći	Telefon		21,76	
	Odrasli	Stojeći	Telefon		5,54	
	Odrasli	Sedeći	Laptop	U krilu	0,14	
	Odrasli	Sedeći	Laptop	Na stolu	1,30	

Za proračun izloženosti u DL, procenti čovek-vreme po stavovima tokom korišćenja dobijeni upotrebom matrice segmentacije korisnika i konkretne ćelijske statistike tokom sati testiranja prikazani su u tabeli 7.16, za scenario Mikro uključene, za mikro oblast. Računa se da su u oblasti samo odrasle osobe.

Tabela 7.16 Procenti čovek-vreme za kombinovanje normalizovanih vrednosti SAR za proračun izloženosti u downlinku za mikro oblast kad je mikro sloj uključen

Populacija (<i>p</i>)	Okruženje (<i>e</i>)	Stav (<i>pos</i>)	Udeo čovek-vreme u mikro oblasti
Dete	<i>Indoor</i>	Sedeći-govor-telefon	
Dete	<i>Outdoor</i>	Stojeći-govor-telefon	
Odrasli	<i>Indoor</i>	Sedeći-govor-telefon	37,13%
Odrasli	<i>Outdoor</i>	Stojeći-govor-telefon	9,28%
Dete	<i>Indoor</i>	Sedeći-podaci-telefon	
Dete	<i>Outdoor</i>	Stojeći-podaci-telefon	
Dete	<i>Indoor</i>	Sedeći-podaci-laptop-krilo	
Dete	<i>Indoor</i>	Sedeći-podaci-laptop-sto	
Odrasli	<i>Indoor</i>	Sedeći-podaci-telefon	42,10%
Odrasli	<i>Outdoor</i>	Stojeći-podaci-telefon	10,72%
Odrasli	<i>Indoor</i>	Sedeći-podaci-laptop-krilo	0,08%
Odrasli	<i>Indoor</i>	Sedeći-podaci-laptop-sto	0,69%

Tabela 7.17 prikazuje srednje normalizovane vrednosti SAR-a za celo telo za *downlink*, za mikro oblast, za GSM i UMTS, u dva razmatrana scenarija. Ove vrednosti dobijaju se kombinovanjem prethodnih procenata čovek-vreme po stavovima i odgovarajućih normalizovanih vrednosti SAR-a za *downlink* po stavovima dobijenih simulacijama.

Tabela 7.17 Srednje normalizovane vrednosti SAR-a za proračun izloženosti u *downlinku*, po tehnologiji i po oblasti

Srednji normalizovani DL SAR [(W/kg)/(W/m ²)]			
Scenario	Oblast	GSM900	UMTS1940
Oba scenarija	Mikro oblast	0,005091321	0,004378419

Proračunate vrednosti srednjeg stvarnog SAR-a za mikro zonu, za dva scenarija, prikazani su u tabeli 7.18.

Tabela 7.18 Vrednosti \overline{SAR}_{actual}

Razmatrana oblast	\overline{SAR}_{actual} [W/kg] po scenariju		$\Delta\overline{SAR}_{actual}$ kad je mikro uključen
	Mikro UKLJUČEN	Mikro ISKLJUČEN	
Mikro oblast	7,89E-06	1,88E-05	-58,10%

Ukupni rezultati prikazuju poboljšanje izloženosti stanovništva sa uvođenjem mikro sloja, u mikro zoni. Ukupno poboljšanje \overline{SAR}_{actual} bilo je preko 58% u mikro zoni. Vidi se da je ovde dobitak manji u odnosu na lokaciju Mirijevo sa mikro stanicama instaliranim na otvorenom (*outdoor*), a uvidom u komponente izloženosti mogu se doneti dalji zaključci.

U poređenju sa graničnom vrednošću SAR-a za celo telo od 0,08 W/kg za date frekvencijske opsege, prema preporukama [51] i nacionalnim propisima [47], vidimo da je i najviša agregirana vrednost iz tabele 7.18 nekoliko redova veličine niža od granične.

Dublji uvid dobija se posmatranjem komponentata \overline{SAR}_{actual} po tehnologiji i po *uplinku/downlinku*. Tabela 7.19 prikazuje procentualne udele ovih komponentata izloženosti u ukupnom \overline{SAR}_{actual} , dok tabela 7.20 prikazuje apsolutne vrednosti sa procentom rasta po komponenti.

Tabela 7.19 Udele u ukupnom \overline{SAR}_{actual} po tehnologiji i po *uplinku/downlinku*

\overline{SAR}_{actual} , udele po tehnologiji i UL/DL				
Razmatrana oblast	Tehnologija	UL/DL	Mikro UKLJUČEN	Mikro ISKLJUČEN
Mikro oblast	UMTS	UL	0,01%	0,01%
		DL	6,72%	0,16%
	GSM	UL	17,81%	99,12%
		DL	75,46%	0,71%

Najpre, GSM UL je generisao naveći deo \overline{SAR}_{actual} u slučaju kada je mikro sloj isključen, budući da je signal makro sloja slabiji unutar objekta i korisnički uređaji povezani preko GSM tehnologije, a njih je najviše, emituju višim snagama (prema analizi u poglavlju 6, već u srednjim radio uslovima emituju najvišom snagom). Međutim, sa uključenjem mikro sloja sa distribuiranim antenskim sistemom, glavni generator izloženosti postaje GSM DL. Antene su u ovom slučaju blizu korisnika i premda emituju manjom snagom generišu znatnu izloženost u DL, pri čemu usled karakteristika tehnologije GSM prednjači nad UMTS-om.

Tabela 7.20 Komponente \overline{SAR}_{actual} po tehnologiji i po uplinku/downlinku

\overline{SAR}_{actual} , komponente po tehnologiji i UL/DL								
Oblast	RAT	Mikro uključen [W/kg]	Mikro isključen [W/kg]	$\Delta\overline{SAR}_{actual}$ (uključen mikro sloj)	UL/DL	Mikro uključen [W/kg]	Mikro isključen [W/kg]	$\Delta\overline{SAR}_{actual}$ (uključen mikro sloj)
Mikro oblast	UMTS	5,31E-07	3,24E-08	1540,11%	UL	5,33E-10	1,79E-09	-70,26%
					DL	5,31E-07	3,06E-08	1634,51%
	GSM	7,36E-06	1,88E-05	-60,85%	UL	1,41E-06	1,87E-05	-92,47%
					DL	5,96E-06	1,34E-07	4358,38%

Gledajući apsolutne vrednosti i procenete rasta u tabeli 7.20, jasno je da je uvođenje mikro sloja donelo veliko poboljšanje UL komponenta izloženosti. UMTS UL komponenta u mikro oblasti smanjila se za 70,26%, usled poboljšanja kvaliteta kanala, a GSM UL komponenta za 92,47%. Međutim, DL komponente kod obe tehnologije povećale su se više puta, za red veličine. Ovo se i moglo očekivati budući da DAS sistem radi sa manjim snagama od makro stanice, ali su nivoi snage i dalje visoki, a antene su postavljene blizu korisnika. Ukupno smanjenje izloženosti potiče od GSM tehnologije budući da je kad je mikro sloj isključen GSM UL komponenta bila apsolutno dominantna, te je njeno značajno smanjenje sa uključenjem mikro sloja kompenzovalo povećanje DL komponenta.

Gledajući po tehnologijama, ukupnu izloženost kao zbir UL i DL komponenta, \overline{SAR}_{actual} u mikro oblasti se za GSM tehnologiju smanjio, dok se za UMTS tehnologiju povećao. Iako se UMTS UL komponenta dosta smanjila sa uključenjem mikro sloja, DL komponenta je bila dominantna tako da je uključivanje mikro sloja doprinelo rastu ukupne izloženosti od UMTS tehnologije. Za UMTS, kao sistem ograničen interferencijom, UL komponenta je veoma niska, u poređenju sa GSM-om, i bilo kakvo povećanje izloženosti u DL je veoma vidljivo usled male vrednosti za UL. Doprinos GSM-a je mnogo veći od doprinosa UMTS-a u oba scenarija, što je očekivano usled karakteristika ovih tehnologija.

7.3.4 Zaključak

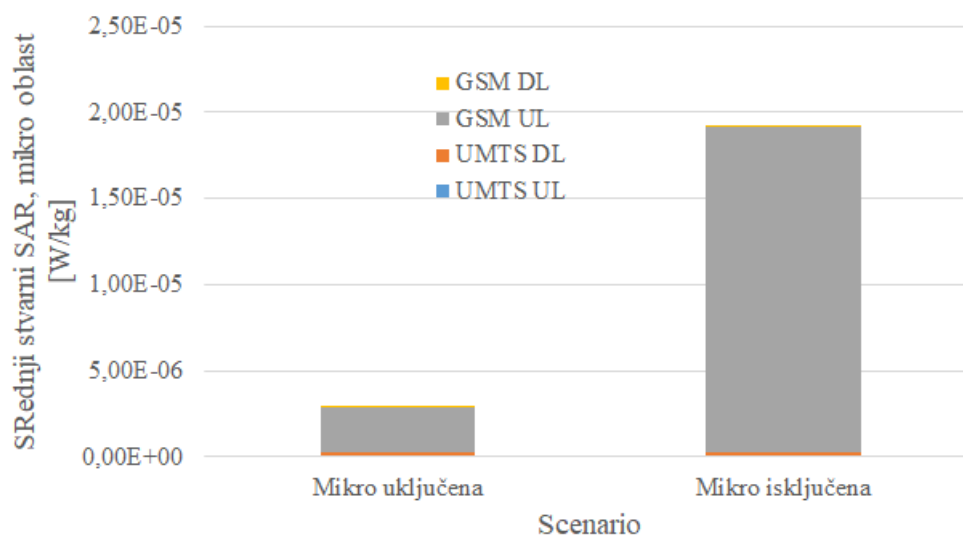
U ovom testnom slučaju je uvođenje mikro ćelija sa distribuiranim antenskim sistemom donelo smanjenje ukupne izloženosti od GSM i UMTS mreže više od 58%, međutim posmatrajući po komponentama, dominantna GSM komponenta se smanjila usled smanjenja GSM UL komponente, preko 92%, dok se UMTS komponenta povećala za red veličine. Distribuirane antene instalirane u zatvorenom prostoru, blizu korisnika, doprinose značajnom povećanju DL komponenta kod obe tehnologije, dok se obe UL komponente smanjuju. Ukupno smanjenje izloženosti dolazi od smanjene snage emitovanja korisničkih uređaja.

Merenja u DL su vršena na spratovima sa antenama, a i kad se uzmu u obzir (uz odgovarajući faktor slabljenja) spratovi bez antena, srednje vrednosti su visoke budući i da makro lokacija nije

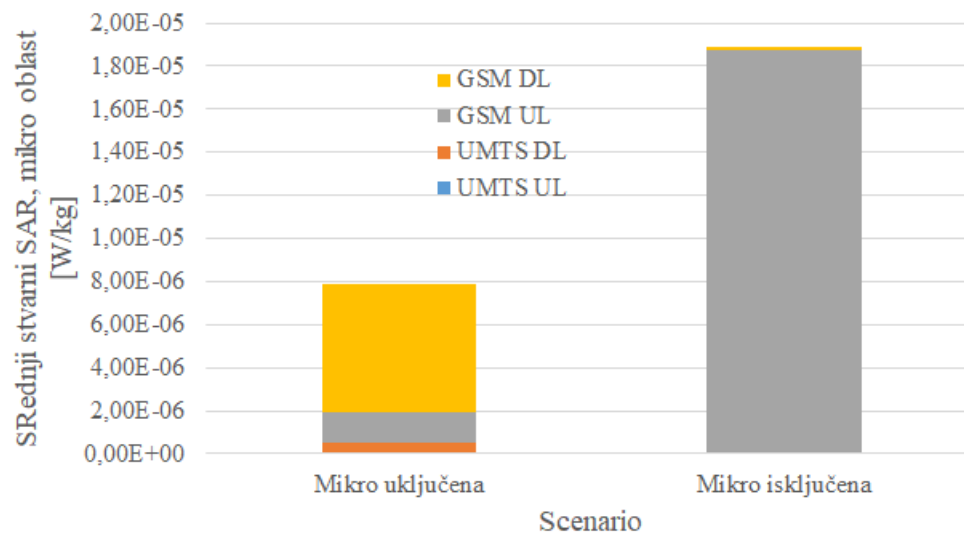
daleko, UMTS sektori koriste dva ili tri nosioca, a viši spratovi pokazuju najveći uticaj DL-a makro ćelija (u poređenju sa nižim spratovima i prizemljem).

7.4 Diskusija

Prethodna analiza dva testna slučaja pokazala je da uvođenje sloja sa malim ćelijama u opštem slučaju smanjuje izloženost, ali i da zaključci u vezi sa uticajem arhitekture mreže na izloženost u pogledu uvođenja malih ćelija nisu uvek pravolinijski. Svako područje ima svoje specifičnosti, a uticaj uvođenja sloja malih ćelija zavisi i od topologije i namene područja i od karakteristika mreže. U jednom testnom slučaju uvođenje sloja malih ćelija na otvorenom doprinelo je znatnom smanjenju izloženosti u *uplinku* u obe tehnologije, uz blagi porast izloženosti u *downlinku* usled dodavanja novog izvora zračenja i uz znatno ukupno smanjenje izloženosti (lokacija Mirijevo, slika 7.6). U drugom slučaju je uvođenje malih ćelija u zatvorenom, sa distribuiranim antenskim sistemom, donelo smanjenje ukupne izloženosti, ali je usled blizine antena izloženost u *downlinku* za obe tehnologije značajno porasla, te je smanjenje GSM UL komponente prevagnulo u korist smanjenja ukupne izloženosti (lokacija Lola, slika 7.7).



Slika 7.6 Komponente SAR_{actual} po tehnologiji i uplinku/downlinku, u mikro oblasti, na testnoj lokaciji Mirijevo



Slika 7.7 Komponente SAR_{actual} po tehnologiji i uplinku/downlinku, u mikro oblasti, na testnoj lokaciji Lola

Zaključci su u skladu sa prethodnim istraživanjima u ovoj oblasti po pitanju malih ćelija [118][17][119] i po pitanju uticaja korišćenja mobilnog telefona na izloženost osobe [120]. Sloj sa malim ćelijama (mikro, piko, femto) dodaje se makro sloju da bi se povećao kapacitet ili poboljšalo pokrivanje u manjim zonama [121]. Novi servisi zahtevaju visoke protoke, malo kašnjenje i visoku dostupnost, što vodi ka upotrebi sve manjih ćelija, a ova arhitekturna promena može takođe doneti nižu izloženost EM polju.

Verifikacija metode sprovedena je poređenjem sa rezultatima istraživanja dostupnim u literaturi. U [118] je prikazano kako korišćenje femto ćelija u zatvorenom prostoru smanjuje snagu korisničkog uređaja sa vrlo blagim povećanjem EM polja ispred jedinice, sa vrednostima koje su ekstremno niske u poređenju sa referentnim graničnim nivoima iz smernica u vezi sa izloženošću. Prijemna i predajna snaga UE merene su za scenarije sa uključenom i isključenom femto ćelijom, a izvođena su frekvencijski selektivna merenja ispred same femto ćelije. Predajna snaga UE smanjena je barem 7 dB u 90% mernih tačaka. U tom radu se ne računa sa stvarnim vrednostima SAR-a, ali ako znamo da je stvarna izloženost proporcionalna nivou snage, možemo zaključiti jesu li rezultati istraživanja u okviru ove disertacije u skladu sa rezultatima prezentovanim u literaturi. U testnim slučajevima prikazanim u ovoj disertaciji, ako za slučajeve sa isključenim mikro stanicama (u tim slučajevima nemamo tačne podatke za mikro oblast) uzmemo da prosek predajne snage korisničkih uređaja u mikro oblasti odgovara onoj za makro oblast, onda se u testnom slučaju na lokaciji Mirijevo srednja predajna snaga u mikro oblasti sa uključenjem mikro stanice smanjila za 17 dB za UMTS i 8,5 dB za GSM, a na lokaciji Lola se smanjila za 5,27 dB za UMTS i 11,23 dB za GSM (tabele 7.3, 7.4, 7.12, 7.13). Kod lokacije Lola vidi se visok procenat odbiraka prijemne snage koji ukazuju na dobar signal, kada se doda mikro ćelija, međutim u tim dobrim radio uslovima korisnici više koriste napredne servise (o čemu je bilo reči u odeljku 4.7), tako da se povećava predajna snaga, a smanjenje srednje predajne snage u odnosu na slučaj kad je mikro sloj isključen nije tako izraženo kao na lokaciji Mirijevo. U [17] je istaknuta prednost korišćenja femto ćelije kada je signal makro bazne stanice loš, kako je opisano u odeljku 4.6.2. Simulacija je rađena za jednu makro ćeliju, odnosno ne uzima u obzir okolne makro ćelije. Za slučaj dobrog signala makro stanice, izloženost koju generiše veza sa njom je nešto manja od izloženosti kada se uključi femto ćelija. Slično kao u slučaju zgrade Lola, kad je signal makro stanice već dobar, dobitak koji se ostvaruje uvođenjem manje ćelije po pitanju predajne snage korisničkih uređaja nije veliki, a povećava se izloženost u DL. U [119] su izloženost u *uplinku* i u *downlinku* takođe kombinovane preko doze izloženosti radi poređenja veze sa makroćelijom i veze sa malom ćelijom u vozu. Received Signal Strength Indicator (RSSI) (indikator primljene snage) i predajna snaga UE mereni su na mobilnom telefonu, a upotrebljen je model da bi se dobila stvarna

primljena snaga. Ovde merenje u DL nije uzelo u obzir druge makro ćelije. Za GSM u opsegu 1800 MHz, utvrđeno je da bi povezivanje sa malom ćelijom u vozu moglo smanjiti izloženost celog tela EM polju mobilnih sistema sa faktorom 11, a izloženost mozga sa faktorom 35. U [120] su korišćena personalna merenja izloženosti uz proračun doze da bi se kvantifikovao doprinos različitih izvora zračenja dnevnoj dozi izloženosti adolescenta. Studija je utvrdila da glavni doprinos izloženosti osobe daju mobilni telefoni (67,2%) i bazne stanice (19,8%). U [27] je utvrđeno da vršnom dozom uvek dominira sopstveni telefon pojedinca i da korisnikovo sopstveno ponašanje po pitanju korišćenja ima najjači uticaj na ličnu vršnu dozu, a da zatim sledi pokrivanje unutar objekata. U toj studiji je zaključeno, za 5G scenarije, da smanjenje veličine ćelije i razdvajanje pokrivanja *indoor* i *outdoor* mogu značajno smanjiti ukupnu dozu, i više od 10 dB. U testnom slučaju na lokaciji Mirijevo je, sabirajući doprinose GSM-a i UMTS-a, stvarni SAR za celo telo usrednjen preko populacije i u vremenu smanjen sa faktorom 6,5, odnosno 8,13 dB, sa smanjenjem veličine ćelije koja opslužuje korisnike, uz uključenu makro ćeliju i bez razdvajanja pokrivanja na pokrivanje van objekata i pokrivanje unutar objekata. Srednja predajna snaga smanjena je 8,5 dB za GSM i 17 dB za UMTS u zoni pokrivanja mikro sloja, kako je prethodno navedeno. Ovi rezultati mogu se smatrati u skladu sa prethodno citiranim [27][118], a posebno su uporedivi sa rezultatima u [119], budući da glavno smanjenje potiče od GSM sistema. Na lokaciji Lola, smanjenje srednjeg SAR-a bilo je sa faktorom 2,38 odnosno 3,77 dB. Gledajući rezultate u vidu gustine snage, u [32], srednje vrednosti snimljene tokom radnih dana (uz 6-minutno usrednjavanje) bile su $300 \mu\text{W}/\text{m}^2$ za opseg GSM DL i $214 \mu\text{W}/\text{m}^2$ za opseg UMTS DL. U istraživanju u okviru ove disertacije, na lokaciji Mirijevo, u satima visokog opterećenja tokom radnih dana, srednja zabeležena gustina snage na otvorenom bila je $108 \mu\text{W}/\text{m}^2$ za opseg UMTS DL i $38,8 \mu\text{W}/\text{m}^2$ za opseg GSM DL, u zoni pokrivanja mikro baznih stanica sa uključenim makro baznim stanicama. Na lokaciji Lola, srednja gustina snage na spratovima sa antenama bila je čak $2127 \mu\text{W}/\text{m}^2$ za GSM DL i $220 \mu\text{W}/\text{m}^2$ za UMTS DL. Rezultati se razlikuju usled različitih karakteristika mreže, topologije područja i glavne namene područja (koja oblikuje i opterećenje mreže). U [122] je istaknuto stalno povećanje izloženosti stanovništva RF EM poljima baznih stanica mobilne telefonije u urbanom okruženju i dat je pregled gustina snage merenih u različitim gradovima i kroz različite godine. Kroz merenja u zoni jedne ulice sa velikim brojem antena instaliranih nisko, blizu glava pešaka, pokazana je veoma nejednaka raspodela polja, uz maksimalno očitavanje od $2648 \text{mW}/\text{m}^2$, odnosno najviši prostorni prosek od $388 \text{mW}/\text{m}^2$, što predstavlja visoke vrednosti u odnosu na one zabeležene u literaturi prethodnih godina i u odnosu na merenja prethodnih godina u istom gradu. Merenja su vršena analizatorom spektra i ličnim ekspozimetrom, a utvrđeno je da izloženosti najviše doprinose sistemi na 2600 MHz i 2100 MHz koje koriste 4G i 3G sistemi mobilne telefonije.

Izložena diskusija kroz verifikaciju rezultata vodi do zaključka da sloj sa malim ćelijama treba pažljivo planirati na osnovu podataka o korišćenju usluga i na osnovu karakteristika područja. Za zatvorene prostore, male ćelije sa nižim snagama bi bile pogodnije (piko, femto), dok se za okruženje na otvorenom mogu koristiti ćelije više snage. Potrebe za kapacitetom, pokrivanjem i smanjenom izloženosti se uglavnom slažu, a arhitektura se može optimizovati koristeći srednji stvarni SAR kao još jedan KPI.

7.5 Uticaj parametara na rezultate metode

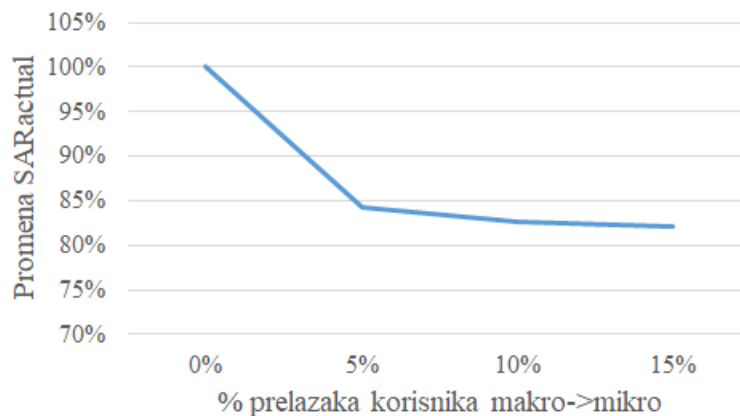
Osnovni parametri formule za izračunavanje srednjeg stvarnog SAR-a su procenti korisnika po slojevima i po tehnologijama, normalizovane vrednosti SAR-a, prosečno vreme korišćenja u odnosu na ukupan posmatrani period i korišćeni servis, ćelijska saobraćajna statistika, srednja predajna snaga korisničkih uređaja, raspodela odbiraka prijemne snage korisničkih uređaja, električno polje u oblasti. Između veličina koje su u vezi sa mrežom postoje snažne međuzavisnosti, tako da promena jednog parametra izaziva promene više drugih parametara. Ako se poveća broj korisnika u nekoj oblasti,

raste i saobraćaj koji se ostvaruje preko date ćelije, raste opterećenje mreže, raste i snaga koju bazna stanica mora da da.

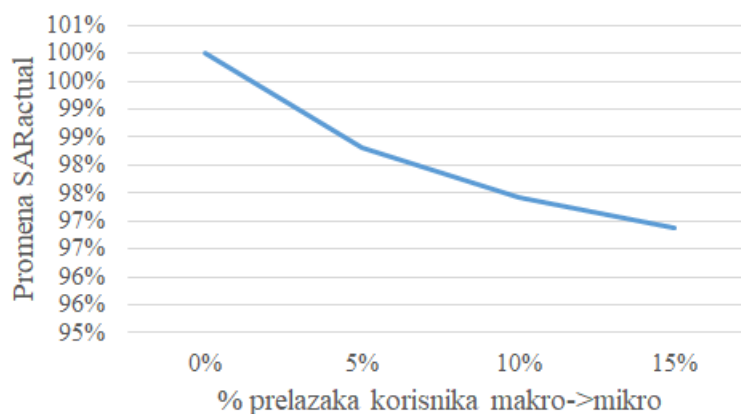
Iz tabela 5.3. i 5.11 vidi se da se normalizovane vrednosti SAR smanjuju sa porastom frekvencije, a u okviru istog opsega su veće za decu nego za odrasle. Povećanje vrednosti SAR direktno utiče na povećanje izloženosti. Slično je i sa predajnom snagom korisničkih uređaja, budući da je izloženost direktno proporcionalna ovim vrednostima. Po pitanju ukupne izloženosti, relativni uticaj promene srednje predajne snage UE na ukupnu izloženost zavisi od komponente izloženosti u DL, kao što se vidi iz analiziranih slučajeva. Prosečno vreme korišćenja takođe ima direktan uticaj na izloženost u UL, a relativni uticaj na ukupnu izloženost opet zavisi i od DL komponente.

Raspodela odbiraka prijemne snage po radio uslovima poslužila je za proračun srednjeg faktora aktivnosti, a promena ove raspodele utiče na srednji stvarni SAR u UL: veći procenat odbiraka u boljim radio uslovima znači da je veći broj korisnika duže vreme koristio servise u dobrim radio uslovima, a to nosi u opštem slučaju nižu predajnu snagu, ali konkretne vrednosti predajne snage i faktora aktivnosti veoma zavise od korišćenih servisa, kako je prikazano u poglavlju 6.

Ukoliko fiksiramo ostale parametre, smatrajući da prebacivanje malog procenta korisnika sa makro na mikro sloj ne utiče mnogo na saobraćaj, i samo povećavamo procenat korisnika na mikro sloju za po 5% na obe tehnologije, možemo proceniti odgovarajući priraštaj srednjeg stvarnog SAR-a u makro i u mikro oblasti, po tehnologijama. Na slikama 7.8 i 7.9 dati su grafici procene priraštaja srednjeg stvarnog SAR-a na lokacijama Mirijevo i Lola, respektivno, sa prelaskom korisnika sa GSM i UMTS makro slojeva na GSM i UMTS mikro slojeve. U slučaju obe lokacije ukupna izloženost opada, što praktično znači da se rasterećenjem makro sloja u ovim slučajevima smanjuje ukupna izloženost. Vidi se i da je ukupno smanjenje manje kod lokacije Lola, usled jake komponente za DL. Treba imati u vidu da je početna raspodela korisnika drugačija na dve lokacije, a posebno, da bi se i raspodela saobraćaja promenila sa ovim prelascima, kao i drugi parametri.



Slika 7.8 Procena promene SAR_{actual} sa prelaskom korisnika sa mikro sloja na makro sloj, lokacija Mirijevo (% prelazaka po svakoj tehnologiji)



Slika 7.9 Procena promene SAR_{actual} sa prelaskom korisnika sa mikro sloja na makro sloj, lokacija Lola (% prelazaka po svakoj tehnologiji)

Po pitanju izloženosti u DL, dominantan uticaj opet ima snaga, odnosno gustina snage incidentnog talasa. I ovde se vrednosti SAR-a menjaju sa frekvencijom i najveće su razlike između deteta i odraslog, pod istim ostalim uslovima. Uticaj telesnog stava postoji, ali nije toliko izražen, kao što se vidi u tabeli 5.11.

7.6 Smernice za optimizaciju mreže u pogledu izloženosti stanovništva

Prethodna analiza dva testna slučaja pokazala je da uvođenje mikro sloja smanjuje ukupnu izloženost stanovništva i to na račun smanjenja komponenta izloženosti u *uplinku*, posebno kod GSM tehnologije. Sa druge strane, pokazano je i da dodavanje male ćelije u zatvorenom prostoru može povećati izloženost od UMTS tehnologije (ukupna se smanjuje zbog smanjenja izloženosti od GSM tehnologije) usled blizine antena bazne stanice. Tzv. rasterećivanje makro ćelija (*offload*) poznato je kao tehnika koja povećava kapacitet i poboljšava pokrivenost mobilnom mrežom, a može takođe doprineti i smanjenju ukupne izloženosti, uz pažljivo planiranje.

Optimizacija mreže u pogledu izloženosti stanovništva može se izvršiti optimizacijom korišćenih tehnologija i topologije mreže, optimizacijom komponenta, optimizacijom protokola i optimizacijom podešavanja u mreži.

ITU-T u preporuci [83] koja se tiče tehnika za smanjenje izloženosti u okolini baznih stanica naglasak stavlja na direkcione antene i odgovarajuće dijagrame zračenja antena sa uskim vertikalnim snopom. Kao primere tehnika optimizacije navode smanjenje predajne snage bazne stanice, što vodi ka smanjenju pokrivanja, povećanje visine antene, smanjenje zakrenutosti antene na dole, povećanje dobitka antene, promene dijagrama zračenja u vertikalnoj i horizontalnoj ravni. Sve ove promene utiču i na pokrivanje, tako da ih nije uvek moguće sprovesti.

Po pitanju optimizacije topologije mreže, sloj malih ćelija može se uvesti uz pažljivo planiranje radi rasterećenja makro sloja i radi smanjenja izloženosti. Dodatno, tehnike upravljanja mrežom mogu se prilagoditi na način da se teži smanjenju izloženosti, pored tradicionalnih ciljeva pokrivanja, kapaciteta, kvaliteta servisa, štednje električne energije i baterije korisničkog uređaja. Parametri u mreži mogu se podesiti na način da se preferira povezivanje korisničkog uređaja preko tehnologije koja generiše manju izloženost (UMTS). Raspoređivanje korisnika po slojevima vrši se podešavanjem specifičnih parametara u mreži (parametri vertikalnog i horizontalnog *handovera*, pojedinačni ćelijski ofset u LTE-u i sl). I bez 5G mreže postoji ogroman broj parametara koji se mogu podešavati u 2G, 3G, 4G mreži, a 5G mreža će doprineti uslozljavanju, tako da manualna optimizacija nije izvodljiva. Pored automatizovanih tehnika optimizacije u mreži (SON: Self-

Optimizing Network) koje već postoje, u literaturi se predlaže i primena mašinskog učenja na optimizaciju ključnih parametara mreže [123], kojima bi se mogla dodati i izloženost stanovništva. Usled snažnih međuzavisnosti parametara koji određuju izloženost u interakciji korisnika i mreže, nije lako predvideti sve moguće situacije i uticaj na izloženost. Različiti pristupi bi se mogli primenjivati u zavisnosti od traženog servisa, doba dana, saobraćajnog opterećenja, mobilnosti korisnika, mogućnosti korisničkog uređaja itd. Redosled prvenstva različitih tipova pristupa trebalo bi potvrditi konkretnim merenjima odnosno poređenjima. Pri tome, mreža nema uticaj ukoliko korisnici koriste telefone koji nemaju mogućnosti za UMTS ili koriste opciju samo-GSM na telefonu. Takođe, u slučaju opterećenja mreže, prioritet ima servisiranje zahteva upućenih ka mreži, pa se i raspoređivanje korisnika po slojevima vrši na taj način. Zahtevi za manjom izloženošću mogu biti suprotstavljeni korisničkim podešavanjima (opcija samo-GSM) ili traženim servisima (slanje datoteka). Tip korišćenog servisa mogao bi povećati izloženost, kako je pokazano u poglavlju 6, tako da bi se različite strategije primenjivale da se identifikuje najbolja konektivnost u zavisnosti od zahtevanog servisa. Tu se javlja pitanje kompromisa između korisničkog iskustva odnosno kvaliteta servisa i izloženosti EM polju.

Kao što je navedeno u poglavlju 6, pojedinac može smanjiti sopstvenu izloženost pre svega držanjem korisničkog uređaja dalje od tela, zatim izbegavanjem korišćenja kada je prijemni signal loš, izbegavanjem uključivanja više bežičnih interfejsa u isto vreme. Međutim, na ponašanje pojedinca mreža nema uticaj. Takođe, današnji tempo života nameće potrebu da pojedinac bude dostupan uvek i svuda i ljudi, u opštem slučaju, pokušavaju da ostvare vezu bez obzira na to kakav je signal mobilne mreže, te se dosta saobraćaja ostvaruje u uslovima lošeg signala [117].

Opšta strategija za optimizaciju izloženosti se odnosi na izbor prave konfiguracije/topologije (prelazak na mikro, piko, femto ćelije), dok bi dopunske strategije mogle da uključe sofisticiranije metode koje obuhvataju manipulaciju saobraćajem [34]. U mreži bi se u budućnosti mogao implementirati, na primer, odložen prenos kad je prijemni signal loš i u zavisnosti od zahtevanog servisa, kompresija govora, a sa strane UE, na primer, izbor protokola za striming (RTSP: Real Time Streaming Protocol, HTTP: HyperText Transfer Protocol).

Radio uslovi i ponašanje korisnika menjaju se u vremenu, tako da bi pored dobrog planiranja mreže trebalo periodično ili na osnovu događaja preduzimati radnje na kontroli EM izloženosti. Slično kao kod kontrole snage, mogla bi se definisati brza kontrola EM izloženosti, gotovo u realnom vremenu, zasnovana na merenjima iz mreže u realnom vremenu, sa vremenom reakcije koje zavisi od merenja u realnom vremenu i vremena potrebnog za obradu podataka (korisnički profili, kontekst, merenja opterećenja ćelije) i usrednjavanje; i sporu kontrolu, koja nije u realnom vremenu i koja se vrši na osnovu statistike prikupljene u delu dana ili celom danu (uzimajući u obzir vreme u toku godine, mrežnu statistiku, učenje, donošenje zaključaka u pogledu merenja performansi).

Važno je imati na umu da ponuđene strategije treba da uzmu u obzir mnogo faktora, uključujući trenutno saobraćajno opterećenje mreže, radio uslove, mobilnost, korišćene aplikacije, dostupne mreže, mogućnosti UE i da se ne može napraviti jedno rešenje za sve situacije.

8 ZAKLJUČAK

U ovoj disertaciji razvijena je metoda za proračun srednje stvarne izloženosti zračenju bežičnih komunikacionih sistema, baznih stanica i korisničkih uređaja, koja koristi u najvećoj meri dostupne statističke podatke iz mobilne mreže, od merenja snage, preko saobraćajne statistike po ćeliji, korisniku, aplikaciji, do podataka o korisničkim uređajima. Sprovedena je analiza uticaja korišćenih servisa na izloženost zračenju korisničkog uređaja, a zatim je na osnovu utvrđenih rezultata analiziran i određen uticaj arhitekture mobilne mreže na ukupnu izloženost stanovništva EM polju na dve lokacije. Izložene analize otvorile su više tačaka za diskusiju.

Najpre, statističko izračunavanje izloženosti korišćenjem merenja iz operativne mreže, čak i uz naznačene nesigurnosti, daje sredstvo za poređenje ukupne izloženosti, na osnovu prave, stvarne vrednosti, koja potiče od baznih stanica i od korisničkih uređaja, kao i za poređenje različitih radio tehnologija. Namena ovako kompleksne kalkulacije, koja uzima u obzir toliko mnogo faktora, bila je da se pokažu stvarne srednje vrednosti SAR-a za stvarne scenarije korišćenja, da se uporede po scenariju i po komponentama izloženosti i da se pokaže koliko je daleko od graničnih vrednosti stvarna srednja izloženost populacije, obeležavajući prostor koji ostaje za buduće 4G/5G mreže.

U oba testna slučaja znatno smanjenje izloženosti u mikro oblasti sa uvođenjem mikro bazne stanice, i to kad je makro sloj i dalje uključen, potiče od smanjenja UL komponenata. Usled rastuće upotrebe mobilnih tehnologija i uređaja, izloženost koja potiče od zračenja korisničkih uređaja postala je dominantan faktor [27]. Ovo se ne vidi jasno kroz važeće procedure provere usklađenosti sa regulativom jer korisnički uređaji moraju da zadovolje granične SAR vrednosti, gde se SAR meri u laboratoriji, dok se za bazne stanice usaglašenost sa referentnim graničnim nivoima evaluira korišćenjem merenja na terenu. SAR ne odražava stvarno korišćenje uređaja, budući da se prijavljuje najviša izmerena vrednost (korisnik možda nikad neće koristiti uređaj na taj način), a veza između izloženosti u *uplinku* i u *downlinku* nije intuitivna.

Osnovni doprinos smanjenju izloženosti dolazi od GSM tehnologije, što je opet očekivano usled svojstava tehnologije (klase snage i kontrola snage). U testnom slučaju sa dodavanjem male ćelije sa distribuiranim antenskim sistemom u objektu izloženost od UMTS tehnologije se povećala, premda se ukupna izloženost smanjila zahvaljujući smanjenju izloženosti od GSM tehnologije, što ukazuje na to da je potrebno pažljivo planiranje arhitekture mobilne mreže u cilju smanjenja izloženosti. Definisana metoda za ocenu izloženosti objašnjena je i eksperimentalno demonstrirana korišćenjem dva testna slučaja, sa po dva scenarija u GSM i UMTS mreži, a može se koristiti za bilo koju bežičnu mrežu uz odgovarajuće prikupljanje podataka iz mreže. Isti mrežni podaci, u realnom vremenu i u dužem periodu, mogu se dobiti iz 4G mreže, tako da se ovaj metod takav kakav jeste može koristiti za procenu izloženosti i u 4G mreži. Za WLAN mrežu nedostaju podaci o korisničkim profilima, ali bi se oni mogli ekstrapolirati na osnovu podataka iz mobilne mreže, budući da se oni analiziraju u dužem periodu i važe za duži period, ne samo tokom merenja.

Drugo, srednji stvarni SAR bi se mogao preciznije izračunati na mrežnom nivou uz uvođenje sofisticiranih alata koji bi kombinovali podatke sa radio interfejsa i podatke o korišćenim aplikacijama na nivou korisnika (alati za optimizaciju sa geolokacijom, sonde na mrežnim interfejsima u *core* mreži, CEM alati). Prostorna raspodela korisnika, koja je identifikovana kao ključni parametar za procenu izloženosti u sistemima koji koriste masivni MIMO sa oblikovanjem snopa [30][33], mogla bi se dobiti pomoću alata sa geolokacijom ali bi ovo zahtevalo dosta računarskih resursa za procenu u skoro realnom vremenu. Međutim, neki obrasci ponašanja mogli bi se izvući u dužem periodu i iskoristiti u proračunu kao realistični podaci. Prednost je to što bi se

koristili sistemi koji već prikupljaju podatke za druge namene, a uz implementaciju mehanizma za evaluaciju izloženosti, njeno smanjenje bi mogao biti još jedan cilj optimizacije mreže. Tačne raspodele u okviru kategorija populacije, stavova, okruženja i dalje bi bile pretpostavke zasnovane na spoljnim izvorima. Faktor aktivnosti na radio interfejsu i dalje bi se morao meriti spolja u odnosu na mrežu. U istraživanju u okviru ove disertacije izvršena su merenja na terenu na otvorenom u jednom testnom slučaju i ekstrapolirani su rezultati za ukupnu (po populaciji) izloženost u zatvorenom na osnovu procenjenog broja korisnika koji su u zatvorenom i na osnovu faktora slabljenja, budući da merenja nije bilo moguće izvršiti u zatvorenim prostorima od interesa. Frekvencijski selektivna merenja polja za kalkulaciju izloženosti u DL bilo bi teško izvoditi u svakom okruženju čak i samo za skup tipičnih uslova, ali bi se mogla izvršiti ekstrapolacija na osnovu tipičnih okruženja i merenja UE Rx snage. Čelijska statistika mogla bi se takođe unaprediti u ove svrhe. Iako merenja UE Rx snage ne hvataju celokupno polje, ona i dalje daju vredne podatke koji bi se mogli iskoristiti kroz kalibrisani model da se proceni gustina incidentne snage. Većina ljudi komunicira dok je u unutrašnjosti objekata, gde merenja polja za DL kalkulaciju generalno nisu moguća na masivnom nivou, za sve uslove okruženja i opterećenja mreže, tako da bi se mogla koristiti merenja UE Rx power sa mreže uz ekstrapolaciju. Kao što je navedeno u [31], mrežna merenja predstavljaju moćan alat, posebno kada se koristi oblikovanje snopa i traži prostorna raspodela snage.

Zatim, uvođenje agenata na telefonima (uključujući senzore) koji bi sakupljali radio podatke i podatke o korišćenju, ili čak i neke podatke o kategoriji korisnika, mogli bi unaprediti kalkulaciju i umanjiti potrebu za spoljnim izvorima, međutim, bile bi potrebne dodatne izveštajne poruke od telefona ka mreži. Telefoni sa modifikovanim softverom, kao što je predloženo u [124] za prikupljanje podataka o korišćenju u okviru studije, mogli bi se kombinovati sa mrežnim alatima da bi se dobilo mapiranje podataka iz korisničke ravni sa radio parametrima koji su potrebni za ocenu izloženosti. Informacije o kontekstu korisnika koje bi se mogle koristiti u ultra gustim mrežama sa *device-to-device* komunikacijom za upravljanje konektivnošću i smanjenje potrošnje energije [125], mogle bi se takođe koristiti u svrhe procene i daljeg smanjenja izloženosti EM polju, kroz upravljanje konektivnošću uz druge tehnike [34].

Treće, ovakva procena zasnovana na mrežnim podacima otvara vrata za buduće mreže svesne EM zračenja. Simulacije i mrežna merenja u operativnoj mreži mogli bi se koristiti zajedno da se kalibrišu modeli i obezbede alati za buduće planiranje mreže koje uzima u obzir i smanjenje EM izloženosti. Konvergentne mreže mogle bi da sakupljaju podatke, evaluiraju EM izloženost populacije i preduzimaju korake na optimizaciji mreža u cilju smanjenja EM izloženosti (selekcija pristupa i sl) [34]. Upravljanje EM izloženošću moglo bi se dodati SON funkcionalnostima, ali bi procena u gotovo realnom vremenu i odziv zahtevali obradu ogromnih količina podataka. Sa povećanjem broja raznih novih bežičnih mreža (IoT), posebno onih sa pristupnim tačkama unutar doma (WiFi), analitika unutar doma preko kabla mogla bi da pruži vredne podatke za procenu izloženosti unutar objekata. Složenost mreže sa velikim brojem izvora zračenja i snažnim međuzavisnostima implicira i upotrebu mašinskog učenja radi pronalaženja najboljih optimizacionih postupaka [122], na primer za selekciju pristupa od strane korisnika, odnosno raspoređivanje korisnika po različitim slojevima za optimalne performanse.

Izazovi procene izloženosti od 5G mreže, uključujući masivni MIMO, oblikovanje snopa i nove frekvencijske opsege, zajedno sa kompleksnošću postojećih mreža 2G/3G/4G, sugerišu da bi najprikladniji metod za procenu izloženosti EM polju bio zasnovan na statističkom pristupu [5][33]. Za statističku metodologiju koja je razvijena u ovoj disertaciji, pored alata koji bi smanjili nesigurnosti procene, izloženost u DL bi se morala modelovati da bi se smanjio broj potrebnih merenja na terenu. U slučaju oblikovanja snopa u *downlinku*, metod za procenu srednje izloženosti u DL koji se zasniva na odbircima UE Rx power bio bi veoma koristan, imajući u vidu da bi odgovarajuća merenja na terenu bilo vrlo složeno sprovesti i obraditi. Oblikovanje snopa u *uplinku* predstavljalo bi značajan izazov za procenu izloženosti u UL, budući da bi bilo potrebno modelovati smer snopa i prostornu raspodelu izračene snage. Najnovije ICNIRP smernice [51] sugerišu da

ograničenje po SAR-u treba da važi i za više frekventijske opsege koji će se koristiti, tako da u kompleksnom okruženju novih tehnologija statistički proračun srednjeg stvarnog SAR-a sa podacima dostupnim iz mreže dobija na značaju.

LITERATURA

- [1] “Ericsson Mobility Report, June 2017,” Ericsson, Stockholm, Sweden. EAB-17:005964 Uen, Revision B, Jun. 2017. [Online]. Available: <https://www.ericsson.com/en/mobility-report>.
- [2] “The Mobile Economy 2019,” GSMA. London, UK. Feb. 2019. [Online]. Available: <https://www.gsma.com/r/mobileeconomy/3/>.
- [3] “Usage of information and communication technologies in the Republic of Serbia, 2016,” Statistical office of the Republic of Serbia, Belgrade, Serbia. Mar. 2016. [Online]. Available: <https://www.stat.gov.rs/en-US/oblasti/upotreba-ikt>.
- [4] “US Time Spent with Media 2019: Digital Time Keeps Rising as Growth Subsides for Total Time Spent,” eMarketer, New York, USA. May 2019. [Online]. Available: <https://www.emarketer.com/content/us-time-spent-with-media-2019>.
- [5] R. Pawlak, P. Krawiec, and J. Zurek, “On Measuring Electromagnetic Fields in 5G Technology,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 29826 – 29835, Mar. 2019, DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2902481.
- [6] L. Chiaraviglio, A. S. Cacciapuoti, G. Di Martino, M. Fiore, M. Montesano, D. Trucchi, and N. Blefari-Melazzi, “Planning 5G Networks Under EMF Constraints: State of the Art and Vision,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 51021 – 51037, Sep. 2018, DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2868347.
- [7] F. Freudenstein, P.M. Wiedemann, N. Varsier, “Exposure knowledge and risk perception of RF EMF,” *Frontiers in Public Health*, 2(289), 2015, DOI:10.3389/fpubh.2014.00289.
- [8] F. Freudenstein, P.M. Wiedemann, M. Pejanovic-Djurisic, M. Koprivica, and A. Neskovic, “Intuitive exposure and risk perception of RF EMF: Case studies Serbia and Montenegro,” *2014 22nd Telecommunications Forum Telfor (TELFOR)*, pp. 1-4, 2014, DOI: 10.1109/TELFOR.2014.7034344..
- [9] F. Freudenstein, P. M. Wiedemann, and T. W. C. Brown, “Exposure perception as a key indicator of risk perception and acceptance of sources of radio frequency electromagnetic fields“, *Journal of Environmental and Public Health*, vol. 2015, Article ID 198272, Jul. 2015, DOI: 10.1155/2015/198272.
- [10] “Le téléphone portable sera interdit dans les écoles et collèges à partir de la rentrée 2018,” *Libération* 2017. [Online]. Available: http://www.liberation.fr/france/2017/12/10/le-telephone-portable-sera-interdit-dans-les-ecoles-et-colleges-a-partir-de-la-rentree-2018_1615697.
- [11] “CDPH Issues Guidelines on How to Reduce Exposure to Radio Frequency Energy from Cell Phones,” California Department of Public Health, 2017. [Online]. Available: <https://www.cdph.ca.gov/Programs/OPA/Pages/NR17-086.aspx>.
- [12] “U.S. Consumers Time-Spent on Mobile Crosses 5 Hours a Day,” Flurry Analytics Blog, 2017. [Online]. Available: <http://flurrymobile.tumblr.com/post/157921590345/us-consumers-time-spent-on-mobile-crosses-5>.
- [13] T. Alanko, M. Hietanen, and P. von Nandelstadh, “Occupational exposure to RF fields from base station antennas on rooftops,” *Annals of Telecommunications*, 63:125–132, 2008, DOI: 10.1007/s12243-007-0001-6.
- [14] M. Tesanovic, E. Conil, A. De Domenico, R. Agüero, F. Freudenstein, L. Correia, S. Bories, L. Martens, P. Wiedemann, and J. Wiart, “The LEXNET Project: Wireless Networks and EMF: Paving the Way for Low-EMF Networks of the Future,” *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 9(2), 20-28, 2014, DOI: 10.1109/MVT.2014.2312272.
- [15] N. Varsier, D. Plets, Y. Corre, G. Vermeeren, W. Joseph, S. Aerts, L. Martens, and J. Wiart, “A novel method to assess the human population exposure induced by a wireless

- telecommunication network,” *Bioelectromagnetics*, 36(6):451-63, 2015, DOI: 10.1002/bem.21928.
- [16] Y. Huang, N. Varsier, S. Niksic, E. Kocan, M. Pejanovic-Djurisic, M. Popovic, M. Koprivica, A. Neskovic, J. Milinkovic, A. Gati, C. Person, and Wiart J, “Comparison of average global exposure of population induced by a macro 3G network in different geographical areas in France and Serbia,” *Bioelectromagnetics*, vol. 37, no. 6, pp. 382-390, Sep. 2016, DOI: 10.1002/bem.21990.
- [17] D. Plets, W. Joseph, S. Aerts, K. Vanhecke, G. Vermeeren, and L. Martens, “Prediction and comparison of downlink electric-field and uplink localized SAR values for realistic indoor wireless planning,” *Radiat. Prot. Dosimetry*, vol. 162, no. 4, pp. 487-498, Dec. 2014, DOI: 10.1093/rpd/ncu019.
- [18] L.K Hedendahl, M. Carlberg, T. Koppel, and L. Hardell, “Measurements of Radiofrequency Radiation with a Body-Borne Exposimeter in Swedish Schools with Wi-Fi,” *Front. Public Health*, 5:279, 2017, DOI: 10.3389/fpubh.2017.00279.
- [19] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP), “Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz),” *Health Phys.*, vol. 74, no. 4, pp. 494–522, Apr. 1998.
- [20] “SAR Information,” Samsung, 2018. [Online]. Available: <http://www.samsung.com/sar/sarMain.do>.
- [21] “Specific Absorption Rate (SAR) For Cell Phones: What It Means For You,” Federal Communications Commission, 2018. [Online]. Available: <https://www.fcc.gov/consumers/guides/specific-absorption-rate-sar-cell-phones-what-it-means-you>.
- [22] “Measurement procedure for the assessment of specific absorption rate of human exposure to radio frequency fields from hand-held and body-worn wireless communication devices - Human models, instrumentation and procedures (Frequency range of 4 MHz to 10 GHz),” IEC/IEEE 62209-1528:2020, 2020.
- [23] K. Roser, A. Schoeni, A. Bürgi, and M. Rössli, “Development of an RF-EMF Exposure Surrogate for Epidemiologic Research,” *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 12, no. 5, pp. 5634-5656, May 2015, DOI:10.3390/ijerph120505634.
- [24] O. Lauer, P. Frei, M. Gosselin, W. Joseph, M. Rössli, and J. Fröhlich, “Combining near- and far-field exposure for an organ-specific and whole-body RF-EMF proxy for epidemiological research: a reference case,” *Bioelectromagnetics*, vol. 34, no. 5, pp. 366-374, Jul. 2013, DOI: 10.1002/bem.21782.
- [25] S. Aerts, D. Plets, L. Verloock, L. Martens, and W. Joseph, “Assessment and comparison of total RF-EMF exposure in femtocell and macrocell base station scenarios,” *Radiat. Prot. Dosimetry*, vol. 162, no. 3, pp. 236-243, Dec. 2014, DOI: 10.1093/rpd/nct272.
- [26] J. Wilén J, M. Sandström, and K. Hansson Mild, “Subjective symptoms among mobile phone users--a consequence of absorption of radiofrequency fields?,” *Bioelectromagnetics*, 24(3):152-9, 2003, DOI: 10.1002/bem.10101.
- [27] S. Kuehn, S. Pfeifer, and N. Kuster, “Total Local Dose in Hypothetical 5G Mobile Networks for Varied Topologies and User Scenarios,” *Appl.Sci.*, vol. 19, no. 17, Article 5971, Aug. 2020, DOI:10.3390/app10175971.
- [28] P. Joshi, D. Colombi, B. Thors, L. Larsson, and C. Törnevik, “Output Power Levels of 4G User Equipment and Implications on Realistic RF EMF Exposure Assessments,” *IEEE Access*, vol. 5, pp. 4545 – 4550, Mar. 2017, DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2682422.
- [29] P. Joshi, M. Agrawal, B. Thors, D. Colombi, A. Kumar, and C. Törnevik, “Power level distributions of radio base station equipment and user devices in a 3G mobile communication network in India and the impact on assessments of realistic RF EMF exposure,” *IEEE Access*, vol. 3, pp. 1051-1059, Jul. 2015, DOI: 10.1109/ACCESS.2015.2453056.
- [30] B. Thors, A. Furuskär, D. Colombi, and C. Törnevik, “Time-Averaged Realistic Maximum Power Levels for the Assessment of Radio Frequency Exposure for 5G Radio Base Stations

- Using Massive MIMO,” *IEEE Access*, vol. 5, pp. 19711 – 19719, Sep. 2017, DOI:10.1109/ACCESS.2017.2753459.
- [31] D. Colombi, P. Joshi, B. Xu, F. Ghasemifari, V. Narasaraju, and C. Törnevik, “Analysis of the Actual Power and EMF Exposure from Base Stations in a Commercial 5G Network,” *Appl.Sci.*, vol. 10, no. 15, Article 5280, Jul. 2020, DOI: 10.3390/app10155280.
- [32] R. Ramirez-Vazquez, I. Escobar, A. Thielens, and E. Arribas, “Measurements and Analysis of Personal Exposure to Radiofrequency Electromagnetic Fields at Outdoor and Indoor School Buildings: A Case Study at a Spanish School,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. pp. 195692-195702, Oct. 2020, DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3033800.
- [33] M. Al Hajj, S. Wang, L. Thanh Tu, S. Azzi, and J. Wiart, “A Statistical Estimation of 5G Massive MIMO Networks’ Exposure Using Stochastic Geometry in mmWave Bands,” *Appl.Sci.*, vol. 10, no. 23, Article 8753, Dec. 2020, DOI: 10.3390/app10238753.
- [34] M. Popović, M. Tešanović, B. Radier, “Strategies for reducing the global EMF exposure: cellular operators perspective,” *11th ISWCS*, pp. 836-841, Barcelona, Spain, 2014, DOI: 10.1109/ISWCS.2014.6933469.
- [35] Federal Communications Commission, “Evaluating compliance with FCC guidelines for human exposure to radiofrequency electromagnetic fields,” *FCC 1997–01 ed: OET Bulletin 65*, 1997.
- [36] “IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz, ” IEEE Std C95.1-2005 (Revision of IEEE Std C95.1-1991), pp.1-238, 19 April 2006, DOI: 10.1109/IEEESTD.2006.99501.
- [37] “Limits of Human Exposure to Radiofrequency Electromagnetic Fields in the Frequency Range from 3 KHZ to 300 GHZ - Safety Code 6,” Health Canada, 1999. [Online]. Available: <https://publications.gc.ca/collections/Collection/H46-2-99-237E.pdf>.
- [38] “Radiation protection standard - maximum exposure levels to radiofrequency fields-3 kHz to 300 GHz,” ARPANSA Radiation Protection Series, Publication No. 3, 2002.
- [39] “IARC classifies radiofrequency electromagnetic fields as possibly carcinogenic to humans,” World Health Organization – International Agency for Research on Cancer (WHO/IARC), Press release N° 208, 31 May 2011. [Online]. Available: https://www.iarc.who.int/wp-content/uploads/2018/07/pr208_E.pdf.
- [40] “Cartoradio. The map of radio sites and wave measurements,” ANFR. [Online]. Available: <https://www.cartoradio.fr/#/>.
- [41] Senderkataster Austria. [Online]. Available: <https://www.senderkataster.at/karte>.
- [42] “Carte des antennes émettrices,” Bruxelles Environment. [Online]. Available: <https://environnement.brussels/thematiques/ondes-et-antennes/ou-sont-les-antennes/carte-des-antennes-emettrices>.
- [43] “Praćenje nivoa EM polja, ” RATEL. [Online]. Available: <https://emf.ratel.rs/>.
- [44] “ITU-T K Suppl. 1 (05/2021). ITU-T K.91. Guide on electromagnetic fields and health,” ITU-T K Suppl. 1, May 2021. [Online]. Available: <https://www.itu.int/ITU-T/recommendations/rec.aspx?rec=14750>.
- [45] “ITU-T K Suppl. 14 (09/2019). The impact of RF-EMF exposure limits stricter than the ICNIRP or IEEE guidelines on 4G and 5G mobile network deployment” ITU-T K Suppl. 14, Sep. 2019. [Online]. Available: <https://www.itu.int/ITU-T/recommendations/rec.aspx?rec=14077>.
- [46] “Background Papers: 5G implementation in non-EU countries of the Europe Region,” ITU-D, ITU Regional Forum for Europe: 5G Strategies, Policies and Implementation, 22-23 October 2020. [Online]. Available: https://www.itu.int/en/ITU-D/Regional-Presence/Europe/Pages/Events/2020/5G_EUR/5G_Europe.aspx.
- [47] “Pravilnik o granicama izlaganja nejonizujućim zračenjima,” *Sl. glasnik RS* br. 104/2009 od 16/12/2009.
- [48] “Mobilne mreže u Srbiji,” RATEL. [Online]. Available: <https://mapepokrivenosti.ratel.rs/lat/networks>.

- [49] A. Bamba, W. Joseph, J.B. Andersen, T. E. G. Vermeeren, D. Plets, J.Ø. Nielsen, and L. Martens, "Experimental Assessment of Specific Absorption Rate Using Room Electromagnetics," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 54, no. 4, pp. 747-757, Aug. 2012, DOI: 10.1109/TEMC.2012.2189572.
- [50] "Institute of Electrical and Electronics Engineers. IEEE recommended practice for measurements and computations of electric, magnetic, and electromagnetic fields with respect to human exposure to such fields, 0 Hz to 300 GHz," IEEE Standard C95.3-2021, 2021.
- [51] International Commission for Non Ionizing Radiation Protection (ICNIRP), "ICNIRP Guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz)," *Health Physics*. 118 (5): 483-524, 2020.
- [52] "1999/519/EC: "Council Recommendation of 12 July 1999 on the limitation of exposure of the general public to electromagnetic fields (0 Hz to 300 GHz)," *Official Journal L199*, Jul. 1999, p.59-70. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reco/1999/519/oj>.
- [53] "Directive 2013/35/EU of the European Parliament and of the Council of 26 June 2013 on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (electromagnetic fields) (20th individual Directive within the meaning of Article 16(1) of Directive 89/391/EEC) and repealing Directive 2004/40/EC," *Official Journal of the European Union L 179/1*, Jun. 2013.
- [54] "Décret n°2002-775 du 3 mai 2002 pris en application du 12° de l'article L. 32 du code des postes et télécommunications et relatif aux valeurs limites d'exposition du public aux champs électromagnétiques émis par les équipements utilisés dans les réseaux de télécommunication ou par les installations radioélectriques," République Française, 2002. [Online]. Available: <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000000226401/>.
- [55] "Decreto 10 settembre 1998, n. 381, Regolamento recante norme per la determinazione dei tetti di radiofrequenza compatibili con la salute umana," Ministero dell'ambiente, *Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana Serie Generale n.257* del 03-11-1998.
- [56] "Regione Lazio Regolamento regionale 21 febbraio 2001, n. 1, Regolamento regionale per la disciplina delle procedure per l'installazione, la modifica ed il risanamento di sistemi radioelettrici," *Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana 3a Serie Speciale - Regioni n.26* del 29-06-2002.
- [57] "Charte, Relative à la téléphonie mobile, le 30 mars 2017," Mairie de Paris, 2017. [Online]. Available: <https://www.paris.fr/pages/les-ondes-electromagnetiques-4601>.
- [58] "814.710 Ordonnance sur la protection contre le rayonnement non ionisant (ORNI) du 23 décembre 1999," Le Conseil fédéral suisse, 1999. [Online]. Available: <https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2000/38/fr>.
- [59] "Brusselse Ordonnantie van 1 maart 2007 betreffende de bescherming van het leefmilieu tegen de eventuele schadelijke effecten en hinder van niet-ioniserende stralingen," Ministerie van het Brusselse Hoofdstedelijke Gewest, *Belgisch staatsblad*, vol. 2007-03-14, Mar. 2007.
- [60] "Ordonnantie tot wijziging van de ordonnantie van 1 maart 2007 betreffende de bescherming van het leefmilieu tegen de eventuele schadelijke effecten en hinder van niet-ioniserende stralingen en tot wijziging van de ordonnantie van 5 juni 1997 betreffende de milieuvergunningen," Ministerie van het Brussels Hoofdstedelijke Gewest, *Belgisch Staatsblad*, vol. 2014-04-30, pp. 35651-3, Apr. 2014.
- [61] "19 november 2010 – Besluit van de Vlaamse Regering tot wijziging van het besluit van de Vlaamse Regering van 1 juni 1995 houdende algemene en sectorale bepalingen inzake milieuhygiëne wat betreft de normering van vast en tijdelijk opgestelde zendantennes voor elektromagnetische golven tussen 10 MHz en 10 GHz," Vlaamse Overheid, *Belgisch Staatsblad*, vol. 2011-01-13, 2011.
- [62] "IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields, 0 Hz to 300 GHz," IEEE Std C95.1-2019 (Revision of IEEE Std C95.1-2005/ Incorporates IEEE Std C95.1-2019/Cor 1-2019), pp.1-312, 4 Oct. 2019, DOI: 10.1109/IEEESTD.2019.8859679.

- [63] “Human Exposure to Radiofrequency Electromagnetic Fields,” Federal Communications Commission, *Federal Register*, Vol. 78, No. 107, June 4, 2013, Rules and Regulations.
- [64] “Human Exposure to Radiofrequency Electromagnetic Fields and Reassessment of FCC Radiofrequency Exposure Limits and Policies,” Federal Communications Commission, *Federal Register*, Vol. 85, No. 63, April 1, 2020, Rules and Regulations.
- [65] “Human Exposure to Radiofrequency Electromagnetic Fields and Reassessment of FCC Radiofrequency Exposure Limits and Policies,” Final rule, announcement of effective date, Federal Communications Commission, *Federal Register*, Vol. 86, No. 74, April 20, 2021, Rules and Regulations.
- [66] “Limits of Human Exposure to Radiofrequency Electromagnetic Fields in the Frequency Range from 3 KHZ to 300 GHZ - Safety Code 6 (2015),” Consumer and Clinical Radiation Protection Bureau, Environmental and Radiation Health Sciences Directorate, Healthy Environments and Consumer Safety Branch, Health Canada, 2015. [Online]. Available: <https://www.canada.ca/en/health-canada/services/publications/health-risks-safety/limits-human-exposure-radiofrequency-electromagnetic-energy-range-3-300.html>.
- [67] “Standard for Limiting Exposure to Radiofrequency Fields – 100 kHz to 300 GHz,” Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency, Radiation Protection Series S-1 (Rev.1), Feb. 2021.
- [68] “Zakon o elektronskim komunikacijama,” *Sl. glasnik RS*, br. 44/2010, 60/2013, 62/2014 i 95/2018.
- [69] “Zakon o zaštiti od nejonizujućih zračenja,” *Sl. glasnik RS*, br. 36/2009.
- [70] “Pravilnik o izvorima nejonizujućih zračenja od posebnog interesa, vrstama izvora, načinu i periodu njihovog ispitivanja,” *Sl. glasnik RS*, br. 104/2009.
- [71] “Determination of RF field strength, power density and SAR in the vicinity of radiocommunication base stations for the purpose of evaluating human exposure,” IEC 62232:2017, 2017.
- [72] “ITU-T K.61 (01/2018). Series K: Protection against interference. Guidance on measurement and numerical prediction of electromagnetic fields for compliance with human exposure limits for telecommunication installations,” ITU-T K.6, Jan. 2018.
- [73] “ITU-T K.91 (12/2020). Series K: Protection against interference. Guidance for assessment, evaluation and monitoring of human exposure to radio frequency electromagnetic fields,” ITU-T K.91, Dec. 2020.
- [74] N. Nešković, M. Koprivica, A. Nešković, and G. Paunović, “Improving the efficiency of measurement procedures for assessing human exposure in the vicinity of mobile phone (GSM/DCS/UMTS) base stations,” *Radiat Prot Dosim*, vol. 149, 2012, pp. 238–44, DOI: 10.1093/rpd/ncr248.
- [75] “Determining the peak spatial-average specific absorption rate (SAR) in the human body from wireless communications devices, 30 MHz to 6 GHz - Part 1: General requirements for using the finite difference time-domain (FDTD) method for SAR calculations,” IEC/IEEE 62704-1:2017.
- [76] “Determining the peak spatial-average specific absorption rate (SAR) in the human body from wireless communications devices, 30 MHz to 6 GHz - Part 2: Specific requirements for finite difference time domain (FDTD) modelling of exposure from vehicle mounted antennas,” IEC/IEEE 62704-2:2017.
- [77] “Determining the peak spatial-average specific absorption rate (SAR) in the human body from wireless communications devices, 30 MHz to 6 GHz - Part 3: Specific requirements for using the finite difference time domain (FDTD) method for SAR calculations of mobile phones,” IEC/IEEE 62704-3:2017.
- [78] “Determining the peak spatial-average specific absorption rate (SAR) in the human body from wireless communication devices, 30 MHz to 6 GHz - Part 4: General requirements for using the finite element method for SAR calculations,” IEC/IEEE 62704-4:2020.

- [79] "Measurement procedure for the assessment of specific absorption rate of human exposure to radio frequency fields from hand-held and body-mounted wireless communication devices - Part 3: Vector measurement-based systems (Frequency range of 600 MHz to 6 GHz)," IEC/IEEE 62209-3:2019.
- [80] "Osnovni standard za procedure merenja i proračuna izloženosti ljudi električnim, magnetskim i elektromagnetskim poljima (od 0 Hz do 300 GHz)," Institut za standardizaciju Srbije, SRPS EN 50413:2020, 30.4.2020.
- [81] "Određivanje jačine RF polja, gustine snage i SAR u blizini radiokomunikacionih baznih stanica radi procene izlaganja ljudi," Institut za standardizaciju Srbije, SRPS EN 62232:2017, 25.12.2017.
- [82] "Standard za proizvod za pokazivanje usaglašenosti opreme bazne stanice sa granicama izlaganja radiofrekvencijskim elektromagnetskim poljima (od 110 MHz do 100 GHz), kada se stavlja u upotrebu," Institut za standardizaciju Srbije, SRPS EN 50401:2017, 25.12.2017.
- [83] "ITU-T K.70 (12/2020). Series K: Protection against interference. Mitigation techniques to limit human exposure to EMFs in the vicinity of radiocommunication stations," ITU-T K.70, Dec. 2020.
- [84] "IEEE 1528.7-2020 - IEEE Guide for EMF Exposure Assessment of Internet of Things (IoT) Technologies and Devices," IEEE 1528.7-2020, 11.1.2021.
- [85] A. Paljanos, S. Miclaus, P. Bechet, and C. Munteanu, "Assessment of mobile phone user exposure to UMTS and LTE signals: comparative near-field radiated power levels for various data and voice application services," *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 30(9): 1-15, 2016, DOI: 10.1080/09205071.2016.1167634.
- [86] M. Koprivica, M. Petrić, M. Popović, J. Milinković, and A. Nešković, "Empirical Analysis of Electric Field Strength Long-Term Variability for GSM/DCS/UMTS Downlink Band," *Telfor J.*, vol. 8, no. 2, 2016, pp. 87-92, Nov. 2016, DOI: 10.5937/telfor1602087K.
- [87] S. Sagar, B. Struchen, V. Finta, M. Eeftens, and M. Rössli, "Use of portable exposimeters to monitor radiofrequency electromagnetic field exposure in the everyday environment," *Environ. Res.*, 150:289-298, Oct. 2016, DOI: 10.1016/j.envres.2016.06.020.
- [88] EU FP7 project LEXNET: Low EMF exposure future networks, GA N°318273, 2012-2015, www.lexnet-project.eu.
- [89] EU FP7 LEXNET project, GA N°318273, Deliverable D2.8, "Global wireless exposure metric definition," 2015. [Online]. Available: <https://cordis.europa.eu/docs/projects/cnect/3/318273/080/deliverables/001-LEXNETWP2D28GlobalwirelessexposuremetricdefAres20155347928.pdf>.
- [90] "Indoor Small Cells: A Guide to Mission-Critical Communication", Cisco, 2014. [Online]. Available: <https://www.cisco.com/c/dam/en/us/solutions/collateral/service-provider/small-cell-solutions/smallcells-infographic.pdf>.
- [91] "Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Radio transmission and reception (GSM 05.05)," GSM 05.05 Version 5.0.0, March 1996.
- [92] "3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Base Station (BS) radio transmission and reception (FDD) (Release 6)," 3GPP TS 25.104 V6.12.0. Mar. 2006.
- [93] "3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; FDD Base Station (BS) classification," 3GPP TR 25.951 version 6.3.0, Release 6, Oct 2006.
- [94] "3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Base Station (BS) radio transmission and reception (FDD) (Release 9)," 3GPP TS 25.104 V9.0.0, May 2009.
- [95] "3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Base Station (BS) radio transmission and reception (Release 12)," 3GPP TS 36.104 V12.0.0, July 2013.
- [96] M. Koprivica, M. Popović, A. Nešković, "Chapter 5: Architecture of public mobile networks and its impact on EMF exposure," Low Electromagnetic Emission Wireless Network

- Technologies: 5G and beyond, edited by Muhammad Ali Imran, Fabien Hélot, Yusuf Abdulrahman Sambo, IET, published November 2019, DOI: 10.1049/PBTE084E.
- [97] “Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2017-2022,” Cisco, Feb. 2019. [Online]. Available: <http://media.mediapost.com/uploads/CiscoForecast.pdf>
- [98] “Ericsson Mobility Report, November 2016,” Ericsson, Stockholm, Sweden, 2016. [Online]. Available: <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/mobility-report/reports>.
- [99] A. Sârbu, P. Bechet, and S. Miclaus S, “Mobile Phone User Exposure Assessment to UMTS and LTE Signals at Mobile Data Turn on by Applying an Original Method,” *International conference KNOWLEDGE-BASED ORGANIZATION*. 23(3): 114–119, 2017, DOI: 10.1515/kbo-2017-0164.
- [100] M. Popović, M. Koprivica, S. Nikšić, J. Milinković, and A. Nešković, “Methodology for the comparison of cellular technologies and services with respect to EMF exposure,” *22nd Telfor*, Belgrade, Serbia, 2014, pp. 13-16, DOI: 10.1109/TELFOR.2014.7034347.
- [101] EU FP7 LEXNET project, GA N°318273, Deliverable D2.1, “Deliverable D2.1: Current metrics for EMF exposure evaluation,” 2014.
- [102] M. Popović, M. Koprivica, J. Milinković, and A. Nešković, “Experimental Analysis of Individual EMF Exposure for GSM/UMTS/WLAN User Devices,” *Ann. Telecommun.*, vol. 74, no. 1-2, pp. 79-91, Feb. 2019, DOI: 10.1007/s12243-018-0679-7.
- [103] M. V. P. Saković, M. T. Koprivica, J. M. Milinković i A. M. Nešković, “Comparison of Average Total EMF Exposure for Microcell/Macrocell Topologies Using Novel Methodology Based on Operational Network Measurements,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 113770-113787, 2021, DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3104930.
- [104] “3rd Generation Partnership Project, Technical Specification Group Radio Access Network; Requirements for support of radio resource management (FDD) (Release 6),” 3GPP TS 25.133, 2006.
- [105] “3rd Generation Partnership Project, Technical Specification Group Core Network; Mobile radio interface layer 3 specification; Core Network Protocols; Stage 3 (Release 1999),” 3GPP TS 24.008, 2005.
- [106] “3rd Generation Partnership Project, Technical Specification Group Radio Access Network; Physical layer; Measurements (FDD) (Release 11),” 3GPP TS 25.215, 2011.
- [107] “3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group GSM/EDGE Radio Access Network; Multiplexing and multiple access on the radio path (Release 12),” 3GPP TS 45.002, 2013.
- [108] “3rd Generation Partnership Project, Technical Specification Group Radio Access Network; Radio Resource Control (RRC); Protocol Specification (Release 6),” 3GPP TS 25.331, 2008.
- [109] “3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Services and System Aspects; Telecommunication management; Key Performance Indicators (KPI) for UMTS and GSM (Release 9),” 3GPP TS 32.410, 2009.
- [110] “Age and sex: 2011 Census of Population, Households and Dwellings in the Republic of Serbia,” Statistical Office of the Republic of Serbia, Belgrade, Serbia, Dec. 2012. [Online]. Available: <http://pod2.stat.gov.rs/ObjavljenePublikacije/Popis2011/Starost%20i%20pol-Age%20and%20sex.pdf>
- [111] “Uпотреba informaciono-komunikacionih tehnologija u Republici Srbiji, 2015,” Statistical office of the Republic of Serbia, Belgrade, Serbia, Mar. 2015. [Online]. Available: <https://www.stat.gov.rs/en-US/oblasti/upotreba-ikt>.
- [112] R. N. Iyare, V. Volskiy, and G. Vandenbosch, “Study of the correlation between outdoor and indoor electromagnetic exposure near cellular base stations in Leuven, Belgium,” *Environ. Res.*, vol. 168, pp. 428-438, Jan. 2019, DOI: 10.1016/j.envres.2018.08.025.
- [113] “An Overview of the Telecom and Postal Services Market in the Republic of Serbia in 2014,” RATEL, Belgrade, Serbia, 2015. [Online]. Available: <https://www.ratel.rs/en/page/market-overviews>.

- [114] A. Ullah, Z. H. Abbas, G. Abbas, F. Muhammad, and L. Jiao, "Performance analysis of user-centric SBS deployment with load balancing in heterogeneous cellular networks: A Thomas cluster process approach," *Comput. Netw.*, vol. 170, Art. no. 107120, Apr. 2020, DOI: 10.1016/j.comnet.2020.107120.
- [115] D. Jovanovic, G. Bragard, D. Picard, and S. Chauvin, "Mobile telephones: A comparison of radiated power between 3G VoIP calls and 3G VoCS calls," *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 25(1): 80-83, 2015, DOI: 10.1038/jes.2014.74.
- [116] M. Koprivica, V. Slavković, M. Popović, J. Milinković, and A. Nešković, "Experimental analysis of duty factor for WLAN user devices," *23rd Telecommunications Forum Telfor (TELFOR)*, pp: 145–148, 2015, DOI: 10.1109/TELFOR.2015.7377435.
- [117] N. Ding, D. Wagner, X. Chen, A. Pathak, Y. Charlie Hu, and A. Rice, "Characterizing and Modeling the Impact of Wireless Signal Strength on Smartphone Battery Drain," *SIGMETRICS Perform Eval Rev.*, 41(1): 29–40, 2013, DOI:10.1145/2494232.2466586.
- [118] A. Boursianis, P. Vantias, and T. Samaras, "Measurements for assessing the exposure from 3G femtocells," *Radiat. Prot. Dosimetry*, vol. 150, no. 2, pp. 158–167, Jun. 2012, DOI:10.1093/rpd/ncr398.
- [119] S. Aerts, D. Plets, A. Thielens, L. Martens, and W. Joseph, "Impact of a Small Cell on the RF-EMF Exposure in a Train," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 12, no. 3, pp. 2639-2652, Mar. 2015, DOI: 10.3390/ijerph120302639.
- [120] K. Roser, A. Schoeni, B. Struchen, M. Zahner, M. Eeftens, J. Fröhlich, and M. Rössli, "Personal radiofrequency electromagnetic field exposure measurements in Swiss adolescents," *Environ. Int.*, vol. 99, pp. 303-314, Feb. 2017, DOI: 10.1016/j.envint.2016.12.008.
- [121] A. Ullah, Z. H. Abbas, F. Muhammad, G. Abbas, and L. Jiao, "Capacity driven small cell deployment in heterogeneous cellular networks: Outage probability and rate coverage analysis," *Trans. Emerg. Telecommun. Technol.*, vol. 31, no. 6, Jun. 2020, Article ID e3876, DOI: 10.1002/ett.3876.
- [122] T. Koppel, M. Ahonen, M. Carlberg, and L. Hardell, "Very high radiofrequency radiation at Skeppsbron in Stockholm, Sweden from mobile phone base station antennas positioned close to pedestrians' heads," *Environmental Research*, vol. 208, 2022, 112627, DOI: 10.1016/j.envres.2021.112627.
- [123] J. Shodamola, U. Masood, M. Manalastas and A. Imran, "A Machine Learning based Framework for KPI Maximization in Emerging Networks using Mobility Parameters," *2020 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom)*, 2020, pp. 1-6, DOI: 10.1109/BlackSeaCom48709.2020.9235020.
- [124] S. Sadetzki et al., "The MOBI-Kids Study Protocol: Challenges in Assessing Childhood and Adolescent Exposure to Electromagnetic Fields from Wireless Telecommunication Technologies and Possible Association with Brain Tumor Risk," *Front. Public Health*, vol. 2, Sep. 2014, Art. no. 124, DOI: 10.3389/fpubh.2014.00124.
- [125] A. Gupta, and R. K. Jha, "A Survey of 5G Network: Architecture and Emerging Technologies," *IEEE Access*, vol. 3, pp. 1206-1232, Jul. 2015, DOI: 10.1109/ACCESS.2015.2461602.

PRILOG 1

Notacije i simboli parametara i promenljivih

Parametar/promenljiva	Značenje	Vrednost/jedinica
P_{TX}	Predajna snaga	dBm
P_{RX}	Prijemna snaga	dBm
r	Pristupna radio tehnologija (RAT): GSM ili UMTS	GSM 900 MHz/ UMTS 2100 MHz
c	Sloj (mikro ili makro) – ćelije istog sloja	Mikro, Makro
$f_{r,c}$	Frakcije (procenti) korisnika povezanih sa RAT-om r i slojem c	%
T	Period posmatranja, period usrednjavanja	s
$\overline{SAR}_{actual} (area, population)$	Srednji stvarni SAR za populaciju u oblasti (SAR za celo telo)	W/kg
\overline{SAR}_{actual}	Srednji stvarni SAR za populaciju u oblasti (SAR za celo telo) – kraća notacija	W/kg
$\overline{SAR}_{actual}^{UL} (area, population)$	Srednji stvarni SAR za UL (izloženost u bliskom polju), usrednjen po populaciji u oblasti (SAR za celo telo)	W/kg
$\overline{SAR}_{actual}^{DL} (area, population)$	Srednji stvarni SAR za DL (izloženost u dalekom polju), usrednjen po populaciji u oblasti (SAR za celo telo)	W/kg
$\overline{SAR}_{actual}^{UL} (area, operator's users)$	Srednji stvarni SAR za UL (izloženost u bliskom polju), usrednjen po korisnicima operatora u oblasti	W/kg
$\overline{P}_{TX}^{r,c}$	Srednja predajna snaga korisničkih uređaja povezanih sa RAT-om r i slojem c	W
$\overline{TD}_{r,c,voice}^{UL}$	Srednje trajanje govorne komunikacije u UL preko RAT-a r i sloja c	s
$\overline{TD}_{r,c,data}^{UL}$	Srednje trajanje prenosa podataka u UL preko RAT-a r i sloja c	s
$\overline{SAR}_{r,voice}^{UL,norm}$	Normalizovana vrednost SAR (na 1 W predajne snage korisničkog uređaja) za izloženost u bliskom polju (komunikacija u <i>uplinku</i>) tokom trajanja govornog servisa preko RAT-a r tj. u odgovarajućem frekvencijskom opsegu	(W/kg)/1W

Parametar/promenljiva	Značenje	Vrednost/jedinica
$\overline{SAR}_{r,data}^{UL, norm}$	Normalizovana vrednost SAR (na 1 W predajne snage korisničkog uređaja) za izloženost u bliskom polju (komunikacija u <i>uplinku</i>) tokom trajanja servisa prenosa podataka preko RAT-a r tj. u odgovarajućem frekvencijskom opsegu	(W/kg)/1W
<i>share of users</i>	Udeo korisnika mobilnih servisa u ukupnoj populaciji	%
<i>operator share</i>	Tržišni udeo operatora po broju korisnika	%
$P_{TX1}^{r,c}, P_{TX2}^{r,c}, \dots, P_{TXn}^{r,c}$	Odbirci UE Tx power uzeti iz zadatih mrežnih izveštaja, sve ćelije RAT-a r i sloja c uzimaju se u obzir	W
$\overline{DF}^{r,c}$	Srednji faktor aktivnosti na radio interfejsu	%
p	Kategorija populacije	Odrasli, dete
e	Okruženje	U zatvorenom, na otvorenom
pos	Za proračun izloženosti u <i>uplinku</i> , stav tokom korišćenja (stojeći, sedeći) Za proračun izloženosti u <i>downlinku</i> , telesni stavovi koji odgovaraju različitim načinima korišćenja	UL: stojeći, sedeći DL: sedeći-govor-telefon, sedeći-podaci-telefon, sedeći-podaci-laptop-krilo, sedeći-podaci-laptop-sto, stojeći-govor-telefon i stojeći-podaci-telefon
u	Korišćenje – korisnički uređaj (telefon, laptop u krilu, laptop na stolu) i korišćeni servis (govor, podaci)	Govor – telefon Podaci – telefon Podaci – laptop – krilo Podaci – laptop – sto
<i>device</i>	Korisnički uređaj (telefon, laptop-krilo, laptop-sto)	Telefon Laptop u krilu Laptop na stolu
$f_{p,e,pos,device,voice}$	Udeo korisnika kategorije populacije p , u okruženju e , u stavu pos , koji koriste servis <i>voice</i> preko uređaja <i>device</i>	%
$SAR_{p,pos,voice,r}^{UL, norm}$	Vrednost SAR za UL, za populaciju kategorije p , telesni stav pos , kada koriste servis <i>voice</i> (uređaj blizu glave) preko RAT-a r u odgovarajućem frekvencijskom opsegu, normalizovana na 1W predajne snage korisničkog uređaja	(W/kg)/1W

Parametar/promenljiva	Značenje	Vrednost/jedinica
$f_{p,e,pos,device,data}$	Udeo korisnika kategorije populacije p , u okruženju e , u stavu pos , koji koriste servis $data$ preko uređaja $device$	%
$SAR_{p,pos,data,r}^{UL,norm}$	Vrednost SAR za UL, za populaciju kategorije p , telesni stav pos , kada koriste servis $data$ preko RAT-a r u odgovarajućem frekvencijskom opsegu, normalizovana na 1W predajne snage korisničkog uređaja	(W/kg)/1W
$\bar{S}_{RXinc,area}^r$	Srednja gustina snage incidentnog EM polja u oblasti	W/m ²
$f_{p,e,pos} \frac{TD_{p,e,pos}^{DL}}{T}$	Udeo populacije kategorije p u okruženju e sa stavom pos , pomnožen sa procentom vremena provedenog u ovom stavu u posmatranom periodu	%
$f_{p,e,pos}$	Udeo populacije kategorije p u okruženju e sa stavom pos	%
$TD_{p,e,pos}^{DL}$	Za populaciju kategorije p u okruženju e sa stavom pos , vreme provedeno u ovom stavu	s
$SAR_{p,pos,r}^{DL,norm}$	Vrednost SAR za DL, za populaciju kategorije p , stav pos , kada je izložena EM zračenju u određenom frekvencijskom opsegu RAT-a r , normalizovana na 1W/m ² gustine snage	(W/kg)/(1W/m ²)
\bar{E}_{zone}^r	Srednji intenzitet E polja u zoni $zone$ (1 ili 2) koje potiče od RAT-a r tj. u odgovarajućem frekvencijskom opsegu, na osnovu merenih vrednosti u n tačaka i faktora slabljenja u zatvorenom prostoru	V/m
$\bar{E}_{out,zone}^r$	Srednji intenzitet E polja, srednja vrednost odbiraka merenih na otvorenom u n tačaka zone $zone$ (1 ili 2)	V/m
$\bar{E}_{macro\ area}^r$	Srednji intenzitet E polja koje potiče od RAT-a r tj. u odgovarajućem frekvencijskom opsegu u makro oblasti	V/m
$\bar{E}_{micro\ area}^r$	Srednji intenzitet E polja koje potiče od RAT-a r tj. u odgovarajućem frekvencijskom opsegu u mikro oblasti	V/m
\bar{E}_{area}^r	Srednji intenzitet E polja koje potiče od RAT-a r tj. u odgovarajućem frekvencijskom opsegu u oblasti $area = (macro\ area, micro\ area)$	V/m
$zone1$	Zona pokrivanja mikroćelija	
$zone2$	Zona pokrivanja makroćelija kad je mikro sloj uključen, tj. bez zone pokrivanja mikroćelija	
$micro\ area$	Oblast pokrivanja sloja mikroćelija, odgovara $zone1$	

Parametar/promenljiva	Značenje	Vrednost/jedinica
<i>macro area</i>	Oblast pokrivanja sloja makročelija kad je mikro sloj isključen tj, celokupna oblast od interesa, odgovara $zone1+zone2$	
<i>Out</i>	Procenat populacije na otvorenom, procenjen na osnovu procenta korisnika na otvorenom	%
<i>AttFactor</i>	Faktor slabljenja za skaliranje vrednosti intenziteta E polja zabeleženih na otvorenom kako bi se dobila vrednost u zatvorenom	
<i>In</i>	Procenat populacije u zatvorenom, procenjen na osnovu procenta korisnika u zatvorenom	%
Z_0	Karakteristična impedansa slobodnog prostora, 376.73Ω	Ω
$f_{microcell}$	Procenat populacije u oblasti <i>zone1</i> procenjen na osnovu procenta korisnika u oblasti <i>zone1</i> koji je jednak procentu korisnika povezanih sa GSM i UMTS mikroćelijama	%
$f_{macrocell}$	Procenat populacije u oblasti <i>zone2</i> procenjen na osnovu procenta korisnika u oblasti <i>zone2</i> koji je jednak procentu korisnika povezanih sa GSM i UMTS makročelijama	%
$f_{GSM,microcell}$	Procenat korisnika povezanih sa GSM mikroćelijom	%
$f_{UMTS,microcell}$	Procenat korisnika povezanih sa UMTS mikroćelijom	%
$f_{GSM,macrocell}$	Procenat korisnika povezanih sa GSM makročelijom	%
$f_{UMTS,macrocell}$	Procenat korisnika povezanih sa UMTS makročelijom	%
$f_{GSM (micro area)}$	Procenat korisnika povezanih sa GSM mikroćelijom u odnosu na broj korisnika u mikro oblasti	%
$f_{UMTS (micro area)}$	Procenat korisnika povezanih sa UMTS mikroćelijom u odnosu na broj korisnika u mikro oblasti	%

PRILOG 2

Formulacija indeksa izloženosti (EI)

Matematička formulacija indeksa izloženosti (EI) [88][15] je sledeća:

$$EI^{SAR} = \frac{1}{T} \sum_t^{N_T} \sum_p^{N_P} \sum_e^{N_E} \sum_r^{N_R} \sum_c^{N_C} \sum_l^{N_L} \sum_{pos}^{N_{pos}} f_{t,p,e,r,l,c,pos} \left[\sum_u^{N_U} (d^{UL} \bar{P}_{TX}) + d^{DL} \bar{S}_{RXinc} + d^{DL,close\ devices} S_{RXinc}^{DL,close\ devices} \right] \left[\frac{W}{kg} \right]$$

$$EI^{SAR} = \frac{1}{T} \sum_t^{N_T} \sum_p^{N_P} \sum_e^{N_E} \sum_r^{N_R} \sum_c^{N_C} \sum_l^{N_L} \sum_{pos}^{N_{pos}} f_{t,p,e,r,c,l,pos} \left[\sum_u^{N_U} (d^{UL} \bar{P}_{TX}) + d^{DL} \bar{S}_{RXinc} + d^{DL,close\ devices} S_{RXinc}^{DL,close\ devices} \right], \left[\frac{W}{kg} \right],$$

gde je:

- EI^{SAR} vrednost indeksa izloženosti, srednja izloženost populacije unutar razmatrane geografske oblasti i u toku razmatranog vremenskog okvira T ; SAR se odnosi na SAR za celo telo, SAR za određeni organ ili lokalizovani SAR;
- N_T je broj razmatranih perioda unutar razmatranog vremenskog okvira (npr. jedan dan);
- N_P je broj razmatranih kategorija populacije;
- N_E je broj razmatranih okruženja;
- N_R je broj razmatranih pristupnih radio tehnologija;
- N_C je broj razmatranih tipova ćelija;
- N_L je broj razmatranih korisničkih profila (uključujući i one koji ne koriste mobilne tehnologije kao još jedan profil);
- N_{pos} je broj razmatranih telesnih stavova;
- N_U je broj različitih načina korišćenja sa različitim uređajima;
- \bar{P}_{TX} je srednja predajna (Tx) snaga koju emituju uređaji korisnika tokom perioda t , u režimu korišćenja u , povezani sa tehnologijom r , u okruženju e . Na primer, kad se EI računa korišćenjem simulacionih alata, snaga Tx može se prediktovati na mapi koja pokriva kompletnu razmatranu geografsku oblast i može se izvući srednja vrednost za evaluaciju EI.
- \bar{S}_{RXinc} je srednja gustina snage incidentne ljudskom telu tokom perioda t , indukovane od strane tehnologije r , u okruženju e . Raspodela gustine incidentne snage razmatra se za celu posmatranu oblast i srednja vrednost preko ove oblasti uzima se u obzir za evaluaciju EI.
- $S_{RXinc}^{DL,close\ devices}$ je gustina snage incidentne ljudskom telu tokom perioda t , koju indukuje bežični uređaj povezan preko tehnologije r korisnika u blizini, u okruženju e ;

- $d^{UL} \left[\frac{Ws}{kg} / W \right]$, $d^{DL} \left[\frac{Ws}{kg} / \frac{W}{m^2} \right]$, $d^{DL,close\ devices} \left[\frac{Ws}{kg} / \frac{W}{m^2} \right]$ su normalizovane vrednosti doze za UL, DL koji potiče od baznih stanica i pristupnih tačaka i DL od korisnika u blizini, respektivno, svi pomnoženi sa vremenom provedenim u konfiguraciji;
- $f_{t,p,e,r,c,l,pos}$ je frakcija ukupne populacije koja odgovara kategoriji populacije p , korisničkom profilu l , u telesnom stavu pos , povezanim sa RAT-om r , za ćelijski tip c , u okruženju e , tokom vremenskog perioda t .

Koeficijent d^{UL} povezan je sa izloženosti u *uplinku* i izražava se kao apsorbovana doza normalizovana na predajnu snagu od 1 W:

$$d^{UL} = \frac{TD_{t,p,e,r,c,l,pos,u}^{UL} SAR_{p,r,pos,u}^{UL}}{P_{TX}^{ref}}, \left[\frac{Ws}{kg} / W \right],$$

gde je:

- $TD_{t,p,e,r,c,l,pos,u}^{UL}$ [s] vremensko trajanje korišćenja u , sa korisničkim profilom l , tokom povezanosti preko RAT r , ćelijskog tipa c , u okruženju e , za kategoriju populacije p , u telesnom stavu pos , tokom vremenskog perioda t ;
- $SAR_{p,r,pos,u}^{UL} \left[\frac{W}{kg} \right]$ može biti SAR za celo telo ili SAR specifičan za organ ili tkivo, za korišćenje u i telesni stav pos , u frekvencijskom opsegu RAT-a r , za kategoriju populacije p , sračunat za incidentnu emitovanu snagu P_{TX}^{ref} [W] i normalizovan na ovu snagu.

Koeficijent d^{DL} povezan je sa izloženosti u *downlinku* i takođe se izražava kao apsorbovana doza normalizovana na gustinu incidentne snage od 1 W/m²:

$$d^{DL} = \frac{TD_{t,p,e,r,c,pos}^{DL} SAR_{p,r,pos}^{DL}}{S_{RXinc}^{ref}}, \left[\frac{Ws}{kg} / \frac{W}{m^2} \right],$$

gde je:

- $TD_{t,p,e,r,c,pos}^{DL}$ [s] vremensko trajanje telesnog stava pos , kada je korisnik povezan sa RAT-om r , ćelijskim tipom c , u okruženju e , za kategoriju populacije p , tokom vremenskog perioda t ;
- $SAR_{p,r,pos}^{DL} \left[\frac{W}{kg} \right]$ može biti SAR za celo telo ili SAR specifičan za organ ili tkivo, indukovano od bazne stanice ili pristupne tačke RAT-a r , za populaciju p , telesni stav pos , normalizovan na primljenu gustinu snage $S_{RXinc}^{ref} \left[\frac{W}{m^2} \right]$.

Biografija autora

Milica Popović Saković rođena je 1975. godine u Beogradu. Redovne studije završila je na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Bogradu, smer Telekomunikacije, 2002. godine, odbranom diplomskog rada „Konvertor iz AutoCAD-a u Linpar” kod mentora akademika prof. dr Antonija Đorđevića. Ostvarila je ukupan prosek ocena na studijama 8,76 (9,63 na poslednje dve godine studija) i ocenu 10 za diplomski rad. Poslediplomske studije završila je na Elektrotehničkom fakultetu, smer telekomunikacije, sa prosečnom ocenom 10. Magistarsku tezu „Uticaj M2M i OG saobraćaja na performanse HSPA mreže i kvalitet servisa“, kod mentora prof. dr Miroslava Dukića, odbranila je 2013. godine.

Od 2003. godine zaposlena je u kompaniji Telekom Srbija. Tokom profesionalne karijere radila je na poslovima planiranja i razvoja mreže, projektovanja, izgradnje, testiranja i prijema. Bila je angažovana, kao član ili koordinator tima, na uvođenju novih tehnologija i usluga u mrežu Telekom Srbija, kao i novih ili optimizovanih principa rada. Značajni projekti uključuju uvođenje tehnologija WLL i CDMA450 u mrežu, pilot projekat WiMAX, pripremu za proizvodnju DSL kablova sa domaćim fabrikama, pilot projekat multiservisnog pristupnog uređaja (MSAN), pilot projekat LTE, uvođenje CLL usluge, uvođenje LTE, pilot projekte all-IP transformacije, pilot projekat uvođenja optičke mreže (GPON) u postojeće objekte, kao i projekat all-IP transformacije mreže. Vodila je naučno-istraživački rad tima Telekoma Srbija na EU projektima LOLA i LEXNET, u okviru programa FP7. Učestvovala je u osmišljavanju i realizaciji društveno-odgovorne kampanje „Biraš kako komuniciraš“, pokrivajući stručne aspekte kampanje. Trenutno obavlja poslove Šefa Službe za operativnu podršku u Direkciji za tehniku.

Tečno govori engleski i francuski jezik i služi se italijanskim jezikom. Član je Inženjerske komore i poseduje licencu odgovornog projektanta telekomunikacionih mreža i sistema. Član je udruženja IEEE.

Njen stručni i naučni rad obuhvata objavljivanje radova u međunarodnim i domaćim časopisima, prezentaciju radova na domaćim i stranim konferencijama, predavanja stručnoj javnosti i studentima, učešće u izradi knjiga, recenzije radova. Autor je ili koautor 20 naučnih i stručnih radova, od kojih je 5 radova objavljeno u međunarodnim časopisima sa JCR liste, 2 rada u domaćim časopisima, 9 radova objavljeno je u zbornicima međunarodnih konferencija i 4 rada u zbornicima konferencija nacionalnog značaja. Učestvovala je kao koautor u izradi poglavlja u 3 stručne knjige međunarodnih izdavača.

Izjava o autorstvu

Ime i prezime autora Milica Popović Saković

Broj indeksa 5043/2017

Izjavljujem

da je doktorska disertacija pod naslovom

Određivanje uticaja arhitekture mobilne mreže na ukupnu izloženost stanovništva
elektromagnetskom polju

- rezultat sopstvenog istraživačkog rada;
- da disertacija u celini ni u delovima nije bila predložena za sticanje druge diplome prema studijskim programima drugih visokoškolskih ustanova;
- da su rezultati korektno navedeni i
- da nisam kršila autorska prava i koristila intelektualnu svojinu drugih lica.

Potpis autora

U Beogradu, 03.03.2022.

Milica Popović

Izjava o istovetnosti štampane i elektronske verzije doktorskog rada

Ime i prezime autora: Milica Popović Saković

Broj indeksa: 5043/2017

Studijski program: Elektrotehnika i računarstvo

Naslov rada: Određivanje uticaja arhitekture mobilne mreže
na ukupnu izloženost stanovništva elektromagnetskom polju

Mentor: doc. dr Mladen Koprivica

Izjavljujem da je štampana verzija mog doktorskog rada istovetna elektronskoj verziji koju sam predala radi pohranjivanja u **Digitalnom repozitorijumu Univerziteta u Beogradu**.

Dozvoljavam da se objave moji lični podaci vezani za dobijanje akademskog naziva doktora nauka, kao što su ime i prezime, godina i mesto rođenja i datum odbrane rada.

Ovi lični podaci mogu se objaviti na mrežnim stranicama digitalne biblioteke, u elektronskom katalogu i u publikacijama Univerziteta u Beogradu.

Potpis autora

U Beogradu, 03.03.2022.

Milica Saković

Izjava o korišćenju

Ovlašćujem Univerzitetsku biblioteku „Svetozar Marković“ da u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Beogradu unese moju doktorsku disertaciju pod naslovom:

Određivanje uticaja arhitekture mobilne mreže na ukupnu izloženost stanovništva

elektromagnetskom polju

koja je moje autorsko delo.

Disertaciju sa svim prilogima predala sam u elektronskom formatu pogodnom za trajno arhiviranje.

Moju doktorsku disertaciju pohranjenu u Digitalnom repozitorijumu Univerziteta u Beogradu i dostupnu u otvorenom pristupu mogu da koriste svi koji poštuju odredbe sadržane u odabranom tipu licence Kreativne zajednice (Creative Commons) za koju sam se odlučila.

1. Autorstvo (CC BY)
2. Autorstvo – nekomercijalno (CC BY-NC)
3. Autorstvo – nekomercijalno – bez prerada (CC BY-NC-ND)
4. Autorstvo – nekomercijalno – deliti pod istim uslovima (CC BY-NC-SA)
5. Autorstvo – bez prerada (CC BY-ND)
6. Autorstvo – deliti pod istim uslovima (CC BY-SA)

(Molimo da zaokružite samo jednu od šest ponuđenih licenci.
Kratak opis licenci je sastavni deo ove izjave.)

Potpis autora

U Beogradu, 03.03.2022.

M. Cakobuh

1. **Autorstvo.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence, čak i u komercijalne svrhe. Ovo je najslobodnija od svih licenci.

2. **Autorstvo – nekomercijalno.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela.

3. **Autorstvo – nekomercijalno – bez prerada.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, bez promena, preoblikovanja ili upotrebe dela u svom delu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela. U odnosu na sve ostale licence, ovom licencom se ograničava najveći obim prava korišćenja dela.

4. **Autorstvo – nekomercijalno – deliti pod istim uslovima.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela i prerada.

5. **Autorstvo – bez prerada.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, bez promena, preoblikovanja ili upotrebe dela u svom delu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu dela.

6. **Autorstvo – deliti pod istim uslovima.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu dela i prerada. Slična je softverskim licencama, odnosno licencama otvorenog koda.