

UNIVERZITET U BEOGRADU  
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET

Mladen T. Koprivica

**POVEĆANJE EFIKASNOSTI METODA  
ZA MERENJE INTENZITETA  
ELEKTRIČNOG POLJA U OKOLINI  
BAZNIH STANICA JAVNIH MOBILNIH  
SISTEMA**

doktorska disertacija

Beograd, 2016

UNIVERSITY OF BELGRADE  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING

Mladen T. Koprivica

**IMPROVING THE EFFICIENCY OF  
METHODS FOR MEASUREMENT OF  
ELECTRIC FIELD STRENGTH IN THE  
VICINITY OF PUBLIC MOBILE SYSTEM  
BASE STATIONS**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2016

## **PODACI O MENTORU I ČLANOVIMA KOMISIJE**

### ***Mentor:***

Dr Aleksandar Nešković, redovni profesor  
Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet

### ***Članovi komisije:***

Dr Nataša Nešković, vanredni profesor  
Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet

Dr Miloš Borenović, naučni saradnik  
TeleSign

Dr Irini Reljin, redovni profesor  
Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet

Dr Dragan Olćan, vanredni profesor  
Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet

Datum odbrane: \_\_\_\_\_

## POVEĆANJE EFIKASNOSTI METODA ZA MERENJE INTENZITETA ELEKTRIČNOG POLJA U OKOLINI BAZNIH STANICA JAVNIH MOBILNIH SISTEMA

### Rezime:

Rastući zahtevi korisnika za pristupačnim i visokokvalitetnim telekomunikacionim servisima doveli su do intenzivnog razvoja sistema i uređaja za bežične komunikacije. Zbog prostorne rasprostranjenosti naročito se ističu javni mobilni sistemi (GSM - *Global System for Mobile Communications*, DCS - *Digital Communication System*, UMTS - *Universal Mobile Telecommunication System*, LTE - *Long-Term Evolution*). Sa obzirom da ovi sistemi kao osnov za međusobnu komunikaciju koriste elektromagnetne talase, javlja se potreba za objektivnim sagledavanjem nivoa elektromagnetnog zračenja u životnom okruženju.

Da bi se uticaj elektromagnetnog zračenja na ljude kontrolisao, usvojene su norme kojima se ograničava izlaganje, iskazane kroz bazična ograničenja i izvedene referentne granične nivoe. U okviru ove disertacije dat je pregled bazičnih ograničenja i referentnih graničnih nivoa definisanih Pravilnikom o granicama izlaganja nejonizujućim zračenjima, ICNIRP (*International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection*) preporukom, FCC (*Federal Communications Commission*) preporukom, IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) standardom i ARPANSA (*Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency*) standardom. Da bi se ispitala usklađenost instalacije bazne stanice sa referentnim graničnim nivoima, sprovode se merenja intenziteta elektromagnetnog polja u okolini baznih stanica, korišćenjem metoda definisanih međunarodnim standardima. Ove metode se razvijaju i nadograđuju u skladu sa razvojem telekomunikacionih sistema, kao i poboljšanjima mernih uređaja.

Važan segment u razvoju ovih metoda, koji je posebno aktuelan u poslednje vreme, je određivanje merne nesigurnosti rezultata merenja. U ovoj disertaciji, predložena je praktična metoda za procenu merne nesigurnosti rezultata merenja intenziteta električnog polja, za slučajeve širokopoljarnog mernog sistema i frekvencijski selektivnog mernog sistema. Ova metoda bazirana je na zakonu propagacije

nesigurnosti i omogućava procenu kombinovane standardne merne nesigurnosti rezultata merenja, kao i proširene merne nesigurnosti sa intervalom poverenja od 95%.

Cilj ove disertacije bio je povećanje efikasnosti metoda za merenje intenziteta elektromagnetnog polja u okolini baznih stanica koje je ostvareno unapređenjima u nekoliko segmenata. U okviru disertacije, data je procedura za povećanje efikasnosti skraćivanjem intervala merenja (u odnosu na interval od 6min propisan standardima). Na osnovu rezultata merenja sprovedenih u okolini multisistemske bazne stanice, pokazano je da se usrednjavanjem u kraćim vremenskim intervalima od 1min, 30s i 15s mogu uspešno proceniti vrednosti dobijene standardnim postupkom, pri čemu se merni proces ubrzava približno 6, 12 i 24 puta, respektivno. Naravno, u ovim slučajevima u obzir mora biti uzeta dodatna standardna merna nesigurnost vrednosti 3.07%, 3.80% i 4.42% za intervale usrednjavanja 1min, 30s i 15s, respektivno. Kao što je pokazano, uprkos činjenici da su korišćeni intervali usrednjavanja kraći od zahtevanih 6min, predložena merna procedura obezbeđuje rezultate sa prihvatljivim gubitkom kvaliteta merenja.

U slučaju sistematskih merenja, često se koristi veliki broj pojednostavljenih mernih sistema koji koriste monoaksijalne antene. U disertaciji su sprovedena istovremena merenja intenziteta sve tri prostorne komponente električnog polja, za sedam različitih tipova okruženja, i na bazi ovih rezultata razvijen je model za konverziju rezultata merenja intenziteta jedne prostorne komponente električnog polja, u intenzitet koji se dobija izotropnim merenjima. Po ovom modelu, pri korišćenju monoaksijalne merne sonde za određivanje ukupnog intenziteta električnog polja, potrebno je primeniti dodatni mulitplikativni faktor konverzije vrednosti 1.95, i potrebno je uzeti u obzir dodatnu standardnu mernu nesigurnost vrednosti 33.07%.

Pored dobro poznatog kratkotrajnog fedinga, na promenljivost intenziteta elektromagnetnog polja baznih stanica, direktno utiču saobraćajno opterećenje, automatska kontrola snage i diskontinualna predaja. U okviru disertacije, sprovedena je analiza dugoročne promenljivosti intenziteta električnog polja, u vremenskom intervalu od 7 dana. Za potrebe analize, sprovedena su *band*-selektivna merenja u realnom mrežnom okruženju na 7 urbanih lokacija. Pored toga, određena je dodatna merna nesigurnost koja potiče od promenljivosti saobraćajnog opterećenja i funkcionalnosti predajnika, za različite intervale usrednjavanja: 10s, 30s, 1min, 6min, 15min, 30min, 1h,

3h, 5h i 10h. Rezultati pokazuju da se nesigurnost smanjuje sa povećanjem intervala usrednjavanja. Poređenjem opsega standardne merne nesigurnosti za različite sisteme, zaključeno je da su najveće vrednosti za UMTS sistem (4,69-14.69%), zatim GSM sistem (4.04-12.11%) i na kraju DCS sistem (2.71-7.92%).

Važan deo istraživanja u oblasti merenja intenziteta elektromagnetnog polja jesu i rezultati merenja sprovedenih u realnim okruženjima baznih stanica. U okviru disertacije, sprovedena je statistička analiza rezultata merenja intenziteta električnog polja na 664 različite lokacije baznih klasifikovane u tri osnovne kategorije: stubovi (316 lokacija), lokacije sa instalacijom na objektu (276 lokacija) i lokacije sa instalacijom unutar objekta (72 lokacije).

Rezultati merenja za kategoriju stubovi pokazuju da ni u jednom slučaju ukupni intenzitet električnog polja ne prelazi vrednost od 10V/m, što je znatno ispod referentnih graničnih nivoa propisanih ICNIRP preporukom, kao i referentnih graničnih nivoa propisanih Pravilnikom o granicama izlaganja nejonizujućim zračenjima.

Za kategoriju instalacije na objektu, u slučaju *outdoor* merenja, referentne granične vrednosti propisane ICNIRP preporukama prevaziđene u 2.5% lokacija, dok su vrednosti propisane Pravilnikom o granicama izlaganja nejonizujućim zračenjima, prevaziđene su u 15.6% lokacija. Treba istaći da su ove vrednosti izmerene na krovovima objekata, u zonama gde ljudi ne borave, i čak u većini slučajeva nemaju pristup. Sa druge strane, *indoor* ukupni intenzitet električnog polja nije prevazišao ICNIRP i Srpske referentne granične nivoe ni u jednom slučaju.

Na određenom broju lokacija *indoor* mikro baznih stanica, maksimalna vrednost intenziteta električnog polja, izmerena na horizontalnoj udaljenosti od 1m prevazilazi referentne granične vrednosti propisane ICNIRP preporukama i propisane Pravilnikom o granicama izlaganja nejonizujućim zračenjima. Apsolutna maksimalna vrednost prevazilazi Srpske referentne granične nivoe za približno 38% lokacija, i prevazilazi ICNIRP referentne granične za približno 7% lokacija.

Savremeni pristup u analizi izloženosti ljudi radio-frekvencijskim elektromagnetnim poljima podrazumeva određivanje ukupnog izlaganja ljudi, i to kombinovanjem izlaganja u *downlink*-u (koje potiče od baznih stanica i *access point*-a) i izlaganja u *uplink*-u (koje potiče od mobilnih korisničkih uređaja). U okviru disertacije razvijena je metoda za određivanje merne nesigurnosti nove metrike nazvane indeks

izloženosti, koja je definisana u okviru EU FP7 projekta LEXNET (*Low-EMF Exposure Future Networks*). Ova metoda daje analitički izraz za izračunavanje relativne standardne merne nesigurnosti indeksa izloženosti, na bazi poznatih standardnih mernih nesigurnosti brojnih ulaznih parametara. Pored toga, pokazano je da je funkcija gustine verovatnoće indeksa izloženosti približno normalna, za slučaj kada su ulazni parametri promenljive sa normalnom raspodelom i malim relativnim standardnim mernim nesigurnostima, što je najčešće slučaj u praksi.

**Ključne reči:** GSM/DCS/UMTS/LTE, bazna stanica javnog mobilnog sistema, nejonizujuće zračenje, izloženost ljudi, elektromagnetno polje, intenzitet električnog polja, merna nesigurnost, monoaksijalna antena, izotropna merenja, dugoročna promenljivost, indeks izloženosti

**Naučna oblast:** tehničke nauke, elektrotehnika

**Uža naučna oblast:** telekomunikacije

**UDK broj:** 621.3

## **IMPROVING THE EFFICIENCY OF METHODS FOR MEASUREMENT OF ELECTRIC FIELD STRENGTH IN THE VICINITY OF PUBLIC MOBILE SYSTEM BASE STATIONS**

### **Abstract:**

Increasing user demand for accessible and high quality telecommunication services has led to intensive development of systems and devices for wireless communications. Because of their wide distribution, public mobile systems (GSM - Global System for Mobile Communications, DCS - Digital Communication System, UMTS - Universal Mobile Telecommunication System, LTE - Long-Term Evolution) are the most important. Having in mind that these systems use electromagnetic waves as basis for the communication, there is a need for an objective assessment of the electromagnetic radiation level in the living environment.

To control the influence of electromagnetic radiation on people, norms that limit human exposure were adopted and stated as basic restrictions and reference levels. In this dissertation, an overview of basic restrictions and reference levels defined with Regulation on the limits of exposure to non-ionizing radiation, ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) guidelines, FCC (Federal Communications Commission) recommendation, IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) standard and ARPANSA (Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency) standard, is given. In order to evaluate compliance of base station with reference levels, measurement of electromagnetic field in the vicinity of base station should be conducted, using methods defined by the international standards. These methods are developed and upgraded in line with the development of telecommunication systems as well as with the improvements to the measuring devices.

An important part in the development of these methods, which is especially important in recent time, is evaluation of measurement result uncertainty. In the dissertation, practical procedure for evaluation of uncertainty of electric field strength measurements, for the cases of broadband and frequency selective measurement system, is developed. This procedure is based on the law of propagation of uncertainty, and



enables evaluation of combined standard measurement uncertainty as well as expanded measurement uncertainty with confidence interval of 95%.

The aim of this dissertation was improving the efficiency of methods for measurement of electric field strength in the vicinity of public mobile system base stations, which was achieved with improvements in several areas. In this dissertation, the procedure for improving the efficiency by using shorter time intervals of averaging (comparing to 6min that standards stipulate), is given. Based on the results of measurements conducted in the vicinity of multisystem base station, it was shown that the results can be estimated by using shorter time intervals of averaging 15s, 30s and 1min, and measurement process can be accelerated approximately by 6, 12 and 24 times, respectively. In these cases, additional standard measurement uncertainty of 3.07%, 3.80% and 4.42%, for the intervals of averaging 15s, 30s and 1min, should be taken into account. Shorter time-averaging intervals would reduce the total duration of the exposure assessment survey, while not compromising too much on measurement quality.

A number of simplified measuring systems with mono-axial probe is frequently used in the case of systematic measurements. In the dissertation, simultaneous measurements of all three spatial components of electric field strength were conducted, for seven different environment types. Based on these results, model for the conversion from mono-axial measurements to isotropic case, is developed. On the basis of values averaged for all seven chosen environments, it was concluded that the additional multiplicative conversion factor value of 1.95 should be applied and additional uncertainty in measurement results of 33.07% should be taken into account.

Besides the well-known short-term fading, variability of electric field strength of base stations directly depends on traffic load, automatic transmitter power control and discontinuous transmission. In this dissertation, long-term variability of electric field strength, in time interval of seven days, was conducted. For this analysis, band-selective measurements were carried out at 7 different locations in urban area. Furthermore, an additional traffic uncertainty caused by telecommunications traffic and transmitter functionalities for different time intervals of averaging: 10s, 30s, 1min, 6min, 15min, 30min, 1h, 3h, 5h and 10h, was calculated. The results show that uncertainty decreases with increasing of averaging interval. Comparing the uncertainty ranges corresponding

to different systems it can be concluded that the highest values are for the UMTS (4,69-14.69%), than GSM (4.04-12.11%) and finally DCS (2.71-7.92%).

An important part of research in the field of measurement of electromagnetic radiation, are the results of measurements carried out in realistic base stations environments. In this dissertation, statistical analysis of electric field strength in the vicinity of base stations for 664 different location was performed. Depending on how the antenna systems were installed, the base station locations were classified into three basic categories: masts (316 locations), locations with installations on buildings (276 locations) and indoor (72 locations).

The measurement results showed that the electromagnetic field strength in the vicinity of base station antenna systems installed on the masts did not exceed in any case the ICNIRP or Serbian national reference levels. Precisely, the results, with a maximum value lower than 10V/m for electric field strength, were significantly below the reference levels.

Measurement results for the locations with antenna installations on buildings showed that the maximum recorded value of total electric field strength has exceeded ICNIRP general public exposure reference levels at 2.5% of all locations and Serbian national reference levels at 15.6% of all locations. It should be emphasized that the values exceeding the reference levels were observed only outdoor, while in indoor the total electric field strength in no case exceeded defined reference levels.

The results of measurement campaign for indoor microcell base station locations showed that at certain number of analyzed locations the intensity of electromagnetic exposure exceeded both Serbian national (at 38% of locations) and ICNIRP (7% of locations) reference levels. At these locations, the maximum values of electric field strength were recorded within the horizontal distance of 1 m from antenna installations.

Modern approach in the assessment of human exposure to radio-frequency electromagnetic fields is based on the total human exposure, determined by combining downlink exposure (exposure originating from base stations and access points) and uplink exposure (exposure originating from wireless user devices). In this dissertation, the procedure for evaluation of uncertainty of a novel metric named Exposure Index (defined by EU FP7 project LEXNET - Low-EMF Exposure Future Networks), was developed. The developed procedure gives analytical expression for the calculation of

Exposure Index uncertainty, based on the known uncertainties of a number of input parameters. Moreover, it was shown that the probability distribution function of the Exposure Index can be considered as normal, in the case that all input parameters of the Exposure Index are normally distributed with small uncertainties, which is usually the case in reality.

**Keywords:** GSM/DCS/UMTS/LTE, public mobile system base station, non-ionizing radiation, human exposure, electromagnetic field, electric field strength, measurement uncertainty, mono-axial antenna, isotropic measurements, long-term variability, exposure index

**Scientific area:** technical sciences, electrical engineering

**Specific scientific area:** telecommunications

**UDK number:** 621.3

## SADRŽAJ

UVOD.....	1
1. PREGLED DEFINISANIH NORMI KOJIMA SE OGRANIČAVA IZLAGANJE LJUDI ELEKTROMAGNETNIM POLJIMA .....	5
1.1 Norme definisane Pravilnikom o granicama izlaganja nejonizujućim zračenjima u zonama povećane osetljivosti .....	8
1.2 Norme za opštu ljudsku populaciju definisane ICNIRP preporukom.....	11
1.3 Norme za tehničko osoblje definisane ICNIRP preporukom.....	13
1.4 Norme za opštu ljudsku populaciju definisane FCC preporukom .....	15
1.5 Norme za tehničko osoblje definisane FCC preporukom .....	15
1.6 Norme za opštu ljudsku populaciju definisane IEEE standardom .....	16
1.7 Norme za tehničko osoblje definisane IEEE standardom .....	17
1.8 Norme za opštu ljudsku populaciju definisane ARPANSA standardom.....	18
1.9 Norme za tehničko osoblje definisane ARPANSA standardom.....	19
1.10 Norme za istovremeni uticaj više izvora elektromagnetnog zračenja.....	20
2. METODE ZA MERENJE INTENZITETA ELEKTRIČNOG POLJA U OKOLINI BAZNIH STANICA.....	21
2.1 Širokopolasna merenja.....	25
2.2 Frekvencijski selektivna merenja.....	26
3. PROCENA MERNE NESIGURNOSTI REZULTATA MERENJA INTENZITETA ELEKTRIČNOG POLJA .....	31
3.1 Procena merne nesigurnosti za slučaj širokopolasnog mernog sistema.....	36
3.2 Procena merne nesigurnosti za slučaj frekvencijski selektivnog mernog sistema.....	46
3.3 Proračun merne nesigurnosti ukupnog intenziteta električnog polja u slučaju selektivnog merenja pojedinih sistema .....	55
3.4 Proračun merne nesigurnosti ukupnog faktora izloženosti u slučaju selektivnog merenja pojedinih sistema .....	56
4. POVEĆANJE EFIKASNOSTI METODA ZA MERENJE INTENZITETA ELEKTRIČNOG POLJA SKRAĆIVANJEM INTERVALA USREDNJAVANJA .....	58
4.1 Promenljivost elektromagnetnog polja koje potiče od baznih stanica .....	60
4.2 Merna metodologija.....	61
4.3 Promenljivost 6-minutnih srednjih vrednosti intenziteta električnog polja .....	63
4.4 Procedura skraćivanja intervala usrednjavanja .....	65
4.5 Zaključak .....	70

5. KONVERZIJA REZULTATA MERENJA INTENZITETA JEDNE PROSTORNE KOMPONENTE ELEKTRIČNOG POLJA U INTENZITET KOJI SE DOBIJA IZOTROPNIM MERENJIMA .....	72
5.1 Depolarizacija radio-frekvencijskih elektromagnetnih talasa .....	73
5.2 Merni sistem i merna metodologija .....	74
5.3 Merni scenariji .....	76
5.4 Određivanje faktora konverzije i dodatne merne nesigurnosti izazvane korišćenjem monoaksijalne merne sonde .....	78
5.5 Rezultati merenja .....	79
5.6 Zaključak .....	84
6. EKSPERIMENTALNA ANALIZA DUGOROČNE PROMENLJIVOSTI INTENZITETA ELEKTRIČNOG POLJA .....	87
6.1 Merni sistem i merna metodologija .....	88
6.2 Rezultati merenja .....	88
6.3 Merna nesigurnost koja potiče od promenljivosti saobraćajnog opterećenja i funkcionalnosti predajnika .....	95
6.4 Zaključak .....	101
7. STATISTIČKA ANALIZA REZULTATA MERENJA INTENZITETA ELEKTRIČNOG POLJA U OKOLINI BAZNIH STANICA .....	104
7.1 Merna metodologija i merni sistem .....	108
7.2 Klasifikacija lokacija baznih stanica .....	109
7.3 Statistička analiza rezultata merenja intenziteta električnog polja u okolini baznih stanica instaliranih na antenskom stubu .....	113
7.4 Statistička analiza rezultata merenja intenziteta električnog polja u okolini baznih stanica instaliranih na objektu .....	118
7.5 Statistička analiza rezultata merenja intenziteta električnog polja u okolini baznih stanica instaliranih unutar objekta .....	122
7.6 Zaključak .....	127
8. SAVREMENI TRENDOVI U ODREĐIVANJU IZLOŽENOSTI LJUDI ELEKTROMAGNETNIM POLJIMA .....	130
8.1 Definicija EI-a .....	132
8.2 Različiti pristupi za procenu merne nesigurnosti EI-a .....	135
8.3 Aritmetički izrazi za propagaciju merne nesigurnosti .....	136
8.4 Analitički pristup za određivanje merne nesigurnosti EI-a .....	137
8.5 Procena funkcije gustine verovatnoće EI-a .....	138
8.6 Zaključak .....	142

9. ZAKLJUČAK.....	143
LITERATURA.....	149
PRILOG A - Konverzija rezultata merenja intenziteta jedne prostorne komponente električnog polja u intenzitet koji se dobija izotropnim merenjima - Rezultati merenja za scenarije 2 do 7.....	160
BIOGRAFIJA AUTORA	
PRILOG 1 - Izjava o autorstvu	
PRILOG 2 - Izjava o istovetnosti štampane i elektronske verzije doktorskog rada	
PRILOG 3 - Izjava o korišćenju	

## UVOD

Intenzivan razvoj sistema i uređaja za bežične komunikacije obeležio je prethodnu deceniju. Zbog prostorne rasprostranjenosti naročito se ističu javni mobilni sistemi (GSM - *Global System for Mobile Communications*, DCS - *Digital Communication System*, UMTS - *Universal Mobile Telecommunication System*, LTE - *Long-Term Evolution*). Kao i ostali bežični sistemi, javni mobilni sistemi kao osnovu za međusobnu komunikaciju koriste emisiju elektromagnetnih talasa. Posledica toga je porast nivoa elektromagnetnog zračenja u životnom okruženju. Generalno, kod stanovništva postoji strah od efekata ovog zračenja. Sa druge strane, mobilni sistemi su danas nezamenljiv deo savremenog života i ne mogu se jednostavno ukloniti ili zameniti. Iz tih razloga, od velike važnosti je potreba za objektivnim sagledavanjem nivoa elektromagnetnog zračenja u životnom okruženju.

Da bi se kontrolisao uticaj elektromagnetnog zračenja na ljude, u okviru međunarodnih standarda, kao i u domaćoj regulativi, definisane su norme kojima se ograničava izlaganje elektromagnetnim poljima koja potiču od telekomunikacionih uređaja. Ovim normama definisane su granice, iskazane kroz bazična ograničenja i izvedeni referentni granični nivoi, preko kojih ljudi ne smeju biti izloženi elektromagnetnim poljima. Da bi se u praksi proverilo da li je ispoštovan ovaj uslov sprovode se merenja, a ponekad i proračuni, intenziteta elektromagnetnog polja u okolini baznih stanica javnih mobilnih sistema.

Metode koje se koriste za merenje intenziteta elektromagnetnog polja u okolini baznih stanica definisane su međunarodnim standardima, i one se razvijaju i nadograđuju u skladu sa razvojem telekomunikacionih sistema, kao i poboljšanjima mernih uređaja. Jedan segment u razvoju ovih metoda, koji je posebno aktuelan u poslednje vreme, je određivanje merne nesigurnosti rezultata merenja.

Cilj ove disertacije bio je povećanje efikasnosti metoda za merenje intenziteta elektromagnetnog polja u okolini baznih stanica, koje se može postići unapređenjima u

nekoliko segmenata. Sa jedne strane, proces merenja intenziteta električnog polja na lokaciji bazne stanice treba da bude sproveden u relativno kratkom vremenu, da bi se postigla ekonomska isplativost i da bi se uznemiravanje ljudi koji žive na lokaciji svelo na minimum. Sa druge strane, standardima se zahteva merenje srednje vrednosti u definisanom periodu od 6min na svakoj mernoj poziciji. Predmet disertacije bilo je skraćivanje vremena merenja srednje vrednosti, što znatno ubrzava postupak i omogućava da se ispoštuju navedeni zahtevi, kao i da se sprovedu sveobuhvatnija merenja. Naime, sa kraćim merenjem na jednoj mernoj poziciji, moguće je obuhvatiti veći broj mernih pozicija po lokaciji.

U slučaju sistematskih merenja intenziteta električnog polja koja se sprovode u većim oblastima, često se koristi veliki broj pojednostavljenih mernih sistema ili pojednostavljenih verzija ekspozimetara, koji zbog jednostavnije realizacije i niže cene koriste monoaksijalne antene, pomoću kojih se meri samo jedna prostorna komponenta električnog polja. S obzirom da definisane metode podrazumevaju izotropna merenja, cilj ovog istraživanja je bio razvoj modela za konverziju rezultata merenja intenziteta jedne prostorne komponente električnog polja u intenzitet koji se dobija izotropnim merenjima. Ovo je od posebnog značaja s obzirom da je uočeno da se primenom monoaksijalne antene dobijaju manje vrednosti intenziteta električnog polja, od realno očekivanih.

Pored dobro poznatog kratkotrajnog fedinga, koji generalno karakteriše propagaciju elektromagnetnih talasa, nekoliko dodatnih efekata mogu imati značajan uticaj na promenljivost intenziteta elektromagnetnog polja koje potiče od baznih stanica. Najznačajniji efekti koji su posledica telekomunikacionih protokola i koji direktno utiču na predajnu snagu baznih stanica su saobraćajno opterećenje, automatska kontrola snage i diskontinualna predaja. Da bi se utvrdilo da li su ispoštovane norme, potrebno je odrediti maksimalnu vrednost intenziteta električnog polja. Analiza dugoročne promenljivosti intenziteta električnog polja baznih stanica u vremenskom intervalu od 7 dana, bila je, takođe, predmet ove disertacije.

Od posebnog značaja za primenu rešenja za povećanje efikasnosti metoda za merenje intenziteta električnog polja u okolini baznih stanica jeste sprovođenje analize kako i koliko predložena rešenja utiču na mernu nesigurnost rezultata merenja, što je takođe bio cilj ove disertacije.



Pored unapređenja metoda koje se koriste, važan deo istraživanja u oblasti merenja intenziteta elektromagnetnog polja jesu i rezultati merenja sprovedenih u realnim okruženjima baznih stanica. U okviru ove disertacije, cilj je bio da se sprovede statistička analiza rezultata merenja intenziteta električnog polja u okolini baznih stanica, i to za tri različite kategorije lokacija baznih stanica: instalacija na antenskom stubu, instalacija na objektu i instalacija unutar objekta.

Savremeni pristup u analizi izloženosti ljudi radio-frekvencijskim elektromagnetnim poljima podrazumeva određivanje ukupnog izlaganja ljudi, i to kombinovanjem izlaganja u koje potiče od baznih stanica i izlaganja koje potiče od mobilnih korisničkih uređaja. U okviru disertacije predstavljena je nova metrika nazvana indeks izloženosti, definisana u okviru EU FP7 projekta LEXNET (*Low-EMF Exposure Future Networks*), koja omogućava određivanje srednje izloženosti ljudske populacije koja potiče od mobilne mreže u analiziranom geografskom području. Cilj disertacije je bio razvoj metode za određivanje merne nesigurnosti indeksa izloženosti, na bazi poznatih mernih nesigurnosti brojnih ulaznih parametara.

Pored uvodnog dela, disertacija se sastoji od još devet poglavlja. U prvom poglavlju, sprovedena je bibliografska analiza i dat pregled definisanih normi kojima se ograničava izlaganje ljudi elektromagnetnim poljima baznih stanica. Metode koje se koriste za merenje intenziteta elektromagnetnog polja, definisane međunarodnim standardima, predstavljene su u drugom poglavlju. U okviru trećeg poglavlja obrađene su pojedinačne komponente merne nesigurnosti i definisana metoda za procenu kombinovane merne nesigurnosti rezultata merenja. Četvrto poglavlje obuhvata eksperimentalnu analizu postupka povećanja efikasnosti skraćivanjem vremena usrednjavanja, sprovedenu merenjima u okolini multisistemske bazne stanice u urbanom okruženju. Razvijeni model za konverziju rezultata merenja intenziteta jedne prostorne komponente električnog polja u intenzitet koji se dobija izotropnim merenjima, baziran na eksperimentalnim merenjima tri prostorne komponente u sedam standardnih okruženja, predstavlja peto poglavlje. U šestom poglavlju sprovedena je eksperimentalna analiza promenljivosti intenziteta električnog polja u definisanim vremenskim intervalima na sedam urbanih lokacija. Statistička analiza rezultata merenja sa 664 lokacije baznih stanica, za tri različite kategorije lokacija baznih stanica, sprovedena je u sedmom poglavlju. U osmom poglavlju, predstavljena je nova metrika

za analizu izloženosti ljudi radio-frekvencijskim elektromagnetnim poljima nazvana indeks izloženosti, i razvijena je analitička metoda za određivanje merne nesigurnosti ove metrike. Zaključna razmatranja izložena su u završnom devetom poglavlju.

## **1. PREGLED DEFINISANIH NORMI KOJIMA SE OGRANIČAVA IZLAGANJE LJUDI ELEKTROMAGNETNIM POLJIMA**

Radio-frekvencijsko elektromagnetno zračenje spada u grupu tzv. nejonizujućih zračenja. Potrebno je istaći razliku između nejonizujućih zračenja i jonizujućih zračenja, sa obzirom da su efekti koje imaju ova dva tipa zračenja potpuno različiti, ali se zbog korišćenja termina “zračenje” često dovode u vezu. Nejonizujuća zračenja su elektromagnetna zračenja koja imaju energiju fotona manju od 12,4eV, i ne mogu da jonizuju atome i molekule. Grupi nejonizujućih zračenja, pored radio-frekvencijskog elektromagnetnog zračenja, pripadaju i vidljiva, ultraljubičasta i infracrvena svetlost, kao i električna i magnetna polja niskih frekvencija. Sa druge strane, grupi jonizujućih zračenja pripada X-zračenje i zračenje radioaktivnih materija. Za razliku od nejonizujućih zračenja, jonizujuća zračenja mogu da proizvedu jone i prouzrokuju štetne efekte po život i zdravlje ljudi, kao i po životnu sredinu.

Povećana koncentracija elektromagnetne energije u opsegu radio-frekvencija na ljudima izaziva efekte koji se grubo mogu klasifikovati u dve osnovne kategorije [1]-[15]: toplotni (termički) efekat i stimulatívni efekat. Toplotni efekat se ogleda u promeni temperature dela tela izloženog povećanoj koncentraciji elektromagnetne emisije (tkivo se zagreva). Treba primetiti da je ovaj efekat izraženiji u onim delovima tela u kojima postoji manja gustina krvnih sudova. Razlog je vrlo jednostavan. Krvni sudovi su regulatori telesne temperature. Pri višoj spoljnoj temperaturi krvni sudovi se šire i na taj način predaju veću količinu toplote spoljašnjem okruženju. Sa druge strane, pri nižim spoljnim temperaturama krvni sudovi se skupljaju i na taj način se manja količina energije predaje spoljašnjem okruženju. Toplotni efekat zavisi od parametara incidentnog elektromagnetnog polja (frekvencija, intenzitet, polarizacija, bliska/daleka zona izlaganja), karakteristika tela koje je izloženo (veličina, interna i eksterna geometrija, dielektrična svojstva različitih tkiva) i reflektujućih efekata drugih objekata u bliskoj zoni tela koje je izloženo [1].

Stimulativni efekat je kratkoročni efekat koji se javlja u frekventijskom opsegu do približno 100kHz, a ogleda se u pojavi nadražaja nervnih i mišićnih ćelija [1], što u izvesnim situacijama može izazvati veću razdražljivost i umor, naročito pri dužoj ekspoziciji velikoj koncentraciji elektromagnetne energije.

Elektromagnetno zračenje baznih stanica javnih mobilnih sistema spada u radio-frekvencijsko elektromagnetno zračenje. Sa obzirom da javni mobilni sistemi obavljaju svoju funkciju u radio-frekvencijskim opsezima 900/1800/2100MHz (trenutno u Srbiji GSM sistem u opsegu 900/1800MHz, UMTS sistem u opsegu 2100MHz, a LTE sistem u opsegu 1800MHz), dominantan efekat elektromagnetnog zračenja u ovom frekventijskom domenu je toplotni efekat.

Da bi se uticaj elektromagnetnog zračenja na ljude kontrolisao i sveo na što manju meru, donesene su norme kojima se ograničava izlaganje ljudi elektromagnetnom zračenju. Ovim normama definisane su granice, iskazane kroz bazična ograničenja i izvedene referentne granične nivoe, preko kojih ljudi ne smeju biti izloženi elektromagnetnim poljima. Dozvoljene vrednosti elektromagnetnih emisija ustanovljene su na osnovu obimnih istraživanja sprovedenih poslednjih tridesetak godina [16]. Ustanovljene granične vrednosti za radio-frekvencijsko elektromagnetno zračenje zasnovane su uglavnom na istraživanjima uticaja toplotnog i stimulativnog efekta na ljudsko telo. Treba primetiti da su postavljene granice znatno ispod onih vrednosti intenziteta elektromagnetnog polja za koje su uočeni eventualni negativni efekti. Poslednjih godina se vodi veliki broj diskusija oko toga da li ima i drugih efekata koji mogu negativno uticati na ljudsko telo. Međutim, do danas pravih dokaza za takve stavove nema. Intenzivna istraživanja u ovom pravcu će se nastaviti i u budućnosti.

Postoji izvestan broj organizacija koje su donele norme u oblasti nejonizujućih zračenja, kao što su ICNIRP (*International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection*) [1], ARPANSA (*Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency*) [17], FCC (*Federal Communications Commission*) [18] i IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) [19]-[21]. Najveći broj zemalja EU prihvatio je ICNIRP preporuke [1]. Pored toga, Svetska zdravstvena organizacija (WHO - *World Health Organization*) koristi ICNIRP preporuke kao osnovu za harmonizaciju nacionalnih standarda na globalnom nivou [22]. Ipak, treba istaći da je određen broj

zemalja, među kojima je i Srbija, doneo norme koje su strožije od onih definisanih ICNIRP preporukama.

Generalno, postoje dve različite grupe normi kojima se ograničava izlaganje ljudi elektromagnetnom zračenju: norme za opštu ljudsku populaciju i norme za tehničko osoblje. Norme za opštu ljudsku populaciju su znatno strožije od normi za tehničko osoblje. Razlog ovome je činjenica da tehničko osoblje treba da zna i mora da poštuje procedure kojima se vrši njihova dodatna zaštita od uticaja elektromagnetnog zračenja.

U Srbiji, oblast nejonizujućih zračenja uređena je Zakonom o zaštiti od nejonizujućih zračenja [23] i grupom pravilnika koji pripadaju ovom zakonu [24]-[29]. Zakon o zaštiti od nejonizujućih zračenja [23] i Pravilnik o granicama izlaganja nejonizujućim zračenjima [24], propisuju granice izlaganja elektromagnetnom zračenju u zonama povećane osetljivosti. Pod zonama povećane osetljivosti smatraju se područja stambenih zona u kojima se ljudi mogu zadržavati i 24 sata dnevno, škole, domovi, predškolske ustanove, porodilišta, bolnice, turistički objekti, dečja igrališta, površine neizgrađenih parcela namenjenih, prema urbanističkom planu, za navedene namene, u skladu sa preporukama Svetske zdravstvene organizacije. Pored toga, serija srpskih standarda usvojenih 2008. godine [30]-[36], oslanja se na preporuku Saveta Evrope 1999/519/EC od 12. jula 1999. godine [37], i kao norme uzima one koje su definisane ICNIRP preporukom. Iz tog razloga, norme definisane ICNIRP preporukom su važeće norme u Srbiji za slučajeve izvan zona povećane osetljivosti.

Kao što je to već rečeno, normama se definišu granice iskazane kroz bazična ograničenja i izvedene referentne granične nivoe, preko kojih ljudi ne smeju biti izloženi elektromagnetnim poljima. Bazična ograničenja izlaganja ljudi su ograničenja koja su zasnovana neposredno na utvrđenim zdravstvenim efektima i biološkim pokazateljima. S obzirom da merenje fizičke veličine kojom se iskazuje bazično ograničenje najčešće nije jednostavno, definišu se referentni granični nivoi za fizičke veličine koje je jednostavnije izmeriti. Referentni granični nivoi služe za praktičnu procenu izloženosti, kako bi se odredilo da li su bazična ograničenja zadovoljena. Ako su zadovoljena ograničenja definisana referentnim graničnim nivoima, onda su zadovoljena i ograničenja definisana bazičnim ograničenjem, dok obrnuto ne mora da važi.

Uzimajući u obzir da je za slučaj elektromagnetnog zračenja baznih stanica javnih mobilnih sistema dominantan toplotni efekat, bazično ograničenje iskazuje se preko specifične brzine apsorpcije energije SAR (*Specific Energy Absorption Rate*), i to za: SAR usrednjen za celo telo  $SAR_{wb}$  (*Whole-Body Average SAR*), SAR lokalizovan na glavu i trup  $SAR_{h\&t}$  (*Localized SAR - Head and Trunk*) i SAR lokalizovan na ekstremitete  $SAR_l$  (*Localized SAR - Limbs*). Izvedeni referentni granični nivoi iskazani su preko intenziteta električnog polja  $E$ , intenziteta magnetnog polja  $H$  i gustine snage  $S$ .

U nastavku je dat pregled bazičnih ograničenja i referentnih graničnih nivoa za slučajevne normi definisanih: Pravilnikom o granicama izlaganja nejonizujućim zračenjima [24], ICNIRP preporukom [1], FCC preporukom [18], IEEE standardom [19] i ARPANSA standardom [17]. Sa obzirom na činjenicu da se u praksi za merenja intenziteta elektromagnetnog zračenja najčešće koriste uređaji koji mere intenzitet električnog polja, posebno su istaknuti referentni granični nivoi intenziteta električnog polja. Nakon toga, date su norme za istovremeni uticaj više izvora elektromagnetnog zračenja.

### 1.1 Norme definisane Pravilnikom o granicama izlaganja nejonizujućim zračenjima u zonama povećane osetljivosti

Bazična ograničenja i referentni granični nivoi definisani Pravilnikom o granicama izlaganja nejonizujućim zračenjima u zonama povećane osetljivosti [24] dati su u tabelama 1.1 i 1.2, respektivno. U tabeli 1.3, date su vrednosti referentnih graničnih nivoa za frekvencijske opsege 900MHz, 1800MHz i 2100MHz, i to za vremenski period usrednjavanja od 6min. Na osnovu tabele 1.2 dat je prikaz frekvencijske zavisnosti referentnog graničnog intenziteta električnog polja na slikama 1.1 (frekvencijski opseg 100kHz–10MHz) i 1.2 (frekvencijski opseg 10MHz – 18GHz).

**Tabela 1.1** Bazična ograničenja - Pravilnik o granicama izlaganja nejonizujućim zračenjima u zonama povećane osetljivosti [24]

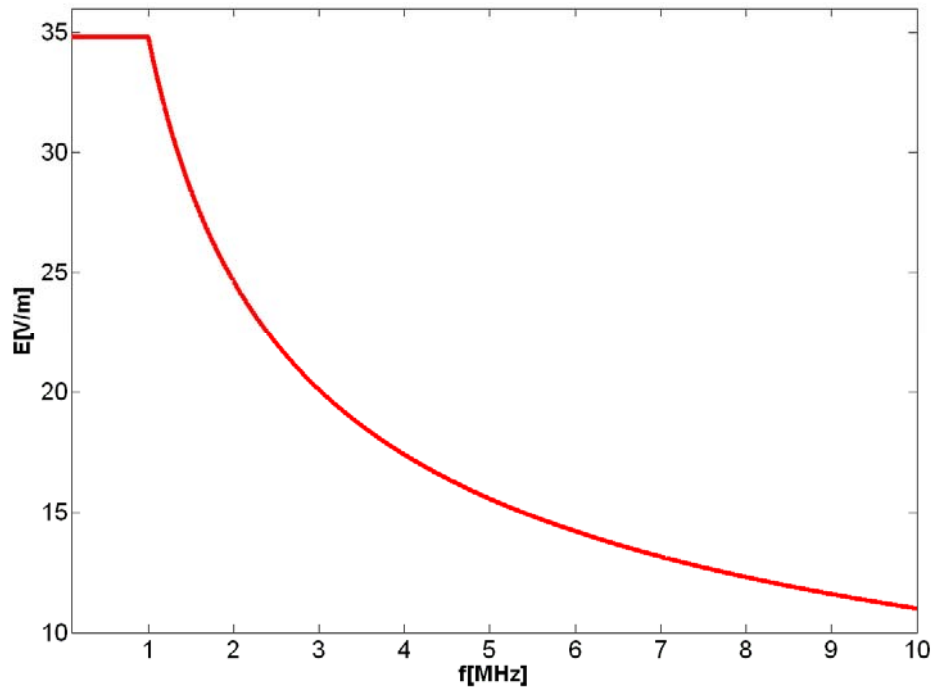
Frekvencija $f$	SAR usrednjen za celo telo $SAR_{wb}$ [W/kg]	SAR lokalizovan na glavu i trup $SAR_{h\&t}$ [W/kg]	SAR lokalizovan na ekstremitete $SAR_l$ [W/kg]
100kHz -10GHz	0.08	2	4

**Tabela 1.2** Referentni granični nivoi - Pravilnik o granicama izlaganja nejonizujućim zračenjima u zonama povećane osetljivosti [24]

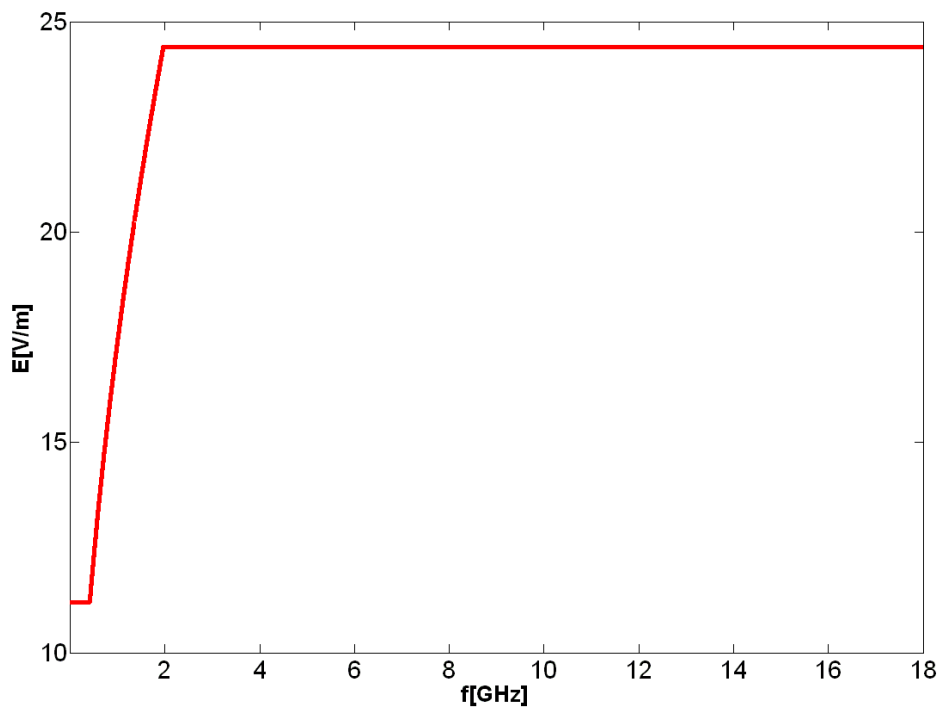
Frekvencija $f$	Intenzitet električnog polja $E$ [V/m]	Intenzitet magnetnog polja $H$ [A/m]	Gustina snage $S$ [W/m <sup>2</sup> ]
do 1Hz	5600	12800	-
1-8Hz	4000	$12800/f^2$	-
8-25Hz	4000	$1600/f$	-
0.025-0.8kHz	$100/f$	$1.6/f$	-
0.8-3kHz	$100/f$	2	-
3-150kHz	34.8	2	-
0.15-1MHz	34.8	$0.292/f$	-
1-10MHz	$34.8/f^{1/2}$	$0.292/f$	-
10-400MHz	11.2	0.0292	0.326
400-2000MHz	$0.55f^{1/2}$	$0.00148f^{1/2}$	$f/1250$
2-300GHz	24.4	0.064	1.6

**Tabela 1.3** Vrednosti referentnih graničnih nivoa za frekventijske opsege 900MHz, 1800MHz i 2100MHz - Pravilnik o granicama izlaganja nejonizujućim zračenjima u zonama povećane osetljivosti [24]

Frekvencija $f$	900MHz	1800MHz	2100MHz
Intenzitet električnog polja $E$	16.5V/m	23.3V/m	24.4V/m
Intenzitet magnetnog polja $H$	0.044A/m	0.063A/m	0.064A/m
Gustina snage $S$	0.7W/m <sup>2</sup>	1.4W/m <sup>2</sup>	1.6W/m <sup>2</sup>



**Slika 1.1** Referentni granični intenzitet električnog polja u zavisnosti od frekvencije (100kHz–10MHz) - Pravilnik o granicama izlaganja nejonizujućim zračenjima [24]



**Slika 1.2** Referentni granični intenzitet električnog polja u zavisnosti od frekvencije (10MHz–18GHz) - Pravilnik o granicama izlaganja nejonizujućim zračenjima [24]



## 1.2 Norme za opštu ljudsku populaciju definisane ICNIRP preporukom

Bazična ograničenja i referentni granični nivoi za opštu ljudsku populaciju definisani ICNIRP preporukom [1] dati su u tabelama 1.4 i 1.5, respektivno. U tabeli 1.6, date su vrednosti referentnih graničnih nivoa za frekvencijske opsege 900MHz, 1800MHz i 2100MHz, i to za vremenski period usrednjavanja od 6min. Na osnovu tabele 1.5 dat je prikaz frekvencijske zavisnosti referentnog graničnog intenziteta električnog polja na slikama 1.3 (frekvencijski opseg 100kHz–10MHz) i 1.4 (frekvencijski opseg 10MHz – 18GHz).

**Tabela 1.4** Bazična ograničenja za opštu ljudsku populaciju - ICNIRP preporuka [1]

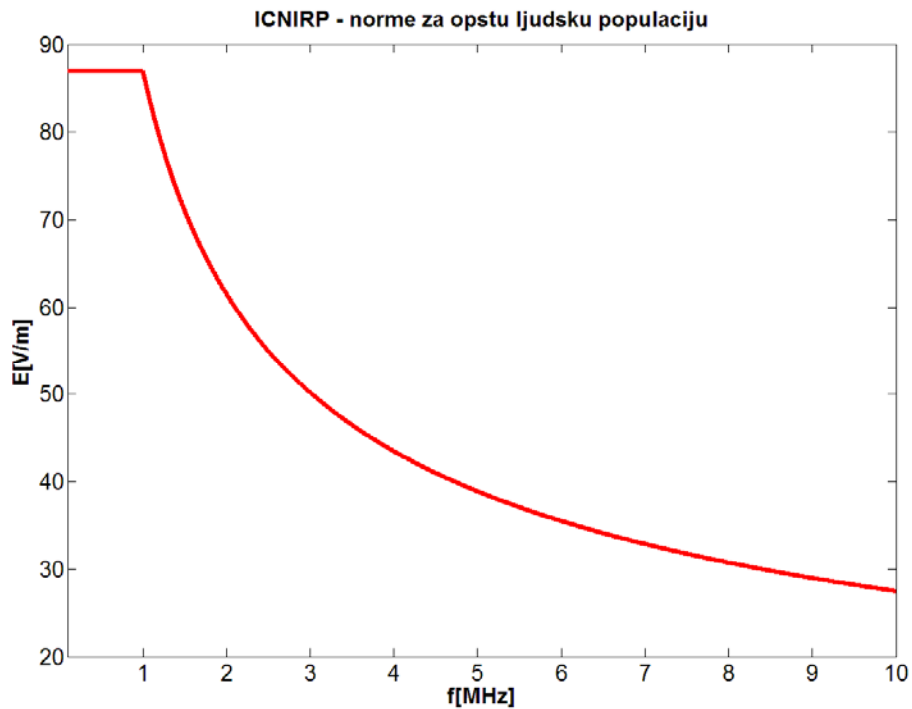
Frekvencija $f$	SAR usrednjen za celo telo $SAR_{wb}$ [W/kg]	SAR lokalizovan na glavu i trup $SAR_{h\&t}$ [W/kg]	SAR lokalizovan na ekstremitete $SAR_l$ [W/kg]
100kHz -10GHz	0.08	2	4

**Tabela 1.5** Referentni granični nivoi za opštu ljudsku populaciju - ICNIRP preporuka [1]

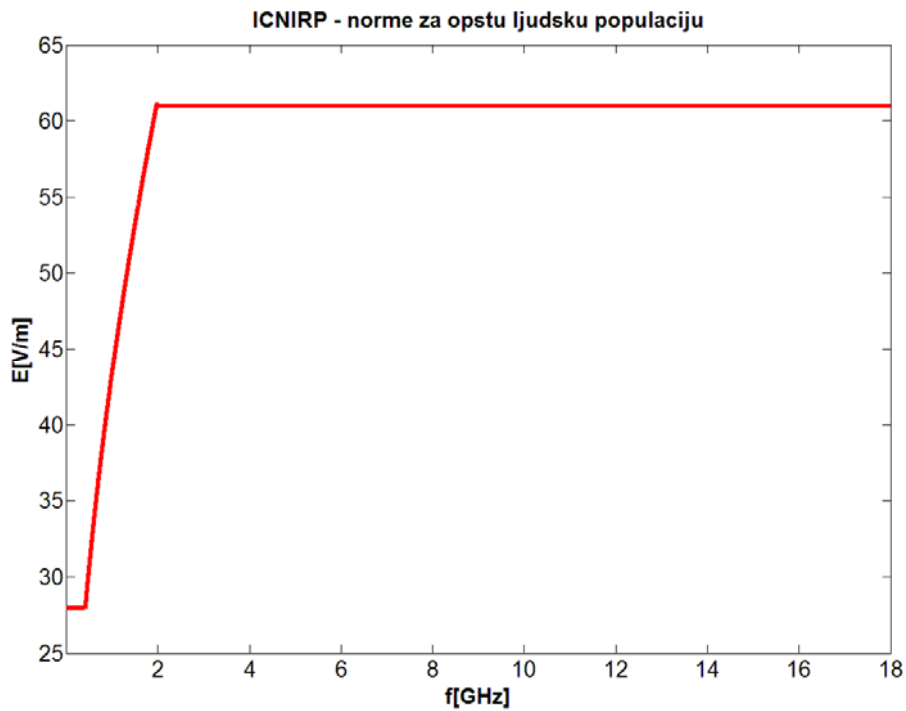
Frekvencija $f$	Intenzitet električnog polja $E$ [V/m]	Intenzitet magnetnog polja $H$ [A/m]	Gustina snage $S$ [W/m <sup>2</sup> ]
do 1Hz	-	32000	-
1-8Hz	10000	$32000/f^2$	-
8-25Hz	10000	$4000/f$	-
0.025-0.8kHz	$250/f$	$4/f$	-
0.8-3kHz	$250/f$	5	-
3-150kHz	87	5	-
0.15-1MHz	87	$0.73/f$	-
1-10MHz	$87/f^{1/2}$	$0.73/f$	-
10-400MHz	28	0.073	2
400-2000MHz	$1.375f^{1/2}$	$0.0037f^{1/2}$	$f/200$
2-300GHz	61	0.16	10

**Tabela 1.6** Vrednosti referentnih graničnih nivoa za opštu ljudsku populaciju za frekvencijske opsege 900MHz, 1800MHz i 2100MHz - ICNIRP preporuka [1]

Frekvencija $f$	900MHz	1800MHz	2100MHz
Intenzitet električnog polja $E$	41V/m	58V/m	61V/m
Intenzitet magnetnog polja $H$	0.11A/m	0.156A/m	0.16A/m
Gustina snage $S$	4.5W/m <sup>2</sup>	9W/m <sup>2</sup>	10W/m <sup>2</sup>



*Slika 1.3 Referentni granični intenzitet električnog polja za opštu ljudsku populaciju u zavisnosti od frekvencije (100kHz–10MHz) - ICNIRP preporuka [1]*



*Slika 1.4 Referentni granični intenzitet električnog polja za opštu ljudsku populaciju u zavisnosti od frekvencije (10MHz–18GHz) - ICNIRP preporuka [1]*

### 1.3 Norme za tehničko osoblje definisane ICNIRP preporukom

Bazična ograničenja i referentni granični nivoi za tehničko osoblje definisani ICNIRP preporukom [1] dati su u tabelama 1.7 i 1.8, respektivno. U tabeli 1.9, date su vrednosti referentnih graničnih nivoa za frekvencijske opsege 900MHz, 1800MHz i 2100MHz, i to za vremenski period usrednjavanja od 6min. Na osnovu tabele 1.8 dat je prikaz frekvencijske zavisnosti referentnog graničnog intenziteta električnog polja na slikama 1.5 (frekvencijski opseg 100kHz–10MHz) i 1.6 (za frekvencijski opseg 10MHz – 18GHz).

**Tabela 1.7** Bazična ograničenja za tehničko osoblje - ICNIRP preporuka [1]

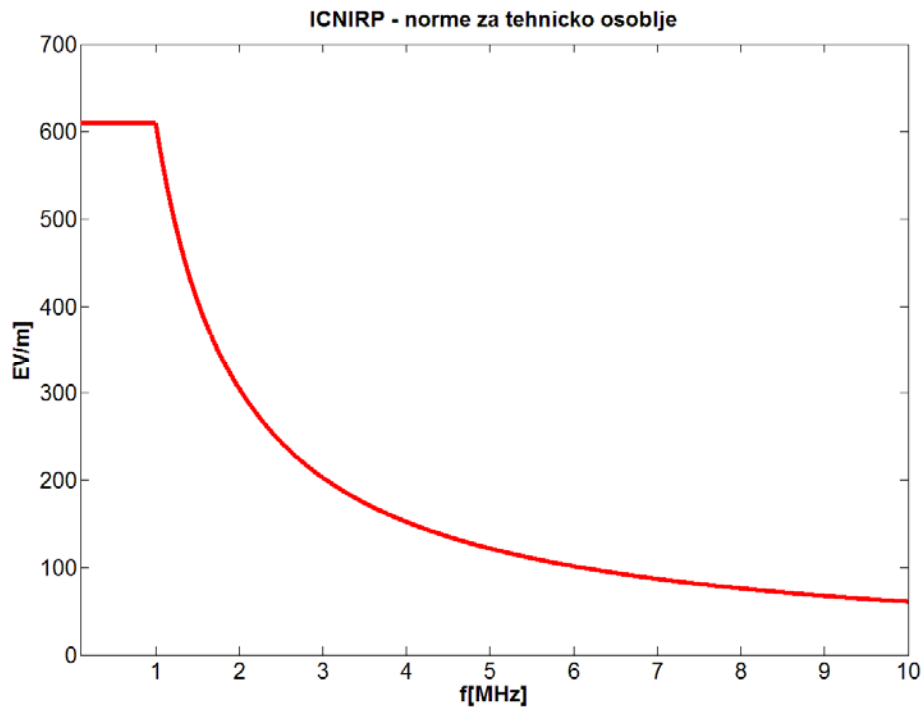
Frekvencija $f$	SAR usrednjen za celo telo $SAR_{wb}$ [W/kg]	SAR lokalizovan na glavu i trup $SAR_{h\&t}$ [W/kg]	SAR lokalizovan na ekstremitete $SAR_l$ [W/kg]
100kHz -10GHz	0.4	10	20

**Tabela 1.8** Referentni granični nivoi za tehničko osoblje - ICNIRP preporuka [1]

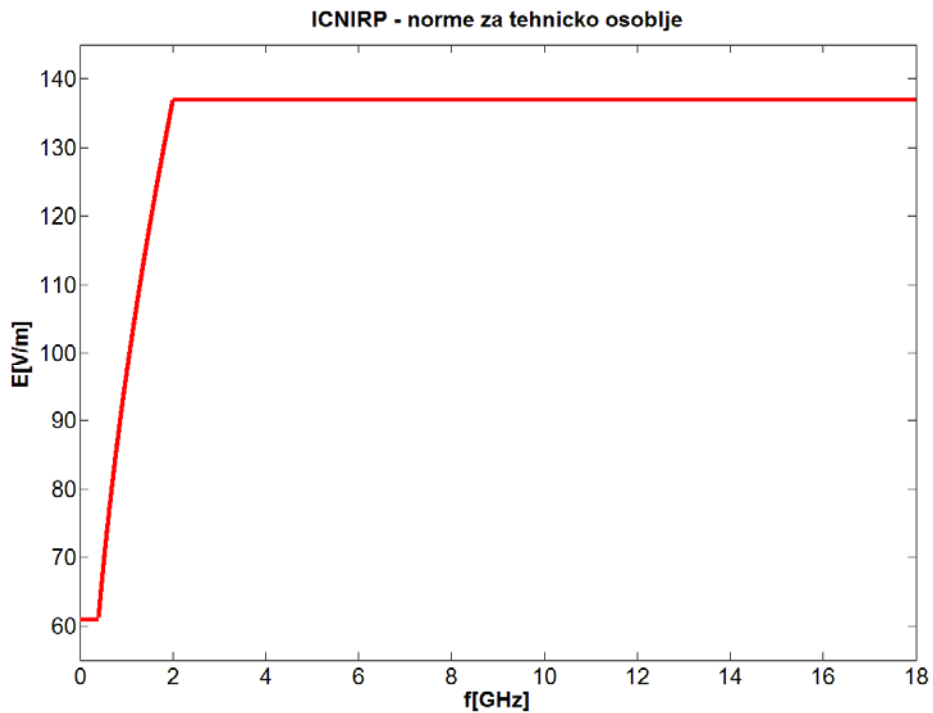
Frekvencija $f$	Intenzitet električnog polja $E$ [V/m]	Intenzitet magnetnog polja $H$ [A/m]	Gustina snage $S$ [W/m <sup>2</sup> ]
do 1Hz	-	163000	-
1-8Hz	20000	$163000/f^2$	-
8-25Hz	20000	$20000/f$	-
0.025-0.82kHz	$500/f$	$20/f$	-
0.82-65kHz	610	24.4	-
0.065-1MHz	610	$1.6/f$	-
1-10MHz	$610/f$	$1.6/f$	-
10-400MHz	61	0.16	10
400-2000MHz	$3f^{1/2}$	$0.008f^{1/2}$	$f/40$
2-300GHz	137	0.36	50

**Tabela 1.9** Vrednosti referentnih graničnih nivoa za tehničko osoblje za frekvencijske opsege 900MHz, 1800MHz i 2100MHz - ICNIRP preporuka [1]

Frekvencija $f$	900MHz	1800MHz	2100MHz
Intenzitet električnog polja $E$	90V/m	127V/m	137V/m
Intenzitet magnetnog polja $H$	0.24A/m	0.34A/m	0.36A/m
Gustina snage $S$	22.5W/m <sup>2</sup>	45W/m <sup>2</sup>	50W/m <sup>2</sup>



*Slika 1.5 Referentni granični intenzitet električnog polja za tehničko osoblje u zavisnosti od frekvencije (100kHz–10MHz) - ICNIRP preporuka [1]*



*Slika 1.6 Referentni granični intenzitet električnog polja za tehničko osoblje u zavisnosti od frekvencije (10MHz–18GHz) - ICNIRP preporuka [1]*

## 1.4 Norme za opštu ljudsku populaciju definisane FCC preporukom

Bazična ograničenja i referentni granični nivoi za opštu ljudsku populaciju definisani FCC preporukom [18] dati su u tabelama 1.10 i 1.11, respektivno. U tabeli 1.12, date su vrednosti referentnih graničnih nivoa za frekvencijske opsege 900MHz, 1800MHz i 2100MHz, i to za vremenski period usrednjavanja od 30min.

**Tabela 1.10** Bazična ograničenja za opštu ljudsku populaciju - FCC preporuka [18]

Frekvencija $f$	SAR usrednjen za celo telo $SAR_{wb}$ [W/kg]	SAR lokalizovan na glavu i trup $SAR_{h&t}$ [W/kg]	SAR lokalizovan na ekstremitete $SAR_l$ [W/kg]
300kHz -6GHz	0.08	1.6	4

**Tabela 1.11** Referentni granični nivoi za opštu ljudsku populaciju - FCC preporuka [18]

Frekvencija $f$	Intenzitet električnog polja $E$ [V/m]	Intenzitet magnetnog polja $H$ [A/m]	Gustina snage $S$ [W/m <sup>2</sup> ]
0.3-1.34MHz	614	1.63	1000
1.34-30MHz	$824/f$	$2.19/f$	$1800/f^2$
30-300MHz	27.5	0.073	2
300-1500MHz	-	-	$f/150$
1.5-100GHz	-	-	10

**Tabela 1.12** Vrednosti referentnih graničnih nivoa za opštu ljudsku populaciju za frekvencijske opsege 900MHz, 1800MHz i 2100MHz - FCC preporuka [18]

Frekvencija $f$	900MHz	1800MHz	2100MHz
Intenzitet električnog polja $E$	47.6V/m	61.4V/m	61.4V/m
Intenzitet magnetnog polja $H$	0.13A/m	0.16A/m	0.16A/m
Gustina snage $S$	6W/m <sup>2</sup>	10W/m <sup>2</sup>	10W/m <sup>2</sup>

## 1.5 Norme za tehničko osoblje definisane FCC preporukom

Bazična ograničenja i referentni granični nivoi za tehničko osoblje definisani FCC preporukom [18] dati su u tabelama 1.13 i 1.14, respektivno. U tabeli 1.15, date su vrednosti referentnih graničnih nivoa za frekvencijske opsege 900MHz, 1800MHz i 2100MHz, i to za vremenski period usrednjavanja od 6min.

**Tabela 1.13** Bazična ograničenja za tehničko osoblje - FCC preporuka [18]

Frekvencija $f$	SAR usrednjen za celo telo $SAR_{wb}$ [W/kg]	SAR lokalizovan na glavu i trup $SAR_{h&t}$ [W/kg]	SAR lokalizovan na ekstremitete $SAR_l$ [W/kg]
300kHz -6GHz	0.4	8	20

**Tabela 1.14** Referentni granični nivoi za tehničko osoblje - FCC preporuka [18]

Frekvencija $f$	Intenzitet električnog polja $E$ [V/m]	Intenzitet magnetnog polja $H$ [A/m]	Gustina snage $S$ [W/m <sup>2</sup> ]
0.3-3MHz	614	1.63	1000
3-30MHz	1842/ $f$	4.89/ $f$	9000/ $f^2$
30-300MHz	61.4	0.163	10
300-1500MHz	-	-	$f/30$
1.5-100GHz	-	-	50

**Tabela 1.15** Vrednosti referentnih graničnih nivoa za tehničko osoblje za frekvencijske opsege 900MHz, 1800MHz i 2100MHz - FCC preporuka [18]

Frekvencija $f$	900MHz	1800MHz	2100MHz
Intenzitet električnog polja $E$	106.3V/m	137.3V/m	137.3V/m
Intenzitet magnetnog polja $H$	0.28A/m	0.36A/m	0.36A/m
Gustina snage $S$	30W/m <sup>2</sup>	50W/m <sup>2</sup>	50W/m <sup>2</sup>

## 1.6 Norme za opštu ljudsku populaciju definisane IEEE standardom

Bazična ograničenja i referentni granični nivoi za opštu ljudsku populaciju definisani IEEE standardom [19] dati su u tabelama 1.16 i 1.17, respektivno. U tabeli 1.18, date su vrednosti referentnih graničnih nivoa za frekvencijske opsege 900MHz, 1800MHz i 2100MHz, i to za vremenski period usrednjavanja od 30min.

**Tabela 1.16** Bazična ograničenja za opštu ljudsku populaciju - IEEE standard [19]

Frekvencija $f$	SAR usrednjen za celo telo $SAR_{wb}$ [W/kg]	SAR lokalizovan na glavu i trup $SAR_{h&t}$ [W/kg]	SAR lokalizovan na ekstremitete $SAR_l$ [W/kg]
300kHz -6GHz	0.08	2	4

**Tabela 1.17** Referentni granični nivoi za opštu ljudsku populaciju - IEEE standard [19]

Frekvencija $f$	Intenzitet električnog polja $E$ [V/m]	Intenzitet magnetnog polja $H$ [A/m]	Gustina snage $S$ [W/m <sup>2</sup> ]
0.1-1.34MHz	614	$16.3/f$	1000
1.34-3MHz	$823.8/f$	$16.3/f$	$1800/f^2$
3-30MHz	$823.8/f$	$16.3/f$	$1800/f^2$
30-100MHz	27.5	$158.3/f^{1.668}$	2
100-400MHz	27.5	0.0729	2
400-2000MHz	-	-	$f/200$
2-100GHz	-	-	10

**Tabela 1.18** Vrednosti referentnih graničnih nivoa za opštu ljudsku populaciju za frekvencijske opsege 900MHz, 1800MHz i 2100MHz - IEEE standard [19]

Frekvencija $f$	900MHz	1800MHz	2100MHz
Intenzitet električnog polja $E$	41.2V/m	58.2V/m	61.4V/m
Intenzitet magnetnog polja $H$	0.11A/m	0.15A/m	0.16A/m
Gustina snage $S$	4.5W/m <sup>2</sup>	9W/m <sup>2</sup>	10W/m <sup>2</sup>

## 1.7 Norme za tehničko osoblje definisane IEEE standardom

Bazična ograničenja i referentni granični nivoi za tehničko osoblje definisani IEEE standardom [19] dati su u tabelama 1.19 i 1.20, respektivno. U tabeli 1.21, date su vrednosti referentnih graničnih nivoa za frekvencijske opsege 900MHz, 1800MHz i 2100MHz, i to za vremenski period usrednjavanja od 6min.

**Tabela 1.19** Bazična ograničenja za tehničko osoblje - IEEE standard [19]

Frekvencija $f$	SAR usrednjen za celo telo $SAR_{wb}$ [W/kg]	SAR lokalizovan na glavu i trup $SAR_{h\&t}$ [W/kg]	SAR lokalizovan na ekstremitete $SAR_l$ [W/kg]
300kHz -6GHz	0.4	10	20

**Tabela 1.20** Referentni granični nivoi za tehničko osoblje - IEEE standard [19]

Frekvencija $f$	Intenzitet električnog polja $E$ [V/m]	Intenzitet magnetnog polja $H$ [A/m]	Gustina snage $S$ [W/m <sup>2</sup> ]
0.1-1MHz	1842	$16.3/f$	9000
1-30MHz	$1842/f$	$16.3/f$	$9000/f^2$
30-100MHz	61.4	$16.3/f$	10
100-300MHz	61.4	0.163	10
300-3000MHz	-	-	$f/30$
3-300GHz	-	-	100

**Tabela 1.21** Vrednosti referentnih graničnih nivoa za tehničko osoblje za frekvencijske opsege 900MHz, 1800MHz i 2100MHz - IEEE standard [19]

Frekvencija $f$	900MHz	1800MHz	2100MHz
Intenzitet električnog polja $E$	106.3V/m	150.4V/m	162.4V/m
Intenzitet magnetnog polja $H$	0.28A/m	0.4A/m	0.43A/m
Gustina snage $S$	30W/m <sup>2</sup>	60W/m <sup>2</sup>	70W/m <sup>2</sup>

## 1.8 Norme za opštu ljudsku populaciju definisane ARPANSA standardom

Bazična ograničenja i referentni granični nivoi za opštu ljudsku populaciju definisani ARPANSA standardom [17] dati su u tabelama 1.22 i 1.23, respektivno. U tabeli 1.24, date su vrednosti referentnih graničnih nivoa za frekvencijske opsege 900MHz, 1800MHz i 2100MHz, i to za vremenski period usrednjavanja od 6min.

**Tabela 1.22** Bazična ograničenja za opštu ljudsku populaciju - ARPANSA [17]

Frekvencija $f$	SAR usrednjen za celo telo $SAR_{wb}$ [W/kg]	SAR lokalizovan na glavu i trup $SAR_{h\&t}$ [W/kg]	SAR lokalizovan na ekstremitete $SAR_l$ [W/kg]
100kHz -6GHz	0.08	2	4

**Tabela 1.23** Referentni granični nivoi za opštu ljudsku populaciju - ARPANSA [17]

Frekvencija $f$	Intenzitet električnog polja $E$ [V/m]	Intenzitet magnetnog polja $H$ [A/m]	Gustina snage $S$ [W/m <sup>2</sup> ]
100-150kHz	86.8	4.86	-
0.15-1MHz	86.8	$0.729/f$	-
1-10MHz	$86.8/f^{1/2}$	$0.729/f$	-
10-400MHz	27.4	0.0729	2
400-2000MHz	$1.37f^{1/2}$	$0.00364f^{1/2}$	$f/200$
2-300GHz	61.4	0.163	10



**Tabela 1.24** Vrednosti referentnih graničnih nivoa za opštu ljudsku populaciju za frekvencijske opsege 900MHz, 1800MHz i 2100MHz - ARPANSA standard [17]

Frekvencija $f$	900MHz	1800MHz	2100MHz
Intenzitet električnog polja $E$	41V/m	58V/m	61.4V/m
Intenzitet magnetnog polja $H$	0.109A/m	0.154A/m	0.163A/m
Gustina snage $S$	4.49W/m <sup>2</sup>	8.98W/m <sup>2</sup>	10W/m <sup>2</sup>

## 1.9 Norme za tehničko osoblje definisane ARPANSA standardom

Bazična ograničenja i referentni granični nivoi za tehničko osoblje definisani ARPANSA standardom [17] dati su u tabelama 1.25 i 1.26, respektivno. U tabeli 1.27, date su vrednosti referentnih graničnih nivoa za frekvencijske opsege 900MHz, 1800MHz i 2100MHz, i to za vremenski period usrednjavanja od 6min.

**Tabela 1.25** Bazična ograničenja za tehničko osoblje - ARPANSA standard [17]

Frekvencija $f$	SAR usrednjen za celo telo $SAR_{wb}$ [W/kg]	SAR lokalizovan na glavu i trup $SAR_{h\&t}$ [W/kg]	SAR lokalizovan na ekstremitete $SAR_l$ [W/kg]
100kHz -6GHz	0.4	10	20

**Tabela 1.26** Referentni granični nivoi za tehničko osoblje - ARPANSA standard [17]

Frekvencija $f$	Intenzitet električnog polja $E$ [V/m]	Intenzitet magnetnog polja $H$ [A/m]	Gustina snage $S$ [W/m <sup>2</sup> ]
0.1-1MHz	614	1.63/ $f$	-
1-10MHz	614/ $f$	1.63/ $f$	1000/ $f^2$
10-400MHz	61.4	0.163	10
400-2000MHz	3.07/ $f^{1/2}$	0.00814/ $f^{1/2}$	$f/40$
2-300GHz	137	0.364	50

**Tabela 1.27** Vrednosti referentnih graničnih nivoa za tehničko osoblje za frekvencijske opsege 900MHz, 1800MHz i 2100MHz - ARPANSA standard [17]

Frekvencija $f$	900MHz	1800MHz	2100MHz
Intenzitet električnog polja $E$	92V/m	130V/m	137V/m
Intenzitet magnetnog polja $H$	0.244A/m	0.345A/m	0.364A/m
Gustina snage $S$	22.5W/m <sup>2</sup>	45W/m <sup>2</sup>	50W/m <sup>2</sup>

### 1.10 Norme za istovremeni uticaj više izvora elektromagnetnog zračenja

U slučaju da se merenja sprovode na lokaciji na kojoj postoji više izvora elektromagnetnog zračenja, što je najčešće slučaj u praksi, mora se uzeti u obzir mogućnost zbirnih efekata, koji potiču od simultanog izlaganja elektromagnetnim poljima više izvora. Proračuni zasnovani na zbirnim delovanjima elektromagnetnog polja moraju se izvesti za svaki pojedini efekat, tako da se odvojena procena vrši za toplotne i stimulatívne efekte na telo. Uzimajući u obzir da je za slučaj elektromagnetnog zračenja baznih stanica javnih mobilnih sistema dominantan toplotni efekat, prilikom simultanog izlaganja poljima različitih frekvencija mora biti zadovoljen kriterijum definisan Pravilnikom o granicama izlaganja nejonizujućim zračenjima [24] i ICNIRP preporukom [1], koji je baziran na toplotnom efektu. Za slučaj baznih stanica javnih mobilnih sistema kriterijum je određen sledećim relacijama [24]:

$$\sum_{i > 1\text{MHz}}^{300\text{GHz}} \left( \frac{E_i}{E_{L,i}} \right)^2 \leq 1 \quad (1.1)$$

$$\sum_{j > 150\text{kHz}}^{300\text{GHz}} \left( \frac{H_j}{H_{L,j}} \right)^2 \leq 1 \quad (1.2)$$

gde je:

$E_i$  - intenzitet električnog polja koji potiče od izvora na frekvenciji  $i$ ,

$E_{L,i}$  - vrednost referentnog graničnog intenziteta za električno polje na frekvenciji  $i$ ,

$H_j$  - intenzitet magnetnog polja koji potiče od izvora na frekvenciji  $j$ ,

$H_{L,j}$  - vrednost referentnog graničnog intenziteta za magnetno polje na frekvenciji  $j$ .

Prilikom analize da li su ispoštovane norme definisane kriterijumom za istovremeni uticaj više izvora elektromagnetnog zračenja, neophodno je uzeti u obzir sve relevantne izvore elektromagnetnog zračenja na lokaciji na kojoj se vrši razmatranje.

## **2. METODE ZA MERENJE INTENZITETA ELEKTRIČNOG POLJA U OKOLINI BAZNIH STANICA**

Da bi se u praksi proverilo da li su zadovoljene norme kojima se ograničava izlaganje elektromagnetnim poljima, sprovode se merenja (a ponekad i proračuni) intenziteta elektromagnetnog polja u okolini baznih stanica javnih mobilnih sistema. Za slučaj baznih stanica javnih mobilnih sistema, uzimajući u obzir složenost merenja specifične brzine apsorpcije energije *SAR* (preko koje su iskazana bazična ograničenja), u praksi se sprovode merenja intenziteta električnog polja *E*, intenziteta magnetnog polja *H* i gustine snage *S* (preko kojih su iskazani referentni granični nivoi).

Metode koje se koriste za merenje intenziteta elektromagnetnog polja u okolini baznih stanica definisane su međunarodnim standardima [38]-[44], i one se razvijaju i nadograđuju u skladu sa razvojem telekomunikacijih sistema, kao i poboljšanjima mernih uređaja. U okviru Laboratorije za radio-komunikacije Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta u Beogradu, akreditovane od strane Akreditacionog tela Srbije, koristi se metoda koja je u potpunosti usklađena sa Evropskim standardima [38]-[42]. Potrebno je istaći da su standardi [38]-[42] usvojeni bez ikakvih modifikacija kao srpski standardi na engleskom jeziku, od strane Instituta za standardizaciju Srbije.

U Srbiji, Zakonom o zaštiti od nejonizujućih zračenja [23] i Pravilnikom o izvorima nejonizujućih zračenja od posebnog interesa, vrstama izvora, načinu i periodu njihovog ispitivanja [25] propisuje se obavezno merenje intenziteta elektromagnetnog zračenja na svakoj lokaciji bazne stanice u radu, da bi se proverila usklađenost sa normama definisanim Pravilnikom o granicama izlaganja nejonizujućim zračenjima [24] i ICNIRP preporukama [1]. Pored toga, za svaku novu baznu stanicu čija se instalacija planira, zahteva se izrada stručne ocene opterećenja životne sredine kao dokaz da postavljanje nove bazne stanice neće dovesti do prekoračenja propisanih normi. Stručna ocena opterećenja životne sredine podrazumeva proračun elektromagnetnog zračenja, ali zahteva da se postojeće stanje (pre postavljanja nove

bazne stanice) utvrdi merenjem. Pravilnikom o izvorima nejonizujućih zračenja od posebnog interesa, vrstama izvora, načinu i periodu njihovog ispitivanja [25] definisano je da se bazne stanice čije elektromagnetno zračenje u zonama povećane osetljivosti dostiže najmanje 10% vrednosti referentnog graničnog nivoa, smatraju izvorima nejonizujućih zračenja od posebnog interesa. Za visokofrekventne izvore od posebnog interesa zahtevaju se periodična merenja i to jedanput svake druge kalendarske godine.

Da bi se ispitala usklađenost instalacije bazne stanice sa referentnim graničnim nivoima, standardi [38]-[42] određuju da je u bliskoj radijacijskoj zoni i u zoni dalekog polja dovoljno meriti samo intenzitet električnog polja  $E$  ili samo intenzitet magnetnog polja  $H$ . Uzimajući u obzir frekvencijske opsege u kojima rade javni mobilni sistemi, kao i dimenzije antenna koje koriste bazne stanice, treba istaći da je ovo gotovo uvek slučaj u praksi. Za merenje intenziteta elektromagnetnog zračenja u praksi se najčešće koriste uređaji koji mere intenzitet električnog polja, sa obzirom da je njihova realizacija najjednostavnija. U skladu sa tim, u okviru Laboratorije za radio-komunikacije koriste se merni sistemi za merenje intenziteta električnog polja. Za slučaj ravanskog elektromagnetnog talasa, intenzitet električnog polja  $E$ , intenzitet magnetnog polja  $H$  i gustine snage  $S$  međusobno vezuje karakteristična impedansa slobodnog prostora  $Z_0$ , relacijom:

$$S = E \cdot H = \frac{E^2}{Z_0} = Z_0 \cdot H^2 \quad (2.1)$$

Potupak merenja intenziteta elektromagnetnog zračenja na lokaciji bazne stanice sastoji se od dve faze. U prvoj fazi, određuju se relevantni izvori elektromagnetnog zračenja za analiziranu lokaciju, kao i relevantne zone same lokacije u kojima je neophodno izvršiti merenja [41]. Da bi se odredila prostorna raspodela elektromagnetnog zračenja, u drugoj fazi se sprovode merenja intenziteta električnog polja relevantnih izvora na velikom broju mernih pozicija u okviru relevantnih zona razmatrane lokacije.

Određivanje relevantnih izvora vrši se vizuelnom analizom lokacije i njene bliže okoline, konsultovanjem nacionalne baze radio-predajnika, konsultovanjem podataka dobijenih od strane mobilnog operatora i najviše pretraživanjem radio-frekvencijskog

spektra. U okviru Laboratorije za radio-komunikacije, za pretraživanje radio-frekvencijskog spektra u opsegu 30MHz to 3GHz, koristi se sistem za frekvencijski selektivna merenja koji se sastoji se od spektralnog analizatora *Rohde&Schwarz FSH6* i merne sonde *Rohde&Schwarz TS-EMF*. Primeri relevantnih izvora iz prakse koji su uočavani na lokacijama baznih stanica su: GSM 900MHz sistem, GSM 1800MHz (DCS) sistem, UMTS sistem, LTE sistem, FM radio-predajnici, TV predajnici, DVB-T2 (*Digital Video Broadcasting - Second Generation Terrestrial*) predajnici, TETRA (*Terrestrial Trunked Radio*) sistem, itd.

Relevantne zone za lokaciju bazne stanice određuju se pomoću prostorne analize intenziteta električnog polja, koja se vrši ubrzanim postupkom prebrisavanja prostora pomoću širokopojasnog mernog sistema. U okviru Laboratorije za radio-komunikacije, za određivanje relevantnih zona predmetne lokacije, koristi se širokopojasni merni sistem koji se sastoji od mernog prijemnika *NARDA EMR300* i merne sonde *NARDA TYPE 18c*. Pod relevantnim zonama lokacije smatraju se delovi lokacije kojima opšta ljudska populacija ima pristup i u kojima su očekivane vrednosti elektromagnetnog polja iznad 5% referentnih graničnih nivoa definisanih ICNIRP preporukom. Takođe, potrebno je istaći da u velikom broju slučajeva iskustvena procena tima koji obavlja merenje doprinosi bržem određivanju relevantnih zona lokacije. Relevantne zone za lokaciju bazne stanice zavise od načina instalacije antenskog sistema, i najčešći primeri iz prakse su:

- nivo tla i objekti koji se nalaze u okolini antenskog stuba,
- krov, krovne terase i spratovi objekta na kom su instalirane bazne stanice, kao i susedni objekti koji se nalaze u blizini, i
- unutrašnjost objekta za slučajeve *indoor* baznih stanica.

Za određivanje prostorne raspodele elektromagnetnog zračenja na lokaciji, vrše se merenja intenziteta električnog polja relevantnih izvora na velikom broju mernih pozicija u okviru relevantnih zona razmatrane lokacije. Prilikom merenja na svakoj mernoj poziciji merna sonda je postavljena na tronožni stativ. U toku merenja, osobe koje čine merni tim, udaljene su od merne sonde bar 1.5m. Za svaku mernu poziciju, standardom [41] predviđeno je da se merenja sprovedu na tri visine (1.1 m, 1.5 m and 1.7 m) i da se kao rezultat uzme maksimalna od tri izmerene vrednosti. Sa druge strane, standard [40] predviđa prostorno usrednjavanje za ove tri vrednosti, a u nekim slučajevima i za dodatne tri (ukupno šest vrednosti) na istim visinama ali horizontalno udaljene 0.4m. U

[45], definiše se mreža mernih pozicija za dobijanje prostorno usrednjenog rezultata merenja, dok se u radu [46] analizira uticaj *small-scale* fadinga na procenu lokalne srednje vrednosti intenziteta elektromagnetnog polja. Sve norme propisuju merenje srednje vrednosti u intervalu vremena od 6min, izuzev normi za opštu ljudsku populaciju definisanih FCC regulativom i IEEE standardom, koje propisuju merenje srednje vrednosti u intervalu vremena od 30min.

Da bi se proverila usklađenost sa referentnim graničnim nivoima, standardi [40]-[41] zahtevaju da se merenja sprovode kada bazne stanice i drugi relevantni izvori rade sa maksimalnom predajnom snagom ili da se koriste tehnike za ekstrapolaciju izmerenih vrednosti na slučaj sa maksimalnom predajnom snagom (slučaju maksimalnog saobraćajnog opterećenja). Ekstrapolacija trenutno izmerenog intenziteta elektromagnetnog polja bazne stanice može dovesti do velikog precenjivanja, pa se zato preporučuje merenje signala koji se emituju sa konstantom predajnom snagom za potrebe ekstrapolacije.

Da bi se izvršila smisljena merenja, potrebno je utvrditi ponašanje i karakteristike radio-frekvencijskog izvora, i razumeti način rada i funkcionisanja merne opreme [38]. Merenje radio-frekvencijskog elektromagnetnog polja koje potiče od baznih stanica javnih mobilnih sistema, predstavlja pravi izazov zbog promenljivosti polja koja ga karakteriše. Pored dobro poznatog *short-term* fadinga, koji generalno karakteriše propagaciju radio-frekvencijskih elektromagnetnih talasa, nekoliko dodatnih efekata mogu imati značajan uticaj na promenljivost intenziteta elektromagnetnog polja. Najznačajniji efekti koji su posledica telekomunikacionih protokola i koji direktno utiču na predajnu snagu baznih stanica su [47]: saobraćajno opterećenje, automatska kontrola predajne snage i diskontinualna predaja, o čemu će više biti reči u poglavlju 4.

Po pravilu, merni sistem se sastoji od dve glavne komponente: merne sonde i mernog uređaja [38]. Merna sonda se koristi kao merni element za polje i mora da bude dizajnirana tako da ne utiče značajno na polje koje se meri. Merni uređaj obrađuje signal koji dolazi sa merne sonde i daje vrednost merene veličine elektromagnetnog polja. Sa obzirom da se standardima zahteva izotropno merenje intenziteta elektromagnetnog polja, merne sonde su obično napravljene tako da imaju tri međusobno ortogonalna merna elementa, koji služe za nezavisno merenje tri prostorne komponente polja. Ovakve triaksijalne merne sonde služe za merenje intenziteta

rezultantnog (izotropnog) polja koje se dobija kao koren iz zbira kvadrata intenziteta tri prostorne komponente polja. U slučaju da se koristi monoaksijalna sonda, standardi predviđaju da se sonda naizmenično postavlja u tri međusobno ortogonalna pravca, i da se na taj način izvrši nezavisno merenje svake od tri prostorne komponente polja.

Sva merenja moraju da se sprovode sa mernim sistemima koji se etaloniraju u skladu sa [39] i [48], i oni se mogu klasifikovati u dve kategorije: širokopoljasni merni sistemi i frekvencijski selektivni merni sistemi.

## 2.1 Širokopoljasna merenja

Širokopoljasni merni sistemi se koriste za merenje ukupnog intenziteta električnog polja u celom frekvencijskom opsegu rada merne sonde [40]. Rezultat širokopoljasnog merenja je trenutni intenzitet električnog polja koji potiče od svih radio-frekvencijskih izvora u širokom opsegu rada merne sonde. Širokopoljasni merni sistemi su po pravilu lako prenosivi (portabilni), robusni i jednostavni za upotrebu. Postoje dva različita tipa širokopoljasnih mernih sondi: sa ravnim frekvencijskim odzivom i sa ponderisanim (oblikovanim) frekvencijskim odzivom. Merne sonde sa ravnim frekvencijskim odzivom daju rezultat u obliku ukupnog intenziteta električnog polja. U slučaju korišćenja mernih sondi sa ponderisanim frekvencijskim odzivom, kvadrat intenziteta izmerenog električnog polja se deli sa kvadratom referentnog graničnog intenziteta električnog polja, i rezultat se izražava u procentima. Širokopoljasna merenja ne daju informacije o frekvencijama merenih radio-predajnika, i identifikacija određenih radio-predajnika nije moguća u slučajevima kada polje potiče od većeg broja radio-predajnika. Iz tog razloga, nije preporučljivo koristiti širokopoljasne merne sisteme u slučajevima kada se vrši ekstrapolacija na maksimalnu emitovanu snagu.

U okviru Laboratorije za radio-komunikacije koristi se širokopoljasni merni sistemi koji se sastoji od mernog prijemnika *NARDA EMR300* i izotropnih mernih sondi *NARDA TYPE 18c* (100kHz to 3GHz) i *NARDA TYPE 9c* (3MHz to 18GHz), prikazan na slici 2.1. Širokopoljasni merni sistem se najčešće koristi za određivanje relevantnih zona za lokaciju bazne stanice (ubrzani postupak prebrisavanja prostora), kao i za merenja na velikom broju mernih pozicija kada na lokaciji nema relevantnih izvora (merenje postojećeg stanja za potrebe izrade stručne ocene opterećenja životne sredine).



*Slika 2.1 Prikaz širokopolasnog mernog sistema koji se sastoji od mernog prijemnika NARDA EMR300 i izotropnih mernih sondi NARDA TYPE 18c i NARDA TYPE 9c*

## 2.2 Frekvencijski selektivna merenja

Frekvencijski selektivni merni sistemi koriste se za merenje intenziteta električnog polja svakog radio-sistema ponaosob [40]. Frekvencijski selektivna merna oprema daje podatke o intenzitetu polja, ali takođe i podatke o karakteristikama frekvencijskog spektra merenog polja. Za frekvencijski selektivna merenja obično se koriste analizatori spektra i merni prijemnici. Kada se vrše merenja pomoću spektralnog analizatora, parametri uređaja treba da budu podešeni u skladu sa karakteristikama signala koji se meri, prvenstveno širini frekvencijskog spektra i dinamičkim karakteristikama signala. Postoji dosta parametara koje treba pažljivo podesiti kada sa koriste analizatori spektra, da bi se dobio odgovarajući rezultat merenja razmatranog signala. Optimalna podešavanja uređaja data su u radu [49] za GSM, u radu [50] za UMTS i u radu [51] za LTE.



U slučaju GSM sistema, za svaki sektor (ćeliju) bazne stanice najčešće postoji jedan stalno aktivan kontrolni kanal (BCCH - *Broadcast Control Channel*) koji se emituje sa konstantnom snagom, dok su ostali saobraćajni kanali (TCH - *Traffic Channel*) i aktiviraju samo kada postoji potreba. Korišćenjem frekvencijski selektivnog mernog sistema, potrebno je izmeriti intenzitet električnog polja  $E_{BCCH}$  za svaki detektovani BCCH. Nakon toga, za svaku GSM ćeliju, intenzitet električnog polja koji odgovara slučaju maksimalnog saobraćajnog opterećenja  $E_{traffic\_max}$  određuje se pomoću formule [40]:

$$E_{traffic\_max} = \sqrt{n_{TRX}} \cdot E_{BCCH} \quad (2.2)$$

gde je  $n_{TRX}$  odnos između maksimalne snage bazne stanice za ćeliju i snage dodeljene BCCH kanalu (najčešće broj predajnika u ćeliji).

Za slučaj UMTS sistema, na svakom radio-kanalu bazne stanice najčešće postoji jedan stalno aktivan kontrolni kanal (CPICH - *Common Pilot Channel*), koji se emituje sa konstantnom snagom. Korišćenjem frekvencijski selektivnog mernog sistema, sa mernim prijemnikom koji ima mogućnost dekodovanja UMTS signala, potrebno je izmeriti intenzitet električnog polja  $E_{CPICH}$  za svaki detektovani CPICH. Nakon toga, za svaku UMTS ćeliju, intenzitet električnog polja koji odgovara slučaju maksimalnog saobraćajnog opterećenja  $E_{traffic\_max}$  određuje se pomoću formule [40]:

$$E_{traffic\_max} = \sqrt{n_{CPICH}} \cdot E_{CPICH} \quad (2.3)$$

gde je  $n_{CPICH}$  odnos između maksimalne snage i snage dodeljene CPICH kanalu.

Za LTE sistem, postoje dva različita pristupa za ekstrapolaciju na slučaj maksimalnog saobraćajnog opterećenja definisana u [40], i to za slučajeve bazne stanice sa MIMO (*Multiple-Input and Multiple-Output*) 2x2 i MIMO 2x1 sistemom. U okviru prvog pristupa, korišćenjem mernog sistema sa mernim prijemnikom koji može da dekoduje LTE signal, potrebno je izmeriti inenzitete električnog polja koji potiču od referentnog signala (RS - *Reference Signal*) sa antenskog porta 1  $E_{RS\_PORT1}$  i antenskog porta 2  $E_{RS\_PORT2}$ . Nakon toga, intenzitet električnog polja koji odgovara slučaju maksimalnog saobraćajnog opterećenja  $E_{traffic\_max}$  određuje se pomoću formule [40]:

$$E_{traffic\_max} = \sqrt{\frac{n_{RS}}{BF}} \cdot \sqrt{E_{RS\_PORT1}^2 + E_{RS\_PORT2}^2} \quad (2.4)$$

gde  $n_{RS}$  predstavlja odnos između maksimalne snage i snage dodeljene referentnom signalu RS, a  $BF$  predstavlja *Power Boosting Factor* [40].

U okviru drugog pristupa, korišćenjem spektralnog analizatora, potrebno je izmeriti inenzitet električnog polja kontrolnog kanala (PBCH - *Physical Broadcast Channel*)  $E_{PBCH}$ . Nakon toga, intenzitet električnog polja koji odgovara slučaju maksimalnog saobraćajnog opterećenja  $E_{traffic\_max}$  određuje se pomoću formule [40]:

$$E_{traffic\_max} = \sqrt{n_{PBCH}} \cdot E_{PBCH} \quad (2.5)$$

gde je  $n_{PBCH}$  odnos između maksimalne snage i snage dodeljene PBCH kanalu bazne stanice.

Metode za ekstrapolaciju kod *in-situ* merenja izloženosti ljudi elektromagnetnim poljima koja potiču od LTE baznih stanica analizirane su u radu [52].

Korišćenjem prethodno dobijenih intenziteta električnog polja  $E_{i\_traffic\_max}$  za svaki od relevantnih izvora  $i$ , ukupni intenzitet električnog polja  $E_{tot}$  na mernoj poziciji određuje se u skladu sa relacijom:

$$E_{tot} = \sqrt{\sum_i E_{i\_traffic\_max}^2} \quad (2.6)$$

U okviru Laboratorije za radio-komunikacije koristi se sistem za frekvencijski selektivna merenja koji se sastoji se od spektralnog analizatora *Rohde&Schwarz FSH6* i izotropne merne sonde *Rohde&Schwarz TS-EMF*, prikazan na slici 2.2. Samo za potrebe merenja UMTS sistema, koristi se sistem za merenja koji se sastoji se od radio-mrežnog analizatora *Rohde&Schwarz TSMU* (koji može da dekoduje UMTS signal) i izotropne merne sonde *Rohde&Schwarz TS-EMF*. Frekvencijski selektivni merni sistem se koristi za pretraživanje radio-frekvencijskog spektra u opsegu 30MHz to 3GHz i za merenja svih relevantnih izvora ponaosob, na velikom broju mernih pozicija.



*Slika 2.2 Prikaz frekvencijski selektivnog mernog sistema koji se sastoji se od spektralnog analizatora Rohde&Schwarz FSH6 i izotropne merne sonde TS-EMF*

Da bi se ispitala usklađenost instalacije bazne stanice sa referentnim graničnim nivoima, neophodno je uzeti u obzir sve relevantne izvore elektromagnetnog zračenja na lokaciji i proveriti da li je za svaku mernu poziciju zadovoljen kriterijum za istovremeni uticaj više izvora, definisan Pravilnikom o granicama izlaganja nejonizujućim zračenjima [24] i ICNIRP preporukom [1]. Za jednostavnije proveravanje kriterijuma za istovremeni uticaj više izvora, standardom [41] definisan je faktor izloženosti relevantnog izvora  $ER_i$  (*Exposure Ratio*):

$$ER_i = \left( \frac{E_i}{E_{L,i}} \right)^2 \quad (2.7)$$

gde je:

$E_i$  - intenzitet električnog polja koji potiče od izvora na frekvenciji  $i$ , i

$E_{L,i}$  - vrednost referentnog graničnog intenziteta za električno polje na frekvenciji  $i$ .

Da bi kriterijum za istovremeni uticaj  $N$  izvora bio zadovoljen, ukupni faktor izloženosti  $TER$  (*Total Exposure Ratio*) mora da bude manji ili jednak 1:

$$TER = \sum_{i=1}^N ER_i \leq 1 \quad (2.8)$$

### **3. PROCENA MERNE NESIGURNOSTI REZULTATA MERENJA INTENZITETA ELEKTRIČNOG POLJA**

Procena merne nesigurnosti predstavlja jednu od ključnih komponenti u svim metrološkim primenama [53]. Naime, u metrologiji svakom rezultatu merenja mora da bude pridružena odgovarajuća merna nesigurnost. Bez merne nesigurnosti, rezultati merenja se ne mogu upoređivati ni međusobno, a ni sa bilo kakvim referentnim vrednostima propisanim standardima ili drugim važećim dokumentima. Zbog toga je neophodno da postoji primenljiva, lako razumljiva i opšte prihvaćena procedura za karakterisanje kvaliteta rezultata merenja, odnosno za procenu merne nesigurnosti. Merna nesigurnost je parameter koji se pridružuje rezultatu merenja, i koji karakteriše disperziju vrednosti pridruženu merenoj veličini, i to korišćenjem “razumnog” pristupa. U radu [54], istaknuta je potreba za ostvarivanjem metrološke sledljivosti i postojanjem procedure za procenu merne nesigurnosti. Pored toga, standardom za akreditaciju laboratorija [48] zahteva se da svaka akreditovana laboratorija ima i primenjuje proceduru za procenu merne nesigurnosti.

Dokument “*Guide to the expression of uncertainty in measurement*” definisan od strane JCGM (*Joint Committee for Guides in Metrology*) predstavlja *de facto* standard za oblast procene merne nesigurnosti [55]-[60]. Da bi se tačno i ispravno predstavio rezultat merenja u praksi, potrebno je navesti nedvosmislenu procenu fizičke veličine dobijenu merenjem i odgovarajuću vrednost merne nesigurnosti [55]-[56]. Za potrebe ispitivanja usklađenosti nekog proizvoda sa propisanim specifikacijama, kao što je slučaj instalacije bazne stanice sa referentnim graničnim nivoima, pored vrednosti rezultata merenja u obzir mora biti uzeta i vrednost merne nesigurnosti [59].

Pre definisanja osnovnih postupaka za analizu merne nesigurnosti, u nastavku su navedene definicije osnovnih metroloških pojmova [60]-[61]:

- **Tačna vrednost** - Pretpostavlja se da fizička veličina koja se meri ima kvantitativnu vrednost koja se označava kao tačna vrednost i koja se merenjem aproksimira manje ili više precizno.
- **Greška i merna nesigurnost** - Pojmovi greška i merna nesigurnost se često koriste kao sinonimi. Međutim, u suštini ovi pojmovi se odnose na dve različite stvari. Pod greškom se podrazumeva razlika između ishoda merenja i tačne vrednosti. Ova razlika (greška) se može utvrditi tek kada se proceni tačna vrednost. Procenjenoj tačnoj vrednosti se pridružuje merna nesigurnost. Za razliku od grešaka koje se mogu ispraviti, merna nesigurnost ukazuje na vrednost onoga što je ostalo neodređeno u vezi sa utvrđivanjem tačne vrednosti i ne može se ispraviti.
- **Rezolucija** - Rezolucija je karakteristika instrumenta koja daje podatak o mogućnosti razdvajanja dve bliske, ali različite vrednosti merene fizičke veličine.
- **Osetljivost** - Osetljivost je najmanja vrednost promene fizičke veličine koja se može izmeriti mernim sistemom. Osetljivost je karakteristika mernog instrumenta i merne metode koja se koristi.
- **Ponovljivost** - Ponovljivost predstavlja meru koja opisuje rezultate dobijene sprovođenjem uzastopnih merenja iste merene fizičke veličine sa istim mernim sistemom, korišćenjem iste merne metode, na istoj lokaciji i u kratkom vremenskom intervalu. Jasno je da se merenjima ovog tipa isključuju promene sistematskih efekata. Iz tog razloga, smatra se da se ponovljivost odnosi na slučajne izvore merne nesigurnosti.
- **Tačnost** - Tačnost je mera bliskosti ishoda merenja i tačne vrednosti. Tačnost je mera nesigurnosti koja potiče od nedovoljnog poznavanja sistematske greške.
- **Preciznost** - Preciznost je mera pouzdanosti mernog sistema, odnosno karakteristika mernog sistema da se ponovnim merenjem pod nepromenjenim uslovima dobije približno isti rezultat. Preciznost se često pogrešno koristi umesto pojma tačnost. Za razliku od tačnosti, preciznost se ne može definisati za jedno merenje. Merni sistem može biti tačan i neprecizan, precizan i netačan, neprecizan i netačan ili precizan i tačan. Na primer, ako neki merni sistem ima sistematsku grešku, povećavanje broja odbiraka generalno povećava preciznost, ali ne povećava tačnost. Sa druge strane, eliminisanje sistematskih grešaka poboljšava tačnost, ali ne menja preciznost.

- **Standardna merna nesigurnost** - Standardna merna nesigurnost predstavlja mernu nesigurnost rezultata merenja koja je izražena kao standardna devijacija.
- **Relativna standardna merna nesigurnost** - U praksi se veoma često standardna merna nesigurnost izražava kao relativna vrednost standardne merne nesigurnosti i izmerene vrednosti fizičke veličine.
- **Kombinovana standardna merna nesigurnost** - Kombinovana standardna merna nesigurnost predstavlja standardnu mernu nesigurnost rezultata merenja određenu kombinovanjem standardnih mernih nesigurnosti ulaznih veličina (parametara).
- **Interval pokrivenosti** - Interval vrednosti merene fizičke veličine, u kojem se nalazi tačna vrednost sa definisanom verovatnoćom, naziva se interval pokrivenosti.
- **Verovatnoća pokrivenosti** - Verovatnoća da se tačna vrednost merene fizičke veličine nalazi u definisanom intervalu pokrivenosti, naziva se verovatnoća pokrivenosti.
- **Faktor pokrivenosti** – Faktor pokrivenosti (ponekad se naziva i faktor proširenja) predstavlja broj veći od jedan, kojim se množi vrednost kombinovane standardne merne nesigurnosti da bi se dobila vrednost proširene merne nesigurnosti. Ovaj faktor zavisi od raspodele koja odgovara fizičkoj veličini koja se meri i izabrane verovatnoće pokrivenosti.
- **Proširena merna nesigurnost** - Proširena merna nesigurnost predstavlja proizvod kombinovane standardne merne nesigurnosti i faktora proširenja.
- **Procena merne nesigurnosti tipa A** - Procena komponenti merne nesigurnosti korišćenjem statističke analize rezultata merenja fizičke veličine spovedenih po definisanim uslovima za merenje, naziva se procena merne nesigurnosti tipa A.
- **Procena merne nesigurnosti tipa B** - Procena komponenti merne nesigurnosti korišćenjem bilo koje druge metode izuzev metode tipa A, naziva se procena merne nesigurnosti tipa B.

Da bi se kvalitetno izmerila vrednost neke fizičke veličine, neophodno je poznavati model mernog sistema, kao i funkcionalne relacije koje postoje između merene fizičke veličine  $Y$  i određenog broja drugih značajnih veličina  $X_i$  (ulaznih parametara) sa kojima je veličina koja se meri povezana [55]. Čak i u jednostavnim slučajevima, kao što su oni koji će biti detaljnije analizirani, u kojima merni instrument

direktno prikazuje vrednost intenziteta električnog polja, merenje je u suštini indirektno. To praktično znači da izmerena vrednost zavisi od određenog broja ulaznih veličina  $X_i$ .

Zakon propagacije nesigurnosti (propagacije raspodela verovatnoća) definiše efekat koji merne nesigurnosti ulaznih veličina imaju na konačni rezultat. Ovaj zakon, u stvari, predstavlja metod za kombinovanje mernih nesigurnosti ulaznih veličina da bi se odredila vrednost merne nesigurnosti rezultata merenja. Svaki put kad procena merne nesigurnosti podrazumeva više ulaznih parametara, primena propagacije nesigurnosti je neophodna za određivanje merne nesigurnosti rezultata. Pored zakona propagacije nesigurnosti mogu se koristiti analitičke metode i MCM (*Monte Carlo method*) metod. Analitičke metode se primenjuju kad je moguće odrediti aritmetički izraz za raspodelu verovatnoća krajnjeg rezultata, i mogu biti primenjene samo u relativno prostim slučajevima [62]-[63]. Korišćenjem MCM metoda, raspodela verovatnoća krajnjeg rezultata određuje se numeričkim putem, kombinovanjem raspodela verovatnoća ulaznih parametara [56], [64]-[65].

Polazeći od sveobuhvatnih i detaljnih analiza datih u [55], estimat merene veličine se može napisati kao funkcija:

$$y=f(x_1, x_2, \dots, x_N) \quad (3.1)$$

gde je  $x_i$  skup opservacija ili procena vrednosti veličina  $X_i$ .

Znajući standardne merne nesigurnosti (standardne devijacije) ulaznih veličina  $X_i$ , može se izvesti standardna devijacija izlazne veličine  $Y$ , u skladu sa zakonom propagacije nesigurnosti koji je prvenstveno primenljiv za nekorelisane ulazne promenljive [55]. U tom slučaju, kombinovana (ukupna) standardna merne nesigurnost izlazne veličine  $u_c(y)$  može se predstaviti u formi:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \cdot u^2(x_i) = \sum_{i=1}^N c_i^2 \cdot u^2(x_i) \quad (3.2)$$

gde su:

$u(x_i)$  - standardne merne nesigurnosti ulaznih vrednosti  $x_i$ ,

$c_i = (\partial f / \partial x_i)$  - koeficijenti osetljivosti, i



$u_c(y)$  - kombinovana standardna merna nesigurnost koja predstavlja estimat standardne devijacije koja karakteriše disperziju izlaznih vrednosti i koja se može pridružiti merenim vrednostima.

Praktično, koeficijenti osetljivosti  $c_i$  definišu uticaj promene procene ulaznog parametra  $x_i$  na procenu izlazne veličine  $y$ , odnosno definišu koliko je  $y$  "osetljiv" na promenu ulaznog parametra. Zbog toga se oni u statističkom smislu smatraju težinskim koeficijentima kojima se množe standardne merne nesigurnosti ulaznih parametara, kako bi se odredila kombinovana standardna nesigurnost.

Načini procene standardne merne nesigurnosti se u osnovi klasifikuju u dve kategorije [55], [66]: procena standardne merne nesigurnosti tipa A i procena standardne merne nesigurnosti tipa B. U slučaju procene standardne merne nesigurnosti tipa A radi se o statističkim uzorku, koji potiče iz serije ispitivanja vrednosti fizičke veličine. Na ovaj uzorak se primenjuju standardni statistički alati u cilju određivanja najbolje procene vrednosti fizičke veličine i njene standardne devijacije. U slučaju procene standardne merne nesigurnosti tipa B ne postoji statistički uzorak, već samo podatak koji potiče ili iz eksternog izvora (kao što su tehničke specifikacije uređaja ili uverenja o etaloniranju) ili je to izbor operatora (npr., u slučaju kada su sistematski efekti slabo poznati i kada se pravi njihova procena kako bi se sprovele neophodne korekcije). Procena odgovarajuće standardne devijacije se u tom slučaju ne sprovodi uobičajenim statističkim metodama.

Kombinovanoj standardnoj mernoj nesigurnosti koja odgovara rezultatu merenja generalno se pridružuje interval pokrivenosti [55], [67]. Interval pokrivenosti je interval u kome se sa unapred definisanom verovatnoćom nalazi tačna vrednost merene fizičke veličine. Naime, umesto da se ispitivana fizička veličina procenjuje samo preko jedne jedinstvene vrednosti, uvodi se interval vrednosti u okviru koga se sa unapred definisanom verovatnoćom nalazi tačna vrednost ispitivane veličine. Kvantitativna procena merne nesigurnosti koja ispunjava ovaj zahtev naziva se proširena merna nesigurnost. Proširena merna nesigurnost se dobija množenjem kombinovane standardne merne nesigurnosti sa odgovarajućim faktorom  $k$  (faktor pokrivenosti) čije su vrednosti najčešće između 1.96 i 3 [68].

Određivanje intervala pokrivenosti, koji svakako zavisi od odgovarajuće raspodele verovatnoće, sastoji se u identifikovanju dve granice u okviru kojih se tačna vrednost

merene veličine može naći sa definisanom verovatnoćom (odnosno nivoom poverenja). Pri tome, posebno treba naglasiti da prilikom određivanja intervala pokrivenosti postoji problem koji se sastoji u tome što se zapravo ne zna tačna raspodela verovatnoće izlazne veličine, već samo njena procena.

Da bi se adekvatnije procenila kombinovana merna nesigurnost, moguće je procenu merne nesigurnosti vršiti korišćenjem više metoda, polazeći od onih jednostavnijih koje podrazumevaju velike vrednosti (konzervativne metode, manje tačne metode), ka metodama sa razumno pouzdanim vrednostima gde se prilikom procene merne nesigurnosti posmatraju samo određeni intervali ulaznih parametara.

Procena merne nesigurnosti rezultata merenja elektromagnetnog polja podrazumeva primenu osnovnih statističkih pravila uz adekvatno razumevanje metode merenja, kao i načina rada instrumenata koji se koriste. Generalno, merna nesigurnost se može proceniti uzimajući u obzir generičke (kataloške) vrednosti svih mernih nesigurnosti značajnih ulaznih parametara. Takvim pristupom se dobijaju relativno velike vrednosti procenjene merne nesigurnosti rezultata merenja. Ipak, procenjena merna nesigurnost se može značajno smanjiti ako se raspolože preciznijim informacijama o karakteristikama elektromagnetnog polja koje se ispituje, kao i o karakteristikama mernog sistema. Za ove potrebe standardno se koriste kako tehničke specifikacije, tako i podaci iz uverenja o etaloniranju mernih instrumenata.

Procena merne nesigurnosti rezultata merenja elektromagnetnog polja razmatrana je u radovima [61], [69]-[75]. Na osnovu standarda [39]-[41], uzimajući u obzir navedene radove, razvijena je praktična metoda za procenu merne nesigurnosti rezultata merenja intenziteta električnog polja, koja se primenjuje u okviru Laboratorije za radio-komunikacije. Razvijena metoda obuhvata procenu kombinovane standardne merne nesigurnosti i proširene merne nesigurnosti za slučajeve širokopojasnog mernog sistema i frekvencijski selektivnog mernog sistema.

### **3.1 Procena merne nesigurnosti za slučaj širokopojasnog mernog sistema**

Da bi se prema [55] procenila merna nesigurnost, generalno je potrebno poznavati model mernog sistema. U slučaju koji se ovde razmatra merenje se obavlja integriranim mernim sistemom koji direktno prikazuje izmerene vrednosti. Ovakvo merenje, kao što je već ranije navedeno, ipak se smatra indirektnim. U ovom slučaju procena merne

nesigurnosti se izvodi uglavnom na osnovu parametara koji se mogu naći u tehničkim specifikacijama i uverenjima o etaloniranju mernog sistema, a na osnovu pridruženih standardnih mernih nesigurnosti.

U nastavku je na bazi [39]-[41] i [61] formirana procedura za procenu merne nesigurnosti širokopojasnog mernog sistema, i dat je pregled značajnih komponenti koje doprinose mernoj nesigurnosti.

### ***Nesigurnost etaloniranja mernog sistema***

U fazi etaloniranja, merni sistem se postavlja u konstantno električno polje poznatog intenziteta. Ovaj intenzitet električnog polja se obezbeđuje sa izvesnom nesigurnošću koja direktno zavisi od kalibracionog lanca: mernog uređaja, korišćene antene, karakteristika merne prostorije, TEM ćelija, itd. Ovaj nivo nesigurnosti odgovara zapravo mernoj nesigurnosti laboratorije za etaloniranje (to su vrednosti koje su navedene u obimu akreditacije laboratorije) i one zavise od nivoa polja i frekvencije.

Laboratorije za etaloniranje, za svaku pojedinačnu vrednost, u uverenje o etaloniranju upisuju odgovarajuću vrednost proširene merne nesigurnosti. Smatra se da je funkcija gustine verovatnoće za ovaj tip nesigurnosti Gausovog tipa.

### ***Nesigurnost frekvencijskog odziva mernog sistema***

Standardno, u okviru tehničkih specifikacija mernog sistema navodi se širina propusnog opsega merne sonde i podatak o tome koliko je karakteristika prenosa ravna u okviru propusnog opsega (nepravilnost karakteristike se se izražava u dB ili u %). Ovaj podatak je od velikog značaja za procenu merne nesigurnosti u situacijama kada radne frekvencije elektromagnetnih izvora nisu poznate, kao i u slučaju merenja kompleksnih elektromagnetnih polja koja potiču od više izvora. Funkcija gustine verovatnoće za ovaj tip nesigurnosti je pravougaona.

### ***Nesigurnost koja potiče od nelinearnosti***

Podatak o nesigurnosti koja potiče od nelinearnosti može se naći u tehničkim specifikacijama i/ili uverenjima o etaloniranju. Treba posebno naglasiti da podaci o nelinearnosti važe samo pod pretpostavkom da se razmatraju vrednosti intenziteta

električnog polja koje nisu na granici osetljivosti uređaja. Smatra se da je funkcija gustine verovatnoće pravougaona.

### ***Nesigurnost koja potiče od anizotropije***

Anizotropija se definiše kao maksimalno odstupanje od geometrijske srednje vrednosti minimalne i maksimalne izmerene vrednosti kada se senzor rotira oko ortogonalnih osa (npr., držača sonde, itd.). Anizotropija se može odrediti koristeći sledeći izraz:

$$A = 20 \cdot \log_{10} \left( \frac{E_{\max}}{\sqrt{E_{\max} \cdot E_{\min}}} \right) \quad (3.3)$$

gde je  $E$  izmerena vrednost intenziteta električnog polja.

Smatra se da je funkcija raspodele verovatnoće za nesigurnost koja potiče od anizotropije ovu nesigurnost pravougaona.

### ***Nesigurnost koja potiče od temperaturnih varijacija***

U okviru tehničkih specifikacija senzora standardno se navode ili najveća odstupanja u zavisnosti od temperaturnih promena u definisanom temperaturnom opsegu ili odstupanje po  $1^{\circ}\text{C}$  u odnosu na temperaturu prosečnog radnog okruženja (obično  $23^{\circ}\text{C}$ ). Primer: Ako je naveden podatak o devijaciji od  $0.02 \text{ dB}/^{\circ}\text{C}$  normalizovano na temperaturu od  $23^{\circ}\text{C}$ , prvo je neophodno razmotriti maksimalni temperaturni radni opseg instrumenta. Ako je temperaturni opseg rada instrumenta od  $10$  do  $40^{\circ}\text{C}$ , maksimalni varijacija u odnosu na  $23^{\circ}\text{C}$  je  $17^{\circ}\text{C}$  što odgovara maksimalnom odstupanju od  $0.34\text{dB}$ . Podrazumevajući da je funkcija raspodele verovatnoće pravougaona, relativna standardna nesigurnost iznosi  $2.3\%$ .

### ***Nesigurnost koja potiče od rezolucije mernog sistema***

Nesigurnost rezolucije mernog sistema potiče od diskretne prirode indikatora mernog sistema. Standardna nesigurnost koja potiče od rezolucije mernog sistema određuje se kao maksimalni količnik polovine rezolucije mernog sistema i vrednosti

koja se meri u opsegu rada mernog sistema. Pri tome, podrazumeva se da je funkcija raspodele pravougaona.

### ***Nesigurnost koja potiče od električnog šuma***

Električni šum predstavlja signal detektovan od strane mernog sistema čak i u situaciji kada izvor elektromagnetnog polja koji se ispituje ne radi, tj. ne vrši se emisija. Izvori ovog signala podrazumevaju radio-frekvencijski šum (prekidački uređaji, uzemljenje sistema napajanja laboratorije, itd.), elektrostatičke efekte (pomeranje merne sonde, kretanje ljudi, itd.) i druge efekte (osvetljenje, temperatura, itd.). Nivo električnog šuma se određuje tako što se na tri različita načina grubo skenira frekvencijski opseg, pri čemu je izvor elektromagnetnog polja koji se ispituje isključen. Ako se u svim ispitivanim slučajevima dobije vrednost koja je najmanje 25dB ispod najniže vrednosti nivoa elektromagnetnog polja koje se ispituje, nesigurnost koja potiče od ovog šuma treba da se zanemari.

### ***Nesigurnost koja potiče od lanca snage***

Neprikladno u lancu snage dovodi do nesigurnosti u proceni emitovane snage preko snage izmerene od strane mernog sistema. Ova nesigurnost se u proračun ukupne merne nesigurnosti uzima u okviru postupka određivanja nesigurnosti ponovljivosti merenja [61].

### ***Nesigurnost koja potiče od nestabilnosti postavljene snage izvora, mernog uređaja, temperature i vlažnosti***

Nestabilnost ovog tipa potiče od elektronskih sklopova izvora elektromagnetnog polja koje se ispituje i mernog sistema, kao i od temperature i vlažnosti. Po pravilu, ukupna greška ovog tipa manja je od 5% [39]. Pri tome, podrazumeva se da je funkcija raspodele pravougaona. Na ovom mestu posebno treba naglasiti nekoliko važnih činjenica:

- nesigurnost koja potiče od temperaturnih varijacija merne opreme uzima se u razmatranje kroz poseban faktor nesigurnosti (razmotreno u prethodnom tekstu),
- prema specifikaciji proizvođača nesigurnost koja potiče od vlažnosti se može zanemariti (uz poštovanje definisanih uslova rada instrumenta),

- nestabilnost mernog sistema uzrokovana elektronskim sklopovima uzima se u razmatranje kroz posebne faktore nesigurnosti (razmotreno u prethodnom tekstu),
- izvori elektromagnetnog polja koji po tipu pripadaju savremenim profesionalnim radio-sistemima (bazne stanice javnih mobilnih sistema, TV i FM radio-predajnici, satelitski predajnici itd.) po pravilu rade u kontrolisanim ambijentalnim uslovima (korišćenje klima uređaja, dehidratora,...). Nesigurnost koja potiče od nestabilnosti postavljene snage izvora u ovom slučaju manja je od 2%. U svim ostalim slučajevima koristi se vrednost od 5% predviđena standardom [41].

Podrazumeva se da je funkcija raspodele pravougaona.

### ***Nesigurnost koja potiče od varijabilnosti uzrokovane okruženjem***

Varijabilnost uzrokovana okruženjem potiče od više faktora:

- od reflektovanih talasa,
- od tačnosti pozicioniranja izvora i mernog sistema,
- od uticaja kablova i merne opreme,
- od pozadinskog nivoa elektromagnetnog polja.

Nesigurnost koju unosi varijabilnost uzrokovana okruženjem u proračun ukupne nesigurnosti uzima se kroz proces određivanja nesigurnosti ponovljivosti merenja [61], na način kako će to biti objašnjeno u nastavku teksta.

### ***Nesigurnost koja potiče od tela ispitivača***

Prisustvo tela ispitivača tokom sprovođenja merenja utiče na rezultat merenja. Nesigurnost koju unosi prisustvo tela ispitivača u proračun ukupne nesigurnosti uzima se kroz proces određivanja nesigurnosti ponovljivosti merenja [61], na način kako će to biti objašnjeno u nastavku teksta.

### ***Nesigurnost koja potiče od prostornog usrednjavanja (Post-Processing)***

Jedna od karakteristika propagacije elektromagnetnih talasa jeste prostiranje po višestrukim putanjama. Ova pojava dovodi do vremenske i prostorne nestabilnosti nivoa signala na prijemu (*fading*). Prema standardu [40], da bi se procenila izloženost ljudi elektromagnetnom polju neophodno je sprovesti višestruka ispitivanja (na linijski ili

površinski definisanim pozicijama), kao i naknadne obrade rezultata tih ispitivanja (tj. izvršiti prostorno usrednjavanje).

Nesigurnost koja potiče od prostornog urednjavanja može se odrediti na osnovu [40]. Za potrebe procene izloženosti ljudi elektromagnetnim poljima, višestruka ispitivanja se sprovode na tri pozicije, tako da prema [40] vrednost nesigurnosti ovog tipa iznosi 2.39dB.

Osim prethodno navedene naknadne obrade rezultata ispitivanja neohodne za ispitivanja prema standardu [40], druge naknadne obrade merenih rezultata se ne sprovode.

### ***Nesigurnost ponovljivosti merenja***

Pored prethodno navedenih nesigurnosti koje potiču od mernog sistema, da bi se odredila ukupna merna nesigurnost u obzir se moraju uzeti i slučajne greške koje su posledica nepredvidivosti uslova tokom ispitivanja (nesigurnost ponovljivosti merenja pod istim uslovima).

Između ostalog, kroz ovu nesigurnost implicitno se u obzir uzimaju nesigurnost koja potiče od električnog šuma, nesigurnost koja potiče od lanca snage, nesigurnost koja potiče od tela ispitivača i nesigurnost koja potiče od varijabilnosti uzrokovane okruženjem. Iz tog razloga, njih nije potrebno posebno uzimati u obzir prilikom proračuna ukupne merne nesigurnosti.

Nesigurnosti ovog tipa se određuju statističkom analizom serije ponovljenih merenja (pod istim uslovima). U prvom koraku određuju se srednja vrednost  $E_{meas}$  i standardna devijacija  $\sigma(E_{meas})$ :

$$E_{meas} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_{meas\ i} \quad (3.4)$$

$$\sigma(E_{meas}) = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (E_{meas\ i} - E_{meas})^2} \quad (3.5)$$

gde  $E_{meas\ i}$  označava ishod  $i$ -tog merenja od ukupno  $N$  merenja.

Relativan odnos standardne devijacije  $\sigma(E_{meas})$  i srednje vrednosti  $E_{meas}$  definiše relativnu standardnu mernu nesigurnost ponovljivosti merenja  $u$ :

$$u = \frac{\sigma(E_{meas})}{E_{meas}} \quad (3.6)$$

Za potrebe određivanja nesigurnosti ponovljivosti merenja, merenja treba ponoviti pod istim uslovima najmanje 5 puta.

### ***Nesigurnost koja potiče od telekomunikacionog saobraćaja***

U slučaju pojedinih tipova radio-predajnika (bazne stanice javne mobilne telefonije, bazne stanice sistema namenjenih za prenos podataka, ...), nivo elektromagnetne emisije direktno zavisi od saobraćajnog opterećenja. Iz tog razloga, u obzir se mora uzeti dopunska nesigurnost koja potiče od telekomunikacionog saobraćaja. Vrednost nesigurnosti ovog tipa, određuje se na osnovu dnevnog profila saobraćaja dobijenog od imalaca sistema koji se ispituju (po pravilu operatora).

### ***Kombinovana standardna merna nesigurnost***

Vrednosti nesigurnosti koje potiču direktno od mernog sistema (na osnovu uverenja o etaloniranju i tehničkih specifikacija) u principu se mogu određivati na dva načina:

- Usvajanjem odgovarajućih vrednosti iz opsega vrednosti veličine koja se ispituje (npr., razmatraju se samo podaci iz frekvencijskog opsega izvora koji se ispituju, vrednost temperature i sl.). Na ovaj način se dobijaju manje vrednosti ukupne merne nesigurnosti, ali se za svako ispitivanje zahteva sprovođenje postupka utvrđivanja vrednosti pojedinačnih nesigurnosti koje potiču od mernog sistema.
- Usvajanjem vrednosti iz šireg (ili celokupnog) opsega rada instrumenta, pri čemu se dobijaju veće vrednosti ukupne merne nesigurnosti, ali se utvrđivanje vrednosti pojedinačnih nesigurnosti koje potiču od mernog sistema sprovodi samo jedanput.

U okviru ove procedure primenjuje se drugi način. Polazeći od pretpostavke da su pojedinačni uzroci međusobno nekorelisani, ukupna merna nesigurnost se određuje kao kvadratni koren zbira kvadrata pojedinačnih nesigurnosti.



### ***Proširena merna nesigurnost***

Proširena merna nesigurnost se dobija množenjem ukupne merne nesigurnosti faktorom  $k=1.96$ , koji odgovara intervalu poverenja od 95%, kao što je predloženo međunarodnim standardima [39]-[41].

### ***Procena merne nesigurnosti širokopojasnog mernog sistema NARDA EMR300 & TYPE 9C sonda***

Pretpostavka je da je na osnovu sprovedene serije merenja određena merna nesigurnost ponovljivosti merenja u iznosu od 14.6%. Na osnovu podataka iz uverenja o etaloniranju za merni sistem koji je u vlasništvu Laboratorije za radio-komunikacije, procenjena je merna nesigurnost na način kako je to prikazano u tabeli 3.1.

**Tabela 3.1** Procena relativne merne nesigurnosti širokopojasnog mernog sistema  
NARDA EMR300 & TYPE 9C sonda

Uzrok nesigurnosti	Referenca	Specificirana nesigurnost [%]	Raspodela	Faktor skaliranja	Standardna nesigurnost
Etaloniranje sonde	uverenje o etaloniranju	15.40	normalna (k=2)	2.00	7.70
Linearnost	uverenje o etaloniranju	16.00	pravougaona	1.73	9.25
Frekvencijski odziv	uverenje o etaloniranju	39.00	pravougaona	1.73	22.54
Anizotropija	uverenje o etaloniranju	2.80	pravougaona	1.73	1.62
Temperaturne varijacije (0-50°C)	<i>datasheet</i>	9.60	pravougaona	1.73	5.55
Rezolucija mernog sistema	<i>datasheet</i>	0.41	pravougaona	1.73	0.24
Kombinovana standardna merna nesigurnost mernog sistema [%]:					26.20
Faktor proširenja:					1.96
<b>Proširena merna nesigurnost mernog sistema [%]:</b>					<b>51.35</b>
Nestabilnost izvora	<i>datasheet</i>	2.00	pravougaona	1.73	1.16
Saobraćajno opterećenje*	karakteristika sistema	4.80	normalna (k=1)	1.00	4.80
Ponovljivost merenja	serija merenja	14.60	normalna (k=1)	1.00	14.60
<i>Post-processing</i> **	standard	-	normalna (k=1)	1.00	-
* - ne koristi se kada se ispitivanje vrši ekstrapolacija po standardu EN 50492:2008/A1:2014					
** - koristi se isključivo kada se vrši prostorno usrednjavanje po standardu EN 50492:2008/A1:2014					
Kombinovana standardna merna nesigurnost merenja [%]:					30.40
Faktor proširenja:					1.96
<b>Proširena merna nesigurnost merenja [%]:</b>					<b>59.58</b>

**Procena merne nesigurnosti širokopojasnog mernog sistema NARDA EMR300 & TYPE 18C sonda**

Prepostavka je da je na osnovu sprovedene serije merenja određena nesigurnost ponovljivosti merenja u iznosu od 15.2%. Na osnovu podataka iz uverenja o

etaloniranju za merni sistem koji je u vlasništvu Laboratorije za radio-komunikacije, procenjena je merna nesigurnost na način kako je to prikazano u tabeli 3.2.

**Tabela 3.2** Procena relativne merne nesigurnosti širokopojasnog mernog sistema  
NARDA EMR300 & TYPE 18C sonda

Uzrok nesigurnosti	Referenca	Specificirana nesigurnost [%]	Raspodela	Faktor skaliranja	Standardna nesigurnost
Etaloniranje sonde	uverenje o etaloniranju	13.30	normalna (k=2)	2.00	6.65
Linearnost	uverenje o etaloniranju	17.00	pravougaona	1.73	9.83
Frekvencijski odziv	uverenje o etaloniranju	48.00	pravougaona	1.73	27.75
Anizotropija	uverenje o etaloniranju	3.60	pravougaona	1.73	2.08
Temperaturne varijacije (0-50°C)	<i>datasheet</i>	9.60	pravougaona	1.73	5.55
Rezolucija mernog sistema	<i>datasheet</i>	2.50	pravougaona	1.73	1.45
Kombinovana standardna merna nesigurnost mernog sistema [%]:					30.79
Faktor proširenja:					1.96
<b>Proširena merna nesigurnost mernog sistema [%]:</b>					<b>60.34</b>
Nestabilnost izvora	<i>datasheet</i>	2.00	pravougaona	1.73	1.16
Saobraćajno opterećenje*	karakteristika sistema	4.80	normalna (k=1)	1.00	4.80
Ponovljivost merenja	serija merenja	15.20	normalna (k=1)	1.00	15.20
<i>Post-processing</i> **	standard	-	normalna (k=1)	1.00	-
* - ne koristi se kada se ispitivanje vrši ekstrapolacija po standardu EN 50492:2008/A1:2014					
** - koristi se isključivo kada se vrši prostorno usrednjavanje po standardu EN 50492:2008/A1:2014					
Kombinovana standardna merna nesigurnost merenja [%]:					34.69
Faktor proširenja:					1.96
<b>Proširena merna nesigurnost merenja [%]:</b>					<b>67.99</b>

### 3.2 Procena merne nesigurnosti za slučaj frekvencijski selektivnog mernog sistema

Merenje intenziteta električnog polja korišćenjem frekvencijski selektivnog mernog sistema obavlja se integrisanim sistemom koji direktno prikazuje izmerene vrednosti. Kao i u slučaju širokopoljarnog mernog sistema, ovakvo merenje se ipak smatra indirektnim. U ovom slučaju procena merne nesigurnosti se izvodi uglavnom na osnovu parametara koji se mogu naći u tehničkim specifikacijama i uverenjima o etaloniranju mernog sistema, a na osnovu pridruženih standardnih nesigurnosti.

U nastavku je na bazi [39]-[41] i [76] formirana procedura za procenu merne nesigurnosti frekvencijski selektivnog mernog mernog sistema, i dat je pregled značajnih komponenti koje doprinose mernoj nesigurnosti.

#### *Nesigurnost mernog prijemnika/spektralnog analizatora*

Nesigurnost korišćenog mernog uređaja (mernog prijemnika/spektralnog analizatora) se može odrediti na dva načina:

- na osnovu tehničkih specifikacija proizvođača (uz uslov da su značajne karakteristike analizatora u propisanim granicama tačnosti, što se dokazuje uverenjem o etaloniranju), ili
- na osnovu podataka iz uverenja o etaloniranju za pojedine karakteristike uređaja i na osnovu tehničkih specifikacija proizvođača uz poznavanje “modela” mernog uređaja.

Korišćenjem drugog pristupa se po pravilu dobijaju manje vrednosti nesigurnosti, što obezbeđuje sprovođenje merenja veće tačnosti.

U okviru ove procedure biće primenjen prvi pristup. Prema specifikaciji proizvođača funkcija gustine verovatnoće za ovaj tip nesigurnosti je pravougaona.

#### *Nesigurnost etaloniranja merne sonde*

U fazi etaloniranja, merna sonda se postavlja u konstantno električno polje poznatog intenziteta. U tako definisanim uslovima određuju se tzv. antenski faktori. Postavljeni intenzitet električnog polja se obezbeđuje sa izvesnom nesigurnošću koja direktno zavisi od kalibracionog lanca: frekvencije, mernog uređaja, korišćene antene, karakteristika merne prostorije, TEM ćelija, itd. Laboratorija za etaloniranje u uverenje

o etaloniranju upisuje proširenu nesigurnost sa kojom su određeni antenski faktori. Smatra se da je funkcija gustine verovatnoće za ovaj tip nesigurnosti Gausovog tipa.

### ***Nesigurnost interpolacije faktora antene***

Tokom etaloniranja, faktori antene se određuju za diskretne radne frekvencije. Za frekvencije koje ne odgovaraju frekvencijama za koje su određeni faktori antene vrši se interpolacija. Interpolacioni postupak unosi dopunsku nesigurnost. Nesigurnost ovog tipa može se odrediti na osnovu uverenja o etaloniranju. Smatra se da je funkcija gustine verovatnoće za ovaj tip nesigurnosti Gausovog tipa.

### ***Nesigurnost koja potiče od anizotropije***

Anizotropija se definiše kao maksimalno odstupanje od geometrijske srednje vrednosti minimalne i maksimalne izmerene vrednosti kada se senzor rotira oko ortogonalnih osa (npr., držača sonde, itd.). Anizotropija se može odrediti koristeći sledeći izraz:

$$A = 20 \cdot \log_{10} \left( \frac{E_{\max}}{\sqrt{E_{\max} \cdot E_{\min}}} \right) \quad (3.7)$$

gde je  $E$  izmerena vrednost intenziteta električnog polja.

Smatra se da je funkcija raspodele verovatnoće za nesigurnost koja potiče od anizotropije ovu nesigurnost pravougaona.

### ***Nesigurnost koja potiče od neprilagođenja***

Kada se dva elementa radio-opreme povežu međusobno, u izvesnoj meri dolazi do pojave neprilagođenja. U vezi sa ovim neprilagođenjem uvodi se posebna komponenta nesigurnosti. Prema uputstvu proizvođača, gornja granica nesigurnost  $u$  koja potiče od neprilagođenja određuje se na sledeći način:

$$u = 100 \cdot \Gamma_e \Gamma_a \quad \% \quad (3.8)$$

gde je  $\Gamma_e$  koeficijent refleksije analizatora, a  $\Gamma_a$  koeficijent refleksije merne sonde.

Tačne vrednosti faktora neprilagođenja (koji inače u RF kolima ima kompleksnu vrednost) obično nisu poznate za pojedinačne frekvencijske komponente, ali se po principu vrednosti najgoreg slučaja može koristiti vrednost faktora određenog za ceo frekvencijski opseg. Takav pristup se primenjuje i za potrebe izračunavanja ukupne merene nesigurnosti. Naravno, na ovaj način se generalno dobijaju veće vrednosti merne nesigurnosti nego što se zaista odnose na konkretan slučaj. Smatra da ovoj nesigurnosti odgovara funkcija raspodele verovatnoće U tipa.

### ***Nesigurnost koja potiče od električnog šuma***

Električni šum predstavlja signal detektovan od strane mernog sistema čak i u situaciji kada izvor elektromagnetnog polja koji se ispituje ne radi, tj. ne vrši se emisija. Izvori ovog signala podrazumevaju radio-frekvencijski šum (prekidački uređaji, uzemljenje sistema napajanja laboratorije, itd.), elektrostatičke efekte (pomeranje merne sonde, kretanje ljudi, itd.) i druge efekte (osvetljenje, temperatura, itd.). Nivo električnog šuma se određuje tako što se na tri različita načina grubo skenira frekvencijski opseg, pri čemu je izvor elektromagnetnog polja koji se ispituje isključen. Ako se u svim ispitivanim slučajevima dobije vrednost koja je najmanje 25dB ispod najniže vrednosti nivoa elektromagnetnog polja koje se ispituje, nesigurnost koja potiče od ovog šuma treba da se zanemari.

### ***Nesigurnost koja potiče od lanca snage***

Neprikladno u lancu snage dovodi do nesigurnosti u proceni emitovane snage preko snage izmerene od strane mernog sistema. Ova nesigurnost se u proračun ukupne merne nesigurnosti uzima u okviru postupka određivanja nesigurnosti ponovljivosti merenja [61].

### ***Nesigurnost koja potiče od nestabilnosti postavljene snage izvora, mernog uređaja, temperature i vlažnosti***

Nestabilnost ovog tipa potiče od elektronskih sklopova izvora elektromagnetnog polja koje se ispituje i mernog sistema, kao i od temperature i vlažnosti. Po pravilu, ukupna greška ovog tipa manja je od 5% [39]. Pri tome, podrazumeva se da je funkcija

raspodele pravougaona. Na ovom mestu posebno treba naglasiti nekoliko važnih činjenica:

- nesigurnost koja potiče od temperaturnih varijacija merne opreme uzima se u razmatranje kroz poseban faktor nesigurnosti (razmotreno u prethodnom tekstu),
- prema specifikaciji proizvođača nesigurnost koja potiče od vlažnosti se može zanemariti (uz poštovanje definisanih uslova rada instrumenta),
- nestabilnost mernog sistema uzrokovana elektronskim sklopovima uzima se u razmatranje kroz posebne faktore nesigurnosti (razmotreno u prethodnom tekstu),
- izvori elektromagnetnog polja koji po tipu pripadaju savremenim profesionalnim radio-sistemima (bazne stanice javnih mobilnih sistema, TV i FM radio-predajnici, satelitski predajnici itd.) po pravilu rade u kontrolisanim ambijentalnim uslovima (korišćenje klima uređaja, dehidratora,...). Nesigurnost koja potiče od nestabilnosti postavljene snage izvora u ovom slučaju manja je od 2%. U svim ostalim slučajevima koristi se vrednost od 5% predviđena standardom [41].

Podrazumeva se da je funkcija raspodele pravougaona.

### ***Nesigurnost koja potiče od varijabilnosti uzrokovane okruženjem***

Varijabilnost uzrokovana okruženjem potiče od više faktora:

- od reflektovanih talasa,
- od tačnosti pozicioniranja izvora i mernog sistema,
- od uticaja kablova i merne opreme,
- od pozadinskog nivoa elektromagnetnog polja.

Nesigurnost koju unosi varijabilnost uzrokovana okruženjem u proračun ukupne nesigurnosti uzima se kroz proces određivanja nesigurnosti ponovljivosti merenja [61], na način kako će to biti objašnjeno u nastavku teksta.

### ***Nesigurnost koja potiče od tela ispitivača***

Prisustvo tela ispitivača tokom sprovođenja merenja utiče na mereni rezultat. Nesigurnost koju unosi prisustvo tela ispitivača u proračun ukupne nesigurnosti uzima se kroz proces određivanja nesigurnosti ponovljivosti merenja [61], na način kako će to biti objašnjeno u nastavku teksta.

### ***Nesigurnost koja potiče od prostornog usrednjavanja (Post-Processing)***

Jedna od karakteristika propagacije elektromagnetnih talasa jeste prostiranje po višestrukim putanjama. Ova pojava dovodi do vremenske i prostorne nestabilnosti nivoa signala na prijemu (*fading*). Prema standardu [40], da bi se procenila izloženost ljudi elektromagnetnom polju neophodno je sprovesti višestruka merenja (na linijski ili površinski definisanim pozicijama), kao i naknadne obrade rezultata tih merenja (tj., izvršiti prostorno usrednjavanje).

Nesigurnost koja potiče od prostornog urednjavanja može se odrediti na osnovu [40]. Za potrebe procene izloženosti ljudi elektromagnetnim poljima, višestruka merenja se sprovode na tri pozicije, tako da prema [40] vrednost nesigurnosti ovog tipa iznosi 2.39dB.

Osim prethodno navedene naknadne obrade rezultata ispitivanja neohopodne za ispitivanja prema standardu [40], druge naknadne obrade merenih rezultata se ne sprovode.

### ***Nesigurnost ponovljivosti merenja***

Pored prethodno navedenih nesigurnosti koja potiču od mernog sistema, da bi se odredila ukupna merna nesigurnost u obzir se moraju uzeti i slučajne greške koje su posledica nepredvidivosti uslova tokom ispitivanja (nesigurnost ponovljivosti merenja pod istim uslovima).

Između ostalog, kroz ovu nesigurnost implicitno se u obzir uzimaju nesigurnost koja potiče od električnog šuma, nesigurnost koja potiče od lanca snage, nesigurnost koja potiče od tela ispitivača i nesigurnost koja potiče od varijabilnosti uzrokovane okruženjem. Iz tog razloga, njih nije potrebno posebno uzimati u obzir prilikom proračuna ukupne merne nesigurnosti.

Nesigurnosti ovog tipa se određuju statističkom analizom serije ponovljenih merenja (pod istim uslovima). U prvom koraku određuju se srednja vrednost  $E_{meas}$  i standardna devijacija  $\sigma(E_{meas})$ :

$$E_{meas} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_{meas\ i} \quad (3.9)$$



$$\sigma(E_{meas}) = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (E_{meas\ i} - E_{meas})^2} \quad (3.10)$$

gde  $E_{meas\ i}$  označava ishod  $i$ -tog merenja od ukupno  $N$  merenja.

Relativan odnos standardne devijacije  $\sigma(E_{meas})$  i srednje vrednosti  $E_{meas}$  definiše relativnu standardnu mernu nesigurnost ponovljivosti merenja  $u$ :

$$u = \frac{\sigma(E_{meas})}{E_{meas}} \quad (3.11)$$

Za potrebe određivanja nesigurnosti ponovljivosti merenja, merenja treba ponoviti pod istim uslovima najmanje 5 puta.

### ***Nesigurnost koja potiče od telekomunikacionog saobraćaja***

U slučaju pojedinih tipova radio-predajnika (bazne stanice javne mobilne telefonije, bazne stanice sistema namenjenih za prenos podataka, ...), nivo elektromagnetne emisije direktno zavisi od saobraćajnog opterećenja. Iz tog razloga, u obzir se mora uzeti dopunska nesigurnost koja potiče od telekomunikacionog saobraćaja. Vrednost nesigurnosti ovog tipa, određuje se na osnovu dnevnog profila saobraćaja dobijenog od imalaca sistema koji se ispituju (po pravilu operatora).

### ***Kombinovana standardna merna nesigurnost***

Vrednosti nesigurnosti koje potiču direktno od mernog sistema (na osnovu uverenja o etaloniranju i tehničkih specifikacija) u principu se mogu određivati na dva načina:

- Usvajanjem odgovarajućih vrednosti iz opsega vrednosti veličine koja se ispituje (npr., razmatraju se samo podaci iz frekvencijskog opsega izvora koji se ispituju, vrednost temperature i sl.). Na ovaj način se dobijaju manje vrednosti ukupne merne nesigurnosti, ali se za svako ispitivanje zahteva sprovođenje postupka utvrđivanja vrednosti pojedinačnih nesigurnosti koje potiču od mernog sistema.

- Usvajanjem vrednosti iz šireg (ili celokupnog) opsega rada instrumenta, pri čemu se dobijaju veće vrednosti ukupne merne nesigurnosti, ali se utvrđivanje vrednosti pojedinačnih nesigurnosti koje potiču od mernog sistema sprovodi samo jedanput.

U okviru ove procedure primenjuje se drugi način. Polazeći od pretpostavke da su pojedinačni uzroci međusobno nekorelisani, ukupna merna nesigurnost se određuje kao kvadratni koren zbira kvadrata pojedinačnih nesigurnosti.

### ***Proširena merna nesigurnost***

Proširena merna nesigurnost se dobija množenjem ukupne merne nesigurnosti faktorom  $k=1.96$ , koji odgovara intervalu poverenja od 95%, kao što je predloženo međunarodnim standardima [39]-[41].

### ***Procena merne nesigurnosti frekvencijski selektivnog mernog sistema ROHDE&SCHWARZ FSH6 & TS-EMF sonda***

Za potrebe frekvencijski selektivnog merenja u okviru Laboratorije za radio-komunikacije koristi se merni sistem koji se sastoji od spektralnog analizatora *Rohde&Schwarz* FSH6 i izotropne merne sonde TS-EMF. Pretpostavka je da je na osnovu sprovedene serije merenja određena nesigurnost ponovljivosti merenja u iznosu od 14.0%. Na osnovu podataka iz uverenja o etaloniranju za merni sistem, procenjena je merna nesigurnost na način kako je to prikazano u tabeli 3.3.

**Tabela 3.3 Procena relativne merne nesigurnosti frekvencijski selektivnog mernog sistema ROHDE&SCHWARZ FSH6 & TS-EMF sonda**

Uzrok nesigurnosti	Referenca	Specificirana nesigurnost [%]	Raspodela	Faktor skaliranja	Standardna nesigurnost
Spektralni analizator	<i>datasheet</i>	18.85	pravougaona	1.73	10.90
Etaloniranje merne sonde	uverenje o etaloniranju	23.00	normalna (k=2)	2.00	11.50
Interpolacija faktora antene	uverenje o etaloniranju	2.20	normalna (k=2)	2.00	1.10
Anizotropija	<i>datasheet</i>	27.00	pravougaona	1.73	15.61
VSWR (koeficijent refleksije)	<i>datasheet</i>	6.70 ( $\Gamma_e=0.2$ , $\Gamma_a=0.33$ (VSWR=2))	U-raspodela	1.41	4.75
Kombinovana standardna merna nesigurnost mernog sistema [%]:					22.77
Faktor proširenja:					1.96
<b>Proširena merna nesigurnost mernog sistema [%]:</b>					<b>44.62</b>
Nestabilnost izvora	<i>datasheet</i>	2.00	pravougaona	1.73	1.16
Saobraćajno opterećenje*	karakteristika sistema	7.40	normalna (k=1)	1.00	7.40
Ponovljivost merenja	serija merenja	14.00	normalna (k=1)	1.00	14.00
Post-processing**	standard	-	normalna (k=1)	1.00	-
* - ne koristi se kada se ispitivanje vrši ekstrapolacija po standardu EN 50492:2008/A1:2014					
** - koristi se isključivo kada se vrši prostorno usrednjavanje po standardu EN 50492:2008/A1:2014					
Kombinovana standardna merna nesigurnost merenja [%]:					27.76
Faktor proširenja:					1.96
<b>Proširena merna nesigurnost merenja [%]:</b>					<b>54.40</b>

**Procena merne nesigurnosti frekvencijski selektivnog mernog sistema ROHDE&SCHWARZ TSMU & TS-EMF sonda**

Za potrebe frekvencijski selektivnog merenja UMTS sistema u okviru Laboratorije za radio-komunikacije koristi se merni sistem koji se sastoji od radio-mrežnog analizatora *Rohde&Schwarz* TSMU i izotropne merne sonde TS-EMF. Pretpostavka je da je na osnovu sprovedene serije merenja određena nesigurnost

ponovljivosti merenja u iznosu od 14.0%. Na osnovu podataka iz uverenja o etaloniranju za merni sistem, procenjena je merna nesigurnost na način kako je to prikazano u tabeli 3.4.

**Tabela 3.4** Procena relativne merne nesigurnosti frekvencijski selektivnog mernog sistema ROHDE&SCHWARZ TSMU & TS-EMF sonda

Uzrok nesigurnosti	Referenca	Specificirana nesigurnost [%]	Raspodela	Faktor skaliranja	Standardna nesigurnost
Analizator radio mreže	<i>datasheet</i>	12.2	pravougaona	1.73	7.05
Etaloniranje merne sonde	uverenje o etaloniranju	23.00	normalna (k=2)	2.00	11.50
Interpolacija faktora antene	uverenje o etaloniranju	2.20	normalna (k=2)	2.00	1.10
Anizotropija	<i>datasheet</i>	27.00	pravougaona	1.73	15.61
VSWR (koeficijent refleksije)	<i>datasheet</i>	6.70 ( $\Gamma_e=0.2$ , $\Gamma_a=0.33$ (VSWR=2))	U-raspodela	1.41	4.75
Kombinovana standardna merna nesigurnost mernog sistema [%]:					21.20
Faktor proširenja:					1.96
<b>Proširena merna nesigurnost mernog sistema [%]:</b>					<b>41.55</b>
Nestabilnost izvora	<i>datasheet</i>	2.00	pravougaona	1.73	1.16
Saobraćajno opterećenje*	karakteristika sistema	7.40	normalna (k=1)	1.00	7.40
Ponovljivost merenja	serija merenja	14.00	normalna (k=1)	1.00	14.00
Post-processing**	standard	-	normalna (k=1)	1.00	-
* - ne koristi se kada se ispitivanje vrši ekstrapolacija po standardu EN 50492:2008/A1:2014					
** - koristi se isključivo kada se vrši prostorno usrednjavanje po standardu EN 50492:2008/A1:2014					
Kombinovana standardna merna nesigurnost merenja [%]:					26.48
Faktor proširenja:					1.96
<b>Proširena merna nesigurnost merenja [%]:</b>					<b>51.91</b>

### 3.3 Proračun merne nesigurnosti ukupnog intenziteta električnog polja u slučaju selektivnog merenja pojedinih sistema

Kada na lokaciji postoji više relevantnih izvora elektromagnetnog zračenja, što je najčešće slučaj u praksi, sprovode se frekvencijski selektivna merenja kojima se određuje intenzitet električnog polja za svaki od relevantnih izvora ponaosob. Ukupni intenzitet električnog polja  $E_{tot}$ , koji potiče od  $N$  relevantnih izvora elektromagnetnog zračenja, kao što je već navedeno određuje se u skladu sa relacijom:

$$E_{tot} = \sqrt{\sum_{i=1}^N E_i^2} \quad (3.12)$$

gde  $E_i$  predstavlja izmereni (i ekstrapolirani) intenzitet električnog polja koji potiče od relevantnog izvora  $i$ .

Na bazi poznatih standardnih mernih nesigurnosti intenziteta električnog polja svih relevantnih izvora  $u(E_i)$ , koje se određuju korišćenjem procedure opisane u poglavlju 3.2, može se odrediti kombinovana standardna merna nesigurnost ukupnog intenziteta električnog polja  $u_c(E_{tot})$ . Polazeći od izraza (3.2), baziranog na zakonu propagacije nesigurnosti za nekorelisane ulazne promenljive [55], dobija se da je:

$$u_c^2(E_{tot}) = \sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial E_{tot}}{\partial E_i} \right)^2 \cdot u^2(E_i) \quad (3.13)$$

Primenom izraza (3.12), kojim je definisan ukupni intenzitet električnog polja, sledi da je:

$$u_c(E_{tot}) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left( \frac{E_i}{E_{tot}} \right)^2 \cdot u^2(E_i)} \quad (3.14)$$

Na kraju, kombinovana standardna merna nesigurnost ukupnog intenziteta električnog polja izračunava se pomoću formule:

$$u_c(E_{tot}) = \frac{1}{E_{tot}} \sqrt{\sum_{i=1}^N E_i^2 \cdot u^2(E_i)} \quad (3.15)$$

što je u skladu sa rezultatima prikazanim u radu [69].

### 3.4 Proračun merne nesigurnosti ukupnog faktora izloženosti u slučaju selektivnog merenja pojedinih sistema

Da bi se ispitala usklađenost instalacije bazne stanice sa referentnim graničnim nivoima, neophodno je sprovođenjem frekvencijski selektivnih merenja, izmeriti sve relevantne izvore elektromagnetnog zračenja na lokaciji. Nakon toga, potrebno je proveriti da li je za svaku mernu poziciju zadovoljen kriterijum za istovremeni uticaj više izvora, definisan Pravilnikom o granicama izlaganja nejonizujućim zračenjima [24] i ICNIRP preporukom [1]. Da bi kriterijum za istovremeni uticaj  $N$  izvora bio zadovoljen, ukupni faktor izloženosti  $TER$  mora da bude manji ili jednak 1. Ovom prilikom, merna nesigurnost ukupnog faktora izloženosti  $TER$ , mora biti uzeta u obzir.

Kao što je već navedeno, ukupni faktor izloženosti  $TER$  izračunava se na osnovu relacije:

$$TER = \sum_{i=1}^N ER_i = \sum_{i=1}^N \left( \frac{E_i}{E_{L,i}} \right)^2 \quad (3.16)$$

Na bazi poznatih standardnih mernih nesigurnosti intenziteta električnog polja svih relevantnih izvora  $u(E_i)$ , koje se određuju korišćenjem procedure opisane u poglavlju 3.2, može se odrediti kombinovana standardna merna nesigurnost ukupnog faktora izloženosti  $u_c(TER)$ . Polazeći od izraza (3.2), baziranog na zakonu propagacije nesigurnosti za nekorelisane ulazne promenljive [55], dobija se da je:

$$u_c^2(TER) = \sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial TER}{\partial E_i} \right)^2 \cdot u^2(E_i) \quad (3.17)$$

Primenom izraza (3.16), kojim je definisan ukupni faktor izloženosti  $TER$ , sledi da je:

$$u_c(TER) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left( \frac{2E_i}{E_{L,i}^2} \right)^2 \cdot u^2(E_i)} \quad (3.18)$$

Na kraju, kombinovana standardna merna nesigurnost ukupnog faktora izloženosti *TER* izračunava se pomoću formule:

$$u_c(TER) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{4E_i^2}{E_{L,i}^4} \cdot u^2(E_i)} \quad (3.19)$$

#### **4. POVEĆANJE EFIKASNOSTI METODA ZA MERENJE INTENZITETA ELEKTRIČNOG POLJA SKRAĆIVANJEM INTERVALA USREDNJAVANJA**

Većina standarda koji definišu metode merenja izlaganja ljudi radio-frekvencijskim elektromagnetnim poljima, kao i dokumenti kojima su propisane norme kojima se ograničava izlaganje, definišu 6-minutni interval za usrednjavanje merene veličine elektromagnetnog polja (jačina električnog polja, jačina magnetnog polja, gustina snage) [1], [17]-[21], [23]-[24], [38]-[44]. Izuzetak su norme za opštu ljudsku populaciju definisane FCC regulativom i IEEE standardom, koje propisuju merenje srednje vrednosti u intervalu vremena od 30min. S obzirom da je Pravilnikom o granicama izlaganja nejonizujućim zračenjima [24] i ICNIRP preporukom [1], definisan 6-minutni interval za usrednjavanje, u okviru ovog poglavlja razmatran je 6-minutni interval.

Interval usrednjavanja od 6min potiče od termoregulacione konstante ljudskog tela [16]. Međutim, u praktičnim primenama, prilikom merenja izloženosti ljudi elektromagnetnim poljima GSM/DCS/UMTS baznih stanica, ovako definisan vremenski interval može biti ograničavajući faktor. Naime, na lokaciji bazne stanice merni proces treba sprovesti u relativno kratkom vremenskom periodu kako bi se:

- na najmanju moguću meru svelo uznemiravanje ljudi (u jednom stanu se ne može meriti više sati), i
- ostvarila ekonomska racionalnost (cena sprovođenja mernog postupka mora biti u saglasnosti sa cenom instalirane opreme, a suviše skup merni proces svakako bi pre ili kasnije doveo do otpora sprovođenju merenja zračenja).

Na osnovu osamnaestogodišnjih iskustava autora u okviru Laboratorije za radio-komunikacije, stečenih prilikom merenja na više od 1200 lokacija baznih stanica za 5 operatora javnih mobilnih sistema u Srbiji i Crnoj Gori, proces merenja na lokaciji jedne



bazne stanice ne bi trebalo da traje više od jednog dana, odnosno, po pravilu, ne više od 5-6 sati efektivnog mernog postupka. To praktično znači da striktno poštovanje intervala usrednjavanja od 6min podrazumeva da se na jednoj lokaciji bazne stanice, sa jednim kompletom uređaja, merenje može sprovesti na oko 50 pozicija. Nije teško zaključiti da je ovo ipak relativno skroman broj mernih pozicija, često nedovoljan za kvalitetno i detaljno određivanje raspodele nivoa elektromagnetnog zračenja u neposrednoj okolini bazne stanice.

Sa ciljem da se sa relativno malim povećanjem merne nesigurnosti, omogući merenje na većem broju pozicija, u ovom poglavlju disertacije razmotreno je korišćenje kraćih vremenskih intervala usrednjavanja (15s, 30s i 1min). Za te svrhe, uzimajući u obzir frekvencijske opsege u kojima rade bazne stanice javnih mobilnih sistema (900MHz, 1800MHz i 2100MHz), sprovedena su intenzivna merenja jačine električnog polja. Kao što je pokazano, uprkos činjenici da su korišćeni intervali usrednjavanja kraći od zahtevanih 6min, predložena merna procedura obezbeđuje rezultate sa prihvatljivim gubitkom kvaliteta merenja.

Sa stanovišta zaštite životne sredine osnovni zahtev je da se utvrdi da li je izmereni nivo sigurno ispod propisanih normi. Na osnovu iskustva autora, nivo elektromagnetnog zračenja u okolini baznih stanica je blizak ili veći postavljenim normama, po pravilu, u manje od 10% mernih pozicija (i to najčešće u zonama kojima opšta ljudska populacija nema mogućnost, ni pravo pristupa). Korišćenjem kraćeg vremenskog intervala usrednjavanja merni proces se može značajno ubrzati. Naravno, za merne pozicije u kojima je izmereni nivo elektromagnetnog zračenja blizak ili veći od definisanih normi može se, u cilju detaljnije provere, koristiti interval definisan standardom (pa čak i duži).

Ovo poglavlje je organizovano u 5 delova. U prvom delu razmotreni su uzroci koji utiču na nestabilnost intenziteta električnog polja na mernoj poziciji. Merna metodologija kojom je analiziran uticaj skraćivanja intervala na tačnost merenja, predstavljena je u drugom delu. Nakon toga, u trećem delu, prezentovana je analiza promenljivosti vrednosti intenziteta električnog polja dobijenih usrednjavanjem u 6-minutnom intervalu. Statistička analiza rezultata i određivanje merne nesigurnosti koja potiče od skraćivanja intervala usrednjavanja dati su u četvrtom delu. Na kraju, u okviru petog dela, izvedeni su zaključci.

#### 4.1 Promenljivost elektromagnetnog polja koje potiče od baznih stanica

Pored dobro poznatog *short-term* fedinga, koji generalno karakteriše propagaciju radio-talasa [77], na nivo elektromagnetnog zračenja u okolini bazne stanice utiče još nekoliko efekata od kojih su najznačajniji [47]: saobraćajno opterećenje, automatska kontrola snage predajnika i emitovanje sa prekidima (diskontinualna predaja).

Ukupna snaga koju emituje bazna stanica direktno zavisi od broja aktivnih veza, odnosno njenog saobraćajnog opterećenja. U slučaju GSM/DCS sistema, zavisno od saobraćajnog opterećenja vrši se uključivanje i isključivanje predajnika, dok u okviru UMTS i LTE sistema porast saobraćajnog opterećenja uslovljava rad predajnika sa većom snagom. Saobraćajno opterećenje bazne stanice je veličina koja se menja u toku dana, a zavisi od: primenjenih tarifnih profila, doba dana, dana u nedelji, lokacije bazne stanice itd. Po pravilu, operator konfigurise baznu stanicu na takav način da pod određenim uslovima ona zadovolji saobraćajne zahteve u “času najvećeg opterećenja” (kontinualni interval od 60 min u toku 24h u kome je saobraćajno opterećenje najveće). Iz tog razloga, merenja štetnih zračenja sprovode se ili u času najvećeg opterećenja, ili se dobijeni rezultati merenja računski koriguju (ekstrapoliraju) tako da odgovaraju uslovima u času najvećeg opterećenja. Posebno treba primetiti da čak i u slučaju kada bazna stanica radi sa maksimalnim saobraćajnim kapacitetom, broj aktivnih saobraćajnih kanala nije konstantan zbog stohastičke prirode generisanja i trajanja poziva.

Za svaku pojedinačnu vezu, snaga predajnika bazne stanice se automatski podešava u zavisnosti od propagacionih uslova u kojima se mobilni terminal nalazi. U GSM/DCS sistemu kontrola snage se sprovodi sa učestanošću od približno 2Hz, odnosno sa 1500Hz u UMTS i 1000Hz u LTE sistemu.

U toku uspostavljene veze, u slučaju kada je korisnik neaktivan (npr. privremeno zastane u govoru), bazna stanica privremeno prestaje sa emisijom (u GSM/DCS sistemu se isključuju predajnici, dok se u UMTS i LTE sistemu ne emituje saobraćajni kanal). Tipično, zbog ove funkcionalnosti, predajnici bazne stanice su za svaku pojedinačnu govornu vezu u proseku neaktivni 40-50% vremena.

Svi prethodno navedeni efekti dovode do velike nestabilnosti elektromagnetnog polja na mernoj poziciji.

U literaturi se može naći veliki broj rešenja čiji je cilj da omoguće precizno modelovanje vršnog nivoa elektromagnetne emisije u neposrednoj okolini baznih stanica [78]-[87]. Pri tome, ni na koji način se ne razmatraju prethodno navedene osnovne karakteristike savremenih radio-sistema. Međutim, zbog funkcija kao što su automatska kontrola snage i emitovanje s prekidima, ali i zbog definisanog 6-minutnog vremenskog intervala usrednjavanja, verovatnoća pojave vršne vrednosti praktično je veoma bliska nuli. Teoretski, da bi se dostigle vršne vrednosti elektromagnetnog zračenja, svi korisnici (obično nekoliko desetina njih) moraju biti u isto vreme sa uspostavljenim vezama, da govore bez prekida i da se nalaze u veoma lošim uslovima prostiranja (tj. da bazna stanica radi sa maksimalnom snagom), što je praktično nemoguće postići u dužem vremenskom intervalu (na primer, 6-min). Osim toga, standardi ne zahtevaju određivanje teorijskih maksimalnih vrednosti.

## 4.2 Merna metodologija

Za potrebe analize koja je predmet ovog poglavlja korišćen je kalibrisani širokopolasni merni sistem *NARDA EMR300* sa izotropnom mernom sondom *NARDA TYPE 18c*, koji omogućava merenje ukupnog intenziteta električnog polja u frekvencijskom opsegu 100kHz do 3GHz. Standardna merna nesigurnost [39]-[41] i [61] širokopolasnog mernog sistema *NARDA EMR300* sa izotropnom mernom sondom *NARDA TYPE 18c* bila je  $\pm 16.92\%$ .

Merenja su sprovedena izvan bliske reaktivne zone, odnosno u bliskoj radijacijskoj zoni i zoni dalekog polja zračenja antenskog sistema. U ovim zonama električno polje, magnetno polje i gustina snage vezani su relacijom (2.1). Izabrano je da veličina koja se meri bude intenzitet električnog polja. Deklarisana osetljivost ovako konfigurisanog mernog sistema bila je 0.2V/m. U cilju prikupljanja velikog broja mernih rezultata, merni sistem je bio postavljen na drveni tronožni stativ i povezan optičkim kablom sa udaljenim PC računarem. Na ovaj način eliminisan je uticaj računara i drugih objekata (i tela ljudi) na rezultate merenja.

Za potrebe analize, izabrana je tipična kompleksna trosektorska bazna stanica u urbanom okruženju na kojoj su implementirana sva tri sistema, GSM, DCS i UMTS. Za više unapred definisanih vrednosti nivoa električnog polja ravnomerno raspoređenih u opsegu od 0.5V/m do 100V/m, u okolini bazne stanice birane su merne pozicije na

kojima su se očitavale vrednosti približne definisanim. Merenja su vršena radnim danima u času najvećeg opterećenja (uz očekivanje da bazna stanica radi sa maksimalnim opterećenjem), na 16 mernih pozicija tokom tri nedelje. Za svaku od mernih pozicija prikupljeno je 9000 odbiraka, odnosno odbirci su uzimani na svakih 0.4s, dok je merni sistem bio stacionaran. Obrada izmerenih vrednosti sprovedena je naknadno.

Treba napomenuti da se merenja mogu sprovoditi i u vremenskim intervalima sa manjim opterećenjem u mreži, iako to nije u potpunosti u skladu sa standardima. U ovim slučajevima, bazna stanica opslužuje manji broj korisnika i zbog toga se može očekivati manja promenljivost izmerenih vrednosti u odnosu na čas najvećeg opterećenja. Ovu promenu u nestabilnosti elektromagnetnog polja moguće je ugrubo proceniti. Naime, nestabilnost elektromagnetnog zračenja direktno zavisi od ukupne predajne snage baznih stanica. Čak i u slučajevima neopterećene bazne stanice (bez aktivnih korisnika), emituju se kontrolni kanali koji su neophodni za ispravno funkcionisanje sistema. Zbog toga, u tipičnim operativnim GSM i UMTS mrežama, u većini slučajeva bazna stanica emituje snagom koja nije manja od 25% ukupne maksimalne snage svih predajnika. Ova snaga definiše minimalni nivo emisije elektromagnetnog zračenja bazne stanice (ali takođe i maksimalni nivo za slučaj kada bazna stanica nema aktivne korisnike). S druge strane, najveći nivo emisije elektromagnetnog zračenja direktno zavisi od opterećenja bazne stanice. U slučaju potpuno opterećene bazne stanice (maksimalan broj aktivnih korisnika), ukupna snaga zavisi od nekoliko faktora, od kojih su najznačajniji:

- iskorišćenje saobraćajnog kanala koje zavisi prvenstveno od statistike govornog poziva - 70-80%,
- aktivnost predajnika na saobraćajnom kanalu koja zavisi od funkcionalnosti diskontinualne predaje - tipično 50-60%,
- aktivnost predajnika na saobraćajnom kanalu, usled funkcionalnosti automatske kontrole predajne snage, nije lako proceniti jer zavisi od konfiguracije bazne stanice, susednih baznih stanica i prostornog raspored korisnike - obično ne više od 70 - 80%.

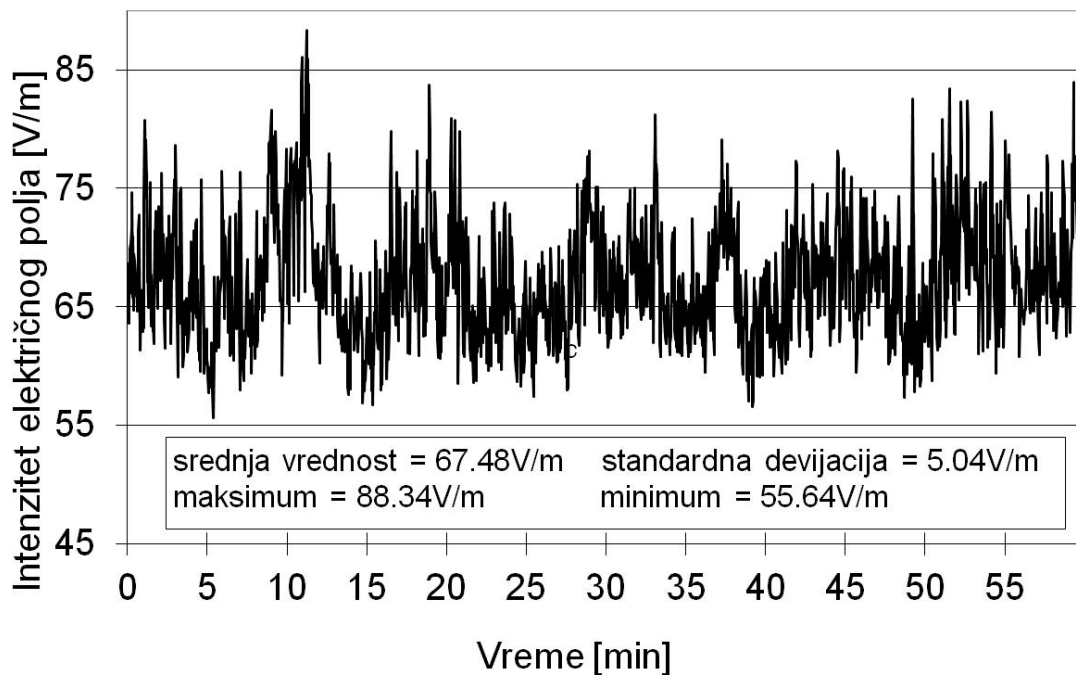
Imajući u vidu sve prethodno navedene efekte, može se zaključiti da se u zavisnosti od opterećenja, ukupna prosečna snaga bazne stanice kreće u opsegu 25-55% od ukupne maksimalne snage bazne stanice. To praktično znači da je vrednost

intenziteta električnog polja izmerena tokom perioda sa manjim opterećenjem maksimalno ~35% manja u poređenju sa slučajem kad bazne stanice rade sa maksimalnim opterećenjem. Konačno, uzimajući u obzir činjenicu da u periodima sa manjim opterećenjem, ukupna snaga bazne stanice može uzimati vrednost iz manjeg opsega raspoloživih vrednosti snage, pa se može zaključiti da je promenljivost intenziteta električnog proporcionalna manja. Rezultati merenja u praksi potvrđuju ovaj zaključak. Ipak, takvi slučajevi zahtevaju dublju analizu koja može biti osnov za dalja istraživanja.

### **4.3 Promenljivost 6-minutnih srednjih vrednosti intenziteta električnog polja**

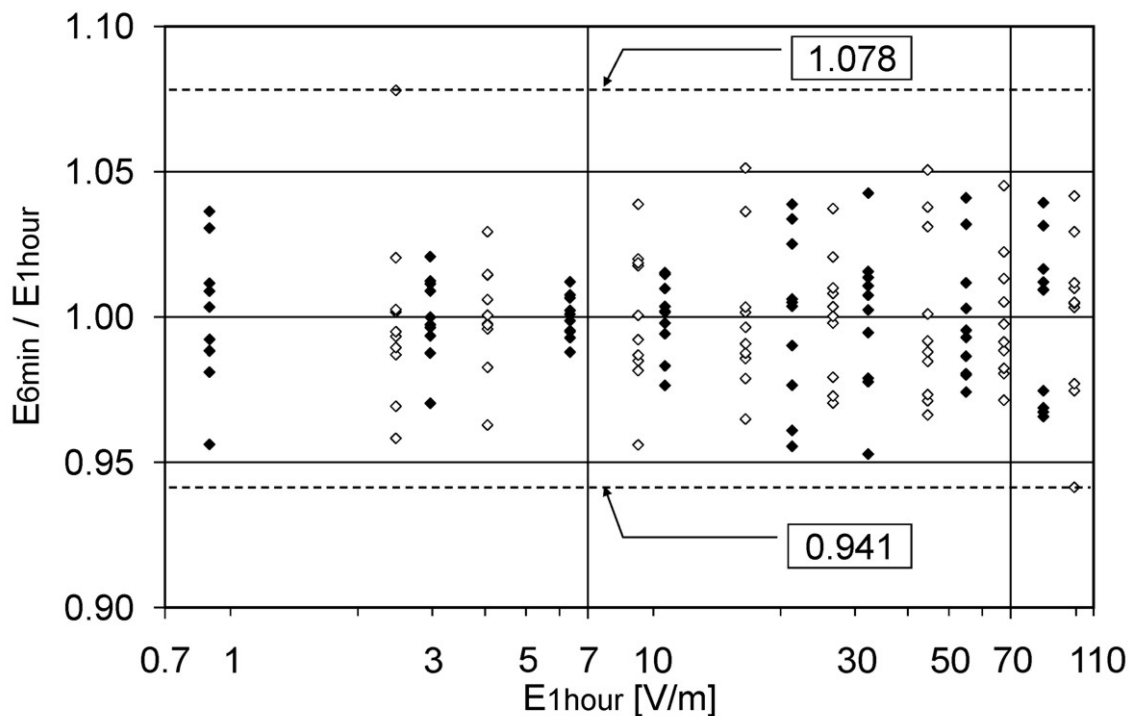
Rezultati merenja intenziteta električnog polja na jednoj mernoj poziciji u času najvećeg opterećenja (60min), prikazani su na slici 4.1.

Sa ciljem da se analizira širok opseg vrednosti intenziteta električnog polja, u okolini posmatrane bazne stanice, merenja su sprovedena na 16 mernih pozicija. Za svaku pojedinačnu mernu poziciju, merenja su izvršena u času najvećeg opterećenja. Nakon toga, dobijene vrednosti intenziteta električnog polja su usrednjene u celom 1-časovnom vremenskom intervalu. Potrebno je istaći da se u postupku usrednjavanja izračunavaju srednje kvadratne vrednosti intenziteta električnog polja (kasnije se na isti način primenjuje usrednjavanje na 6-minutnim intervalima).



*Slika 4.1 Vremenska promenljivost intenziteta električnog polja na jednoj mernoj poziciji u času najvećeg opterećenja*

Za svaku grupu mernih rezultata, prikupljenih tokom jednog časa, vršena su usrednjavanja intenziteta električnog polja u 6-minutnim intervalima vremena, kako je to propisano standardom. Odstupanja vrednosti dobijenih 6-minutnim usrednjavanjem od srednje vrednosti za celi čas najvećeg opterećenja, data su na slici 4.2. Na slici 4.2, u cilju razdvajanja vrednosti susednih mernih pozicija, koriste se različiti markeri za označavanje. Može se uočiti da dve izmerene vrednosti, dobijene 6-minutnim usrednjavanjem, zbog navedene nestabilnosti signala, mogu da se razlikuju i preko 10%. Ovu razliku (nesigurnost vrednosti intenziteta elektromagnetnog zračenja) svakako ne treba zanemariti u fazi poređenja dobijenog rezultata merenja sa rezultatima dobijenim po proceduri koju predviđaju standardi.



*Slika 4.2 Odstupanje 6-minutnih srednjih vrednosti intenziteta električnog polja ( $E_{6min}$ ) u odnosu na 1-časovne srednje vrednosti ( $E_{1h}$ )*

Potrebno je istaći da zbog uočene nestabilnosti elektromagnetnog polja postoje i predlozi da se koriste znatno duži vremenski intervali usrednjavanja u cilju smanjivanja neodređenosti rezultata merenja [88]. Međutim, u najvećem broju slučajeva kada se ovakav postupak sprovodi u nekom fiksiranom vremenskom intervalu merenja (na primer za ceo dan), dolazi do smanjivanja ukupnog kvaliteta analize lokacije bazne stanice (zbog manjeg broja mernih pozicija na kojima se sprovode merenja).

#### 4.4 Procedura skraćivanja intervala usrednjavanja

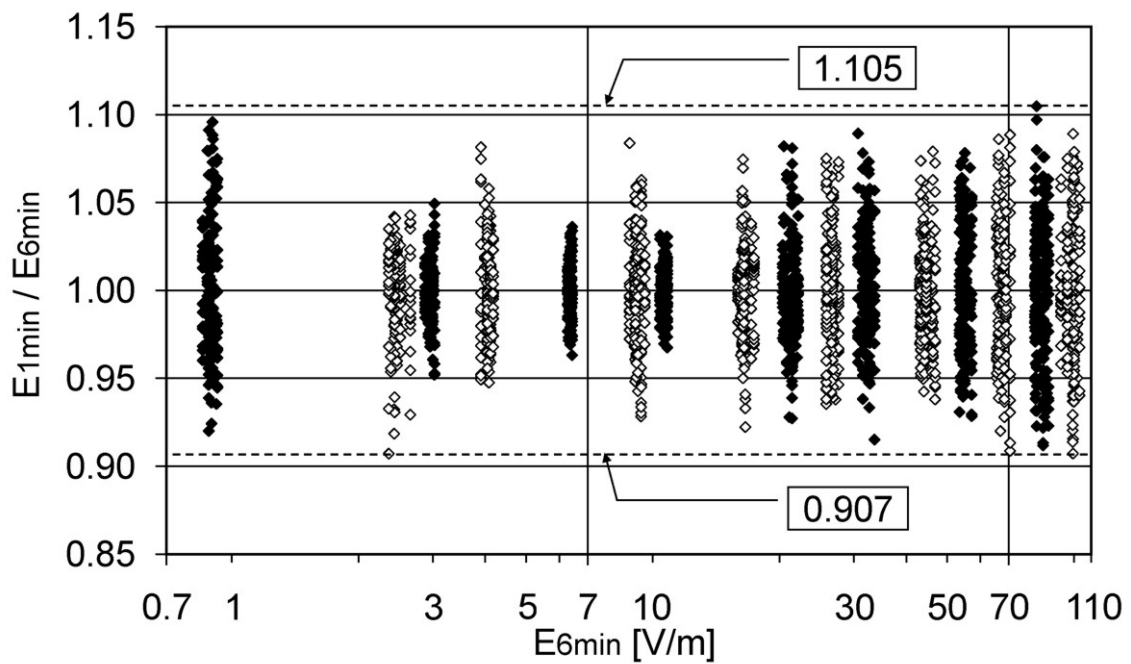
Ukupan skup podataka prikupljenih neprekidno u toku jednog časa merenja, deljen je u 10 nepreklapajućih intervala trajanja od po 6min. Za svaki od ovako dobijenih intervala, prvo je određivana jedinstvena srednja vrednost. Nakon toga, posebno su uzimani intervali trajanja 1min, 30s i 15s (u daljem tekstu kraći intervali). Pri tome, iz svakog intervala od 6 min, srazmerno trajanju kraćeg intervala, uzimano je više preklapajućih intervala. Na ovaj način, veći broj kraćih intervala je uzet u

razmatranje (u poređenju sa slučajem nepreklapajućih intervala), i tako je omogućena preciznija analiza uticaja kraćih intervala na rezultat merenja.

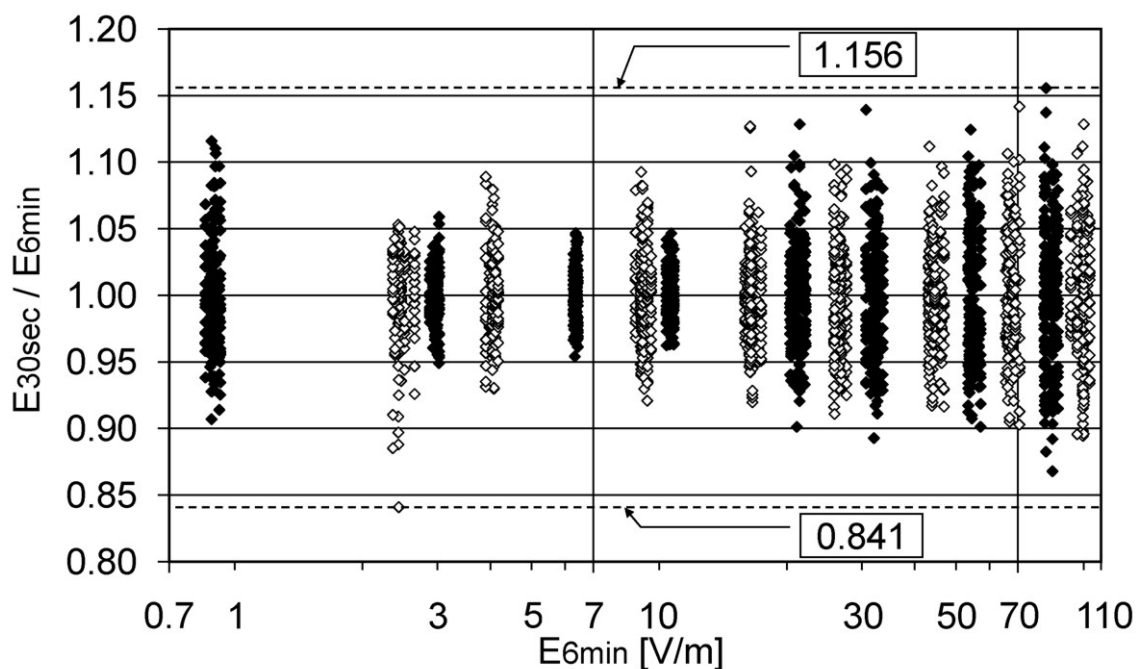
Odstupanja vrednosti dobijenih usrednjavanjem u kraćim vremenskim intervalima u odnosu na 6-minutne srednje vrednosti, prikazana su na slikama 4.3, 4.4 i 4.5 (različiti markeri su korišćeni za označavanje vrednosti susednih mernih pozicija). Sa slika 4.3, 4.4 i 4.5, jasno se vidi da su relativna odstupanja približno konstantna bez obzira na vrednost intenziteta električnog polja. U skladu sa tim, odstupanja od 6-minutnih srednjih vrednosti srazmerna su jačini električnog polja. Dodatno, u cilju potpunijeg predstavljanja rezultata merenja, osnovni statistički parametri odstupanja prikupljenih sirovih podataka i srednjih vrednosti, od 1-časovne srednje vrednosti, dati su u tabeli 4.1. Kao što se i moglo očekivati, skraćivanje intervala usrednjavanja povećava nestabilnost srednjih vrednosti.

Pored toga, što je interval usrednjavanja kraći, relativno odstupanje je veće, što je takođe očekivano. Odstupanja su približno simetrično raspodeljena oko srednje 6-minutne vrednosti. Takođe, vrednosti maksimalnih odstupanja se povećavaju sa skraćivanjem vremenskog intervala usrednjavanja i približno iznose  $\pm 10.5\%$ ,  $\pm 15.9\%$  i  $\pm 19\%$ , za vremenske intervale usrednjavanja od 1min, 30s i 15s, respektivno. U cilju utvrđivanja raspodele ovih odstupanja primenjen je *Chi-square goodness-of-fit* test, za svaki 6-minutni interval. U skladu sa ovim testom, hipoteza normalne raspodele ne može biti odbačena (sa nivoom poverenja 5%) u 100%, 100% i 98.1% slučajeva, za vremenske intervale usrednjavanja 1min, 30s i 15s, respektivno.

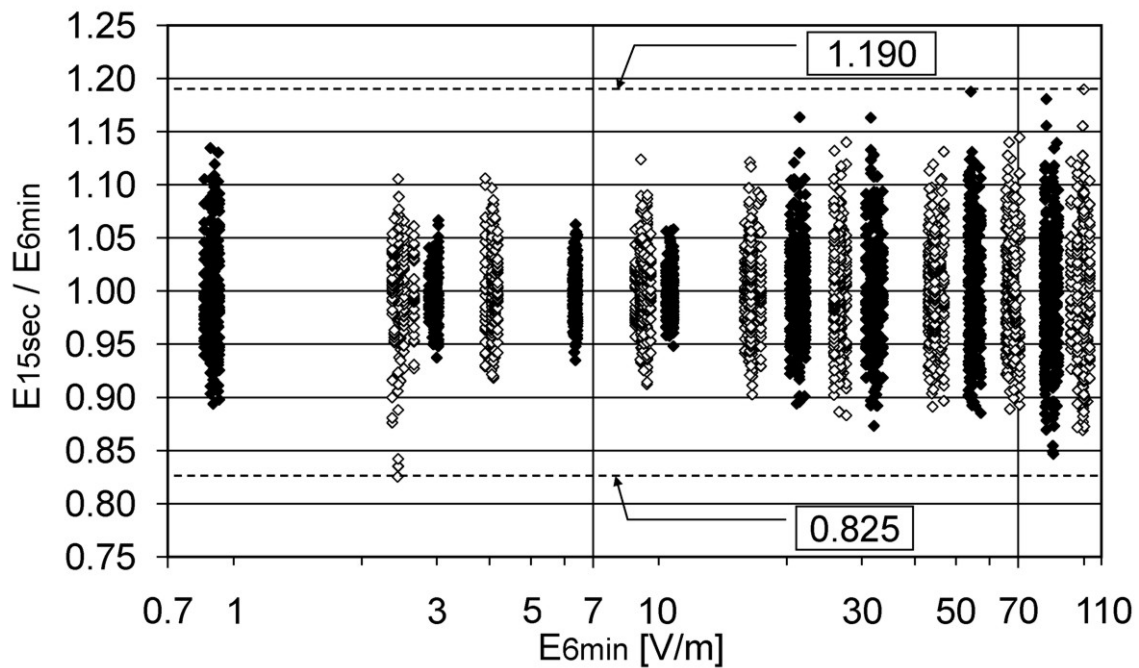




**Slika 4.3** Odstupanje 1-minutnih srednjih vrednosti intenziteta električnog polja ( $E_{1min}$ ) u odnosu na 6-minutne srednje vrednosti ( $E_{6min}$ )



**Slika 4.4** Odstupanje 30-sekundnih srednjih vrednosti intenziteta električnog polja ( $E_{30s}$ ) u odnosu na 6-minutne srednje vrednosti ( $E_{6min}$ )



**Slika 4.5** Odstupanje 15-sekundnih srednjih vrednosti intenziteta električnog polja ( $E_{15s}$ ) u odnosu na 6-minutne srednje vrednosti ( $E_{6min}$ )

**Tabela 4.1** Standardne devijacije  $\sigma_i$  i relativne standardne devijacije  $\rho_i$ , vrednosti dobijenih usrednjavanjem u kraćim intervalima  $i=0.4s$  (sirovi podaci), 6min, 1min, 30s i 15s, u odnosu 1-časovnu srednju vrednost ( $E_{1h}$ )

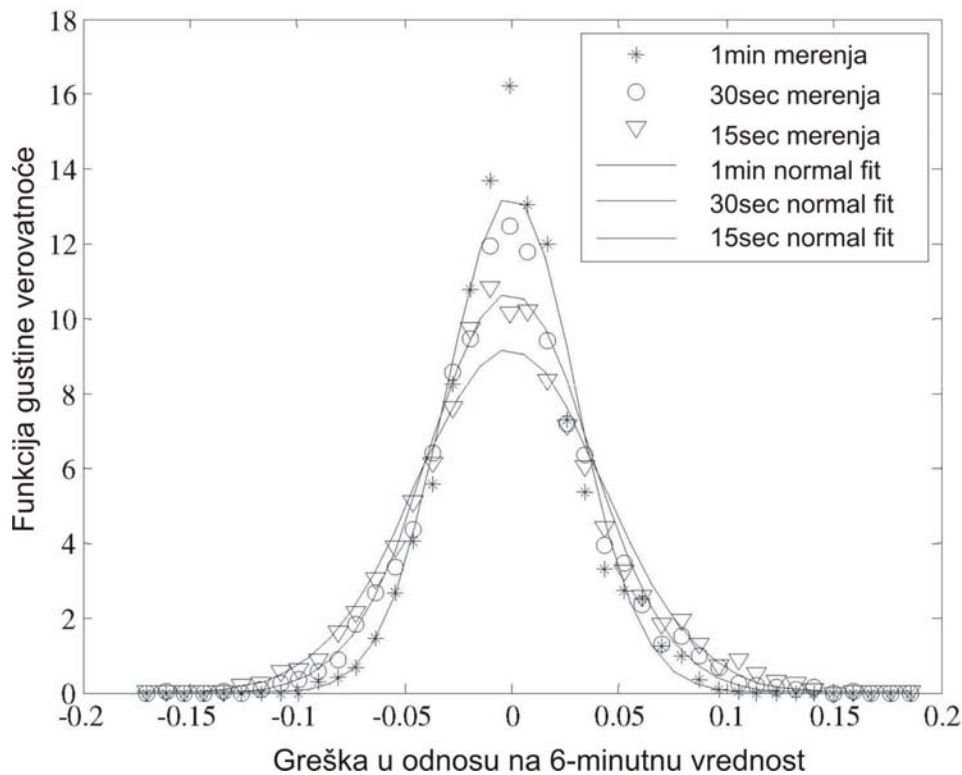
Merna pozicija	$E_{1h}$ [V/m]	$\sigma_{0.4s}$ [V/m]	$\rho_{0.4s}$ [%]	$\sigma_{6min}$ [V/m]	$\rho_{6min}$ [%]	$\sigma_{1min}$ [V/m]	$\rho_{1min}$ [%]	$\sigma_{30s}$ [V/m]	$\rho_{30s}$ [%]	$\sigma_{15s}$ [V/m]	$\rho_{15s}$ [%]
1	0.89	0.05	5.95	0.02	2.38	0.04	4.26	0.04	4.67	0.05	5.07
2	2.46	0.16	6.37	0.08	3.26	0.10	3.90	0.11	4.67	0.13	5.15
3	2.97	0.10	3.32	0.04	1.45	0.06	2.17	0.07	2.39	0.08	2.57
4	4.05	0.21	5.16	0.07	1.84	0.12	3.03	0.14	3.41	0.16	3.97
5	6.35	0.21	3.26	0.05	0.74	0.10	1.58	0.12	1.90	0.14	2.21
6	9.21	0.48	5.23	0.22	2.43	0.33	3.63	0.36	3.95	0.40	4.34
7	10.65	0.36	3.42	0.13	1.27	0.19	1.82	0.24	2.22	0.26	2.46
8	16.52	1.04	6.31	0.43	2.60	0.59	3.55	0.68	4.11	0.75	4.54
9	21.29	1.54	7.21	0.61	2.89	0.82	3.87	0.97	4.57	1.08	5.07
10	26.60	1.87	7.04	0.56	2.12	0.98	3.70	1.16	4.34	1.36	5.13
11	32.22	2.52	7.81	0.81	2.50	1.24	3.84	1.55	4.81	1.81	5.62
12	44.57	3.22	7.22	1.34	3.00	1.79	4.02	2.08	4.68	2.31	5.19
13	54.89	4.55	8.28	1.23	2.25	2.35	4.29	2.85	5.21	3.27	5.96
14	67.48	5.05	7.48	1.50	2.23	2.97	4.40	3.39	5.02	3.67	5.43
15	83.62	7.77	9.30	2.33	2.79	3.96	4.73	4.83	5.77	5.53	6.61
16	99.06	9.22	9.31	2.86	2.89	4.82	4.86	5.46	5.51	6.46	6.52

Za svaki od kraćih intervala usrednjavanja, greške odstupanja  $\varepsilon_{1min,30s,15s}$  određene su u odnosu na odgovarajuću 6-minutnu srednju vrednost korišćenjem formule:

$$\varepsilon_{1min,30s,15s} = \frac{E_{1min,30s,15s} - E_{6min}}{E_{6min}} \quad (4.1)$$

gde je  $E_{1min,30s,15s}$  vrednost dobijena usrednjavanjem u kraćem vremenskom intervalu od 1min, 30s ili 15s, a  $E_{6min}$  vrednost dobijena usrednjavanjem u vremenskom intervalu od 6min (tačna vrednost).

Funkcija gustine verovatnoće greške usrednavanja određene na ovaj način u odnosu na odgovarajuće 6-minutne srednje vrednosti, prikazana je na slici 4.6. Dodatno, u tabeli 4.2, date su relativne standardne merne nesigurnosti koje potiču od usrednjavanja u kraćim vremenskim intervalima  $u_{avr}$ . Na osnovu dobijenih rezultata jasno se vidi da vrednost standardne merne nesigurnosti raste sa skraćanjem vremenskog intervala usrednjavanja, kao što se moglo i očekivati. Pri tome, treba istaći da su dobijene vrednosti relativno male.



**Slika 4.6** Funkcija gustine verovatnoće greške usrednavanja u kraćim vremenskim intervalima u odnosu na odgovarajuće 6-minutne srednje vrednosti

**Tabela 4.2** Relativne standardne merne neisgurnosti za kraće intervale usrednjavanja

Interval usrednjavanja	1min	30s	15s
$u_{avr}$ [%]	3.07	3.80	4.42

#### 4.5 Zaključak

U cilju zaštite od elektromagnetnog zračenja, ali i zbog generalno izražene zabrinutosti građana, na izuzetno velikom broju lokacija baznih stanica javnih mobilnih sistema, postoji potreba da se sprovede merenja nivoa elektromagnetnog zračenja (da bi se utvrdila izloženost ljudi elektromagnetnim poljima). Elektromagnetno zračenje koje emituju bazne stanice je po svojoj prirodi promenljivo, pa se zato prilikom merenja sprovodi vremensko usrednjavanje. Veliki broj standarda propisuje vremenski interval usrednjavanja od 6min. Međutim, u praksi je proces merenja na jednoj lokaciji bazne stanice vremenski ograničen (kako sa stanovišta ekonomske racionalnosti, tako i sa stanovišta mogućeg uznemiravanja građana) i po pravilu ne treba da traje više od jednog dana. Iz tog razloga, striktno poštujući interval usrednjavanja od 6min, na jednoj lokaciji bazne stanice nivo štetnih zračenja može se izmeriti samo u ograničenom broju tačaka. Povećanje efikasnosti u pogledu broja analiziranih tačaka (mernih pozicija), može se postići smanjivanjem vremenskog intervala merenja u jednoj mernoj poziciji. Na osnovu rezultata merenja koja su sprovedena u ovom poglavlju, pokazano je da se postupcima usrednjavanja u kraćim vremenskim intervalima od 1min, 30s i 15s mogu uspešno proceniti vrednosti dobijene standardnim postupkom, pri čemu se merni proces ubrzava približno 6, 12 i 24 puta, respektivno. Naravno, kada se merenje sprovodi u kraćim vremenskim intervalima prilikom proračuna ukupne (kombinovane) merne nesigurnost u obzir mora da bude uzeta dodatna standardna merna nesigurnost čija vrednost iznosi 3.07%, 3.80% i 4.42% za intervale usrednjavanja 1min, 30s i 15s, respektivno.

U ovom poglavlju, analiziran je postupak merenja elektromagnetnog zračenja u času najvećeg opterećenja. Svakako, od interesa je primena postupka predloženog u ovom poglavlju i na slučajevima kada bazna stanica nije potpuno opterećena. Preliminarna teoretska analiza pokazuje da je vrednost intenziteta električnog izmerena tokom

perioda sa manjim opterećenjem maksimalno ~35% manja u poređenju sa slučajem kad bazne stanice rade sa maksimalnim opterećenjem. Takođe, može se očekivati i da je promenljivost intenziteta električnog polja proporcionalno manja sa obzirom da ukupna snaga bazne stanice može uzimati vrednost iz manjeg opsega raspoloživih vrednosti snage. Ipak, takvi slučajevi zahtevaju dublju analizu koja može biti osnov za dalja istraživanja.

Rezultati ovog poglavlja disertacije, koje se odnosi na povećanje efikasnosti metoda za merenje intenziteta električnog polja korišćenjem predložene procedure za skraćivanje intervala usrednjavanja (merenje srednje vrednosti u intervalu kraćem od vremena predviđenog standardima), publikovani su u radu [89].

## **5. KONVERZIJA REZULTATA MERENJA INTENZITETA JEDNE PROSTORNE KOMPONENTE ELEKTRIČNOG POLJA U INTENZITET KOJI SE DOBIJA IZOTROPNIM MERENJIMA**

Svetska zdravstvena organizacija (WHO - *World Health Organization*) je u dokumentu “*Research Agenda for Radio Frequency Fields*” [90] definisala zahteve za unapređenje postupaka određivanja izloženosti ljudi elektromagnetnim poljima za potrebe epidemioloških studija. Autori radova [91]-[94] identifikovali su nekoliko potencijalnih problema u korišćenju ekspozimetara za potrebe određivanja izloženosti ljudi elektromagnetnim poljima. Kao što je to istaknuto u [91], korišćenje monoaksijalne merne sonde, pomoću kojih se meri samo jedna prostorna komponenta elektromagnetnog polja, može dovesti do potcenjivanja stvarne izloženosti. Standardi koji definišu metode za određivanje izloženosti ljudi elektromagnetnim poljima [38]-[41] zahtevaju izotropna merenja intenziteta elektromagnetnog polja.

Osnovni zadatak ovog poglavlja je bio određivanje ukupnog intenziteta električnog polja koje potiče od GSM/DCS/UMTS baznih stanica korišćenjem monoaksijalne merne sonde, umesto izotropne, odnosno triaksijalne merne sonde. Ovo je veoma važno pitanje sa obzirom da veoma veliki broj pojednostavljenih mernih sistema, kao i pojednostavljenih verzija ekspozimetara, koriste monoaksijalne sonde za merenje intenziteta električnog polja, posebno u slučajevima sistematskih merenja koja se sprovode u većim oblastima. U okviru EU FP7 projekta LEXNET (*Low-EMF Exposure Future Networks*) [95], razvijena je pojednostavljena verzija LEXNET ekspozimetra koja koristi monoaksijalnu mernu sondu [96]. Pojednostavljeni ekspozimetri integrisani su na *Smart City Santander* platformu da bi se izvršila merenja intenziteta električnog polja u širokoj oblasti [96]. Pored toga, postoje ideje da se korisnički uređaji (npr. mobilni telefoni) koriste za merenje nivoa snage na prijemu, i to za potrebe određivanja izloženosti ljudi elektromagnetnim poljima koje potiče od baznih

stanica. Potrebno je istaći da većina korisničkih uređaja ima ugrađene monoaksijalne antene.

Kada se koristi monoaksijalna merna sonda da bi se odredio ukupni intenzitet električnog polja, potrebno je primeniti dodatni faktor konverzije. Preciznije, rezultat merenja je potrebno pomnožiti sa skalarnom vrednošću faktora konverzije. Primena monoaksijalne merne sonde ima za posledicu dodatnu mernu nesigurnost koju treba uzeti u obzir prilikom merenja.

Osnovna ideja ovog poglavlja bila je da se sprovedu istovremena merenja intenziteta sve tri prostorne komponente električnog polja i da se na bazi ovih rezultata razvije model za konverziju rezultata merenja intenziteta jedne prostorne komponente električnog polja, u intenzitet koji se dobija izotropnim merenjima. Za ove potrebe sprovedena su merenja za sedam različitih mernih scenarija. Ovih sedam mernih scenarija predstavlja sedam različitih tipova okruženja u odnosu na propagacione i depolarizacione efekte radio-frekvencijskih elektromagnetnih talasa. Pored toga, razmatrani tipovi predstavljaju tipična okruženja u kojima su ljudi izloženi elektromagnetnim poljima.

Zbog kompleksnosti mehanizama propagacije radio-talasa, mernu nesigurnost koja potiče od konverzije rezultata merenja intenziteta jedne prostorne komponente električnog polja u intenzitet koji se dobija izotropnim merenjima, veoma je teško odrediti teoretski (ili simulacijama). Zato je u okviru ovog poglavlja, merna nesigurnost određena statističkom analizom rezultata sprovedenih merenja.

Ovo poglavlje je organizovano u 6 delova. U prvom delu, razmotren je depolarizacioni efekat koji se odnosi na elektromagnetne talase. Merni sistem i merna metodologija prezentovani su u drugom delu. Treći deo posvećen je mernim scenarijima. Metodologija za određivanje faktora konverzije i dodatne merne nesigurnosti izazvane korišćenjem monoaksijalne merne sonde, data je u četvrtom delu. Rezultati merenja su dati u okviru petog dela. Na kraju, u okviru šestog dela, izvedeni su zaključci.

## **5.1 Depolarizacija radio-frekvencijskih elektromagnetnih talasa**

Bazne stanice javnih mobilnih sistema, u većini slučajeva, koriste kros-polarizovane panel antene [79]. Ipak, jedan deo ili čak celokupna predata energija može

da promeni originalnu polarizaciju usled difrakcije ili refleksije radio-frekvencijskih elektromagnetnih talasa. Ovaj efekat naziva se depolarizacioni efekat [97]-[98], i predstavlja se pomoću faktora kros-polarizacione diskriminacije (XPD - *Cross-Polarization Discrimination*). XPD faktor je promenljiva koja ima log-normalnu raspodelu, i čija standardna devijacija donekle zavisi od frekvencije [97]-[98].

XPD je više izražena na otvorenim prostorima nego u urbanim i rezidencijalnim područjima. Utvrđena su dva tipa vremenske promenljivosti depolarizacionog efekta. Prvi tip je spora vremenska promenljivost izazvana promenom električnih svojstava tla usled različitih vremenskih uslova. Drugi tip je posledica pomeranja grana drveća i objekata u propagacionom okruženju (npr. pomeranje automobila, ljudi...), što dovodi do depolarizacionog fedinga amplitude do nekoliko decibela.

Analiza depolarizacionog efekta u urbanim otvorenim okruženjima (*outdoor*) sprovedena je teoretskim putem i simulacijama u okviru rada [99]. Identifikovana su dva glavna faktora koja utiču na depolarizaciju elektromagnetnih talasa: kosina ugla koincidencije sa zidovima i orijentacija ulica u odnosu na osu predajnik-prijemnik. Depolarizacija u slučaju komunikacije u unutrašnjosti objekta (*indoor*) analizirana je u radu [100], i rezultati su pokazali da je depolarizacioni efekat veoma izražen. Refleksije od bočne zidove objekta pokazale su se kao glavni uzročnik depolarizacije u *indoor* okruženjima. U radu [101], autori su utvrdili da je depolarizacioni efekat veoma izražen za slučaj *outdoor-to-indoor* propagacije u veoma urbanim okruženjima, i da se menja u zavisnosti od sprata objekta. Potrebno je istaći da se analize sprovedene u radovima [99]-[101] odnose isključivo na slučaj jednog predajnika. Nasuprot tome, u slučaju koji se razmatra u okviru ovog poglavlja, analiza se odnosi na merenje intenziteta električnog polja koje potiče od većeg broja različitih predajnika. Naime, ekspozimetri se koriste za širokopojasna ili *band*-selektivna merenja ukupnog intenziteta električnog polja, koje potiče od velikog broja baznih stanica.

## 5.2 Merni sistem i merna metodologija

Za potrebe analize sprovedene u okviru ovog poglavlja korišćen je kalibrisani merni sistem koji se sastoji od širokopojasnog mernog prijemnika *NARDA EMR300* i izotropne sonde za merenje intenziteta električnog polja *NARDA TYPE 18c* (100kHz to 3GHz). Ovaj merni sistem omogućava merenje ukupnog intenziteta električnog polja u



navedenom frekvencijskom ospegu. Da bi se odredila izloženost ljudi elektromagnetnim poljima koja potiču od baznih stanica u zoni dalekog polja i u bliskoj radijacijskoj zoni [39], što je najčešći slučaj, dovoljno je meriti samo ukupni intenzitet električnog polja i to korišćenjem izotropne (triaksijalne) merne sonde [38]-[41]. Standardna merna nesigurnost [38]-[41], [61] širokopojasnog mernog sistema *NARDA EMR300* sa izotropnom mernom sondom *NARDA TYPE 18c* je  $\pm 16.92\%$ . Nominalna osetljivost mernog sistema je  $0.2\text{V/m}$ , pa su zbog toga merenja sprovedena u zonama gde je intenzitet električnog polja bio znatno iznad ove vrednosti.

Da bi se sakupio što veći broj rezultata merenja, merni sistem bio je povezan sa računarom korišćenjem optičkog kabla. Merna sonda *TYPE 18c* koristi tri dipola sa diodnim detektorom za merenje intenziteta sve tri prostorne komponente električnog polja. Merna sonda dizajnirana je tako da ne utiče značajno na polje koje se meri, kao i da spreči međusobni uticaj (*coupling*) merenih ortogonalnih polarizacija, a u skladu sa zahtevima definisanim u [38]-[40]. Iz tog razloga, dobijeni rezultati mogu se koristiti za određivanje faktora za direktnu konverziju mernih rezultata dobijenih korišćenjem monoaksijalne merne sonde u izotropni slučaj. Intenziteti koji detektuju tri dipola u mernoj sondi vode se nezavisno do mernog uređaja. Za svaki odbirak, merni sistem daje vrednosti intenziteta za sve tri prostorne komponente električnog polja  $E_X$ ,  $E_Y$  i  $E_Z$ . Ukupni intenzitet električnog polja  $E_{tot}$  dobija se korišćenjem formule:

$$E_{tot} = \sqrt{E_X^2 + E_Y^2 + E_Z^2} \quad (5.1)$$

U toku merne kampanje, merni sistem bio je pričvršćen na tronožni stativ i postavljen na industrijska kolica. Merna sonda je bila postavljena pod uglom od  $45^\circ$  u odnosu na vertikalnu osu. Industrijska kolica su lagano kontinualno pomerana u izabranim zonama, pri tome rotirajući oko vertikalne ose. Na taj način, obezbeđena je jednakost između tri merene međusobno ortogonalne prostorne komponente. Merenja su sprovedena za sedam različitih mernih scenarija. Za svaki merni scenario, merenja su sprovedena u okviru 2-satnih mernih kampanja u kojima je prikupljeno po 3600 odbiraka. Odbirci su uzimani na svake 2s, a dužina putanja kojima se kretao merni sistem je bila približno 250m za svaki merni scenario.

Merenja su sprovedena tokom aktivnog dela dana, u kome je promenljivost saobraćajnog opterećenja najizraženija. Sa obzirom da je trajanje merne kampanje za svaki scenario bilo 2h, dugoročna (*long-term*) promenljivost intenziteta električnog polja izazvana promenljivošću saobraćajnog opterećenja je uzeta u obzir. Sa druge strane, merni sistem korišćen u ovoj analizi meri sve tri prostorne komponente električnog  $E_x$ ,  $E_y$  i  $E_z$  polja istovremeno, u paraleli. Na ovaj način, mogući uticaj kratkotrajne (*short-term*) promenljivosti električnog polja (koji potiče od brzog fedinga, ali i od promenljivosti saobraćajnog opterećenja), kao i vremenski uzastopnog merenja tri prostorne komponente korišćenjem prekidačke jedinice, je izbegnut.

Merenja su sprovedena unutar objekta Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta u Beogradu, kao i u urbanim, suburbanim i ruralnim područjima grada Beograda.

### 5.3 Merni scenariji

Imajući u vidu da propagacija i depolarizacija elektromagnetnih talasa zavisi od okruženja, merenja su sprovedena za sedam različitih mernih scenarija prikazanih u tabeli 5.1, koji predstavljaju najčešće slučajeve iz prakse.

**Tabela 5.1** Merni scenariji

Scenario	Tip okruženja	Okruženje	Predajne antene	Propagacioni uslovi
Scenario 1	Urbano	Unutrašnjost objekta ( <i>indoor</i> )	Unutar objekta	LOS i NLOS
Scenario 2	Urbano	Unutrašnjost objekta ( <i>indoor</i> )	Spoljašnje	NLOS
Scenario 3	Urbano	Otvoreni prostor ( <i>outdoor</i> )	Spoljašnje	LOS
Scenario 4	Urbano	Podzemna železnička stanica	Unutar objekta	LOS i NLOS
Scenario 5	Veoma urbano	Otvoreni prostor ( <i>outdoor</i> )	Spoljašnje	LOS
Scenario 6	Suburbano	Otvoreni prostor ( <i>outdoor</i> )	Spoljašnje	LOS i NLOS
Scenario 7	Ruralno	Otvoreni prostor ( <i>outdoor</i> )	Spoljašnje	LOS

U okviru scenarija 1, merenja su sprovedena na prizemlju zgrade Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta u Beogradu, što predstavlja tipično urbano *indoor* okruženje. Unutar objekta, na nivou prizemlja, dve GSM i dve UMTS bazne stanice jednog mobilnog operatora su bile instalirane. Pripadajućih osam predajnih kros-polarizovanih panel antena (dve za svaku baznu stanicu) bile su postavljene u objektu.

Putanja kojom se kretao merni sistem se sastoji od mernih pozicija sa direktnom optičkom vidljivošću (LOS - *Line-of-Sight*) sa bar jednom od predajnih antena i mernih pozicija bez direktne optičke vidljivosti (NLOS – *Non-Line-of-Sight*), koje su bile približno jednako zastupljene.

Za scenario 2, merenja su sprovedena na poslednjem spratu zgrade Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta u Beogradu. Ovaj scenario predstavlja urbano *indoor* okruženje sa predajnim antenama instaliranim izvan objekta. Putanja kojom se kretao merni sistem se sastoji od mernih pozicija sa NLOS propagacionim karakteristikama. U neposrednoj blizini, na krovu susednog objekta (približne udaljenosti od 100m i približno iste visine kao i visina na kojoj su izvršena merenja), bile su instalirane GSM, DCS i UMTS bazne stanice sva tri mobilna operatora. Navedene bazne stanice su koristile kros-polarizovane panel antene za realizaciju servisa.

U scenariju 3, merenja su sprovedena u urbanom području grada Beograda, i to na otvorenom prostoru (*outdoor*). Na krovu objekta u neposrednoj blizini (približne udaljenosti od 70m i približne visine 25m u odnosu na nivo tla), bile su postavljene GSM, DCS i UMTS bazne stanice sva tri mobilna operatora. Predajne kros-polarizovane panel antene ovih baznih stanice bile su instalirane krovu objekta. Putanja kojom se kretao merni sistem sastojala se od mernih pozicija sa LOS propagacionim karakteristikama.

Scenario 4 predstavlja tipičnu podzemnu železničku stanicu. U ovom scenariju, merenja su sprovedena na podzemnoj železničkoj stanici Vukov Spomenik u Beogradu. Jedna GSM bazna stanica sa dve sektorske monopol antene bila je instalirana na podzemnom peronu. Većina mernih pozicija od kojih se sastojala merna putanja imala je LOS propagacione uslove, dok je približno 10% merne putanje bilo u NLOS propagacionim uslovima.

U okviru scenarija 5, merenja su sprovedena u veoma urbanom okruženju u pešačkoj zoni u centru Beograda, i to na otvorenom prostoru. Predajne panel antene dve najbliže bazne stanice (GSM i UMTS jednog mobilnog operatora i GSM, DCS i UMTS drugog mobilnog operatora), bile su instalirane na krovovima dva različita objekta na visini od približno 18m. Dodatno, antena GSM mikro bazne stanice trećeg mobilnog

operatora bila je instalirana na nivou prvog sprata. Merna putanja stajala se od mernih pozicija sa direktnom optičkom vidljivošću sa bar jednom od predajnih antena.

Scenario 6 predstavlja suburbano *outdoor* propagaciono okruženje grada Beograda. Predajne panel antene dve najbliže bazne stanice bile su instalirane na dva antenska stuba (visina 18m i 15m). Na svakom od pomenutih stubova bile su postavljene panel antene za GSM, DCS i UMTS sisteme jednog mobilnog operatora. Putanja kojom se kretao merni sistem se sastojala od približno 75% mernih pozicija sa LOS propagacionim uslovima i približno 25% mernih pozicija sa NLOS propagacionim uslovima.

U scenariju 7, merenja su sprovedena u *outdoor* ruralnom okruženju, u blizini mesta Stari Tamiš. Predajne panel antene za sva tri mobilna operatora i sva tri sistema (GSM, DCS i UMTS) bile su instalirane na istom antenskom stubu visine 45m. Merna putanja je potpuno bila sastavljena od mernih pozicija sa LOS propagacionim uslovima.

Treba napomenuti da navedeni scenariji predstavljaju tipična okruženja u kojima je većina populacije izložena elektromagnetnim poljima.

#### 5.4 Određivanje faktora konverzije i dodatne merne nesigurnosti izazvane korišćenjem monoaksijalne merne sonde

Za svaki pojedinačni odbirak (za koji su dobijene vrednosti za  $E_X$ ,  $E_Y$  i  $E_Z$ ), vrednosti faktora konverzije  $n_X$ ,  $n_Y$  i  $n_Z$  određene su korišćenjem izraza:

$$n_X = \frac{E_{tot}}{E_X} \quad (5.2)$$

$$n_Y = \frac{E_{tot}}{E_Y} \quad (5.3)$$

$$n_Z = \frac{E_{tot}}{E_Z} \quad (5.4)$$

Na osnovu dobijenih vrednosti za faktore konverzije  $n_X$ ,  $n_Y$  i  $n_Z$  za svaki pojedinačni merni scenario određene su srednja vrednost, medijana, standardna devijacija i merna nesigurnost. Pored toga, svi dobijeni faktori konverzije  $n_X$ ,  $n_Y$  i  $n_Z$

grupisani su u jedan zajednički faktor konverzije  $n_{ALL}$ , za koji su takođe određene srednja vrednost, medijana, standardna devijacija i merna nesigurnost.

Merna nesigurnost izazvana korišćenjem monoaksijalne merne sonde određena je statističkom obradom skupa faktora konverzije  $n_X$ ,  $n_Y$ ,  $n_Z$  i  $n_{ALL}$ , dobijenih za svaki pojedinačni odbirak [55] i [61]. U prvom koraku, za svaki od faktora konverzije ( $n_X$ ,  $n_Y$ ,  $n_Z$  i  $n_{ALL}$ ) određena je srednja vrednost  $n_{meas}$  i standardna devijacija  $\sigma(n_{meas})$ . Nakon toga, relativna standardna merna nesigurnost izazvana korišćenjem monoaksijalne merne sonde  $u$  određena je kao odnos standardne devijacije i srednje vrednosti [55]:

$$u = \frac{\sigma(n_{meas})}{n_{meas}} \quad (5.5)$$

Merne nesigurnosti izazvane korišćenjem monoaksijalne merne sonde određene su za svaki merni scenario ponaosob.

## 5.5 Rezultati merenja

Radi uštede prostora, u okviru ovog poglavlja dati su rezultati merenja samo scanrio 1. Za sve ostale scenarije rezultati merenja imaju slično ponašanje, i prikazani su u prilogu A. Rezultati merenja intenziteta električnog polja za sve tri prostorne komponente  $E_X$ ,  $E_Y$  i  $E_Z$ , kao i ukupni intenzitet električnog polja  $E_{tot}$ , prikazani su na slici 5.1. Vremenska zavisnost pripadajućih faktora konverzije  $n_X$ ,  $n_Y$  i  $n_Z$  prikazana je na slici 5.2, dok je vremenska zavisnost pripadajućih faktora konverzije  $n_{ALL}$  prikazana na slici 5.3. Funkcija gustine verovatnoće faktora konverzije  $n_{ALL}$  prikazana je na slici 5.4.

Statističke vrednosti (srednja vrednost, medijana i standardna devijacija) faktora konverzije  $n_X$ ,  $n_Y$ ,  $n_Z$  i  $n_{ALL}$ , za svaki scenario ponaosob, date su u tabeli 5.2. Na osnovu ovih rezultata, određene su srednje vrednosti za svih sedam scenarija zajedno, i date takođe u tabeli 5.2. Za potrebe upoređivanja, merne nesigurnosti za faktore konverzije  $n_X$ ,  $n_Y$ ,  $n_Z$  i  $n_{ALL}$  za svih sedam scenarija ponaosob, kao i usrednjene vrednosti za sve scenarije zajedno, date su u tabeli 5.3.

Analizirajući dobijene rezultate za intenzitet električnog polja (slika 5.1), kao i izračunate pripadajuće faktore konverzije (slika 5.2), moguće je zaključiti da vrednost

faktora konverzije ne zavisi od vrednosti intenziteta električnog polja. Naime, iako se intenzitet električnog polja značajno menja duž merne putanje i usled različitih saobraćajnih opterećenja, faktori konverzije imaju približno isto ponašanje.

Merni rezultati pokazuju da faktori konverzije imaju slično ponašanje i slične statističke parametre (srednja vrednost, medijana i standardna devijacija) za svih sedam scenarija (tabela 5.2). Naime, srednja vrednost faktora konverzije  $n_{ALL}$  je u opsegu od 1.84 za scenario 6, do 2.10 za scenario 4. Ovo je posebno izraženo u slučaju medijanske vrednosti, gde su razlike među scenarijima veoma male. Medijanske vrednosti su u opsegu od 1.76 za scenario 2, do 1.83 za scenario 4. Ovakvi rezultati očekivani su iz dva razloga. Prvo, merenja su sprovedena na takav način da sve tri merne antene (unutar merne sonde) imaju približno istu raspodelu po pitanju orijentacije u prostoru. Sa druge strane, zbog izraženog depolarizacionog efekta i velikog broja predajnika, ukupno električno polje je rezultat velikog broja komponenti koje potiču od različitih predajnika (po pravilu i po nekoliko *multipath* komponenti za svaki) i dolaze iz različitih pravaca sa različitim polarizacijama.

Za razliku od faktora konverzije, merna nesigurnost usled korišćenja monoaksijalne merne sonde za merenje ukupnog intenziteta električnog polja zavisi od tipa okruženja (tabela 5.3). Ovakav rezultat je takođe očekivan. U okruženjima sa većim brojem različito polarizovanih komponenti koje formiraju ukupno električno polje, rezultati merenja su manje zavisni od pravca u kom se nalazi monoaksijalna merna sonda.

Najveća vrednost merne nesigurnosti je za scenario 4 (podzemna železnička stanica), i iznosi 44.77%. Ovo je posledica činjenice da je u podzemnoj stanici bila implementirana samo jedna GSM bazna stanica sa dve pripadajuće monopol sektorske antene. Mali broj predajnika doveo je do toga da ukupno električno polje potiče od malog broja različito orjentisanih komponenti. Iz tog razloga, merenja su više zavisna od pravca u kom se nalazi monoaksijalna merna sonda, što dovodi veće merne nesigurnosti.

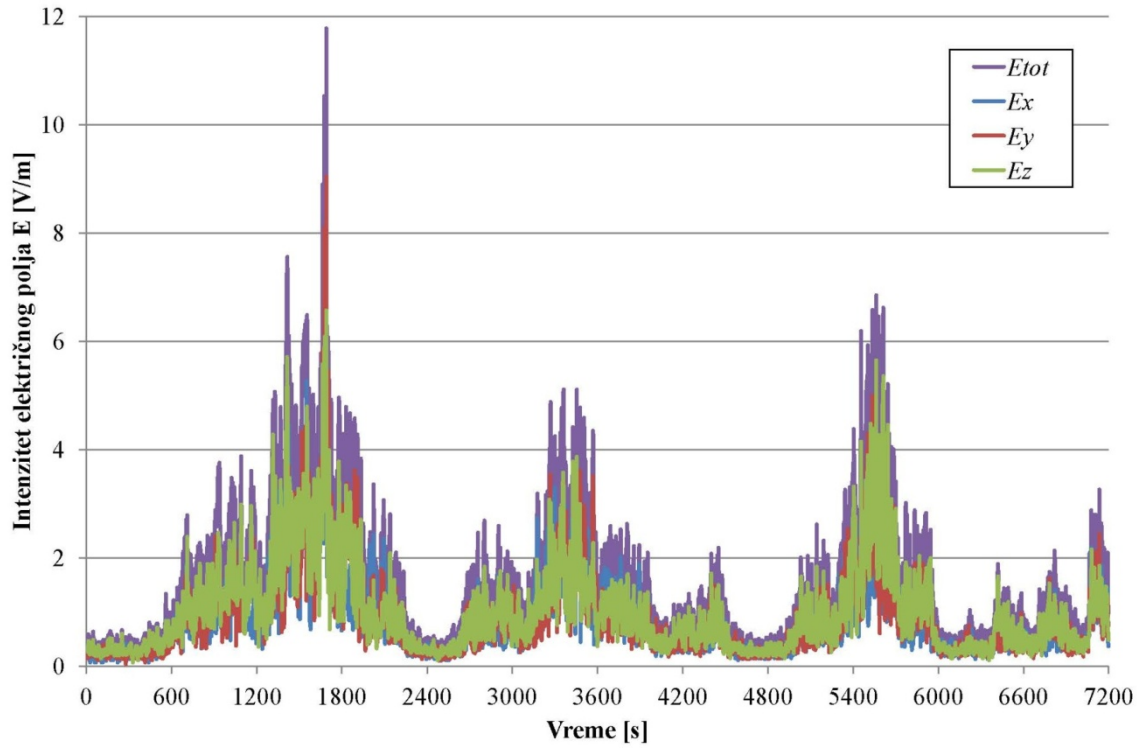
Slični slučajevi, sa malom razlikom, su za scenario 7 (*outdoor* ruralno okruženje - 39.7%) i scenario 5 (*outdoor* veoma urbana pešačka zona - 39.2%). U scenariju 7, postojalo je nekoliko predajnika instaliranih na istom antenskom stubu (koji je bio postavljen na ravnom zemljištu). Ukupno električno polje bilo je rezultat nekoliko

komponenti koje dolaze direktno od svakog predajnika i komponenti koje su reflektovane od zemljište. U scenariju 5, bilo je manje predajnika u poređenju sa scenariom 7, a samim tim i manji broj direktnih komponenti, ali ukupno električno polje bilo je rezultat više reflektovanih komponenti od zemlje i okolnih objekata. To je dovelo do približno istih vrednosti merne nesigurnosti za oba scenarija.

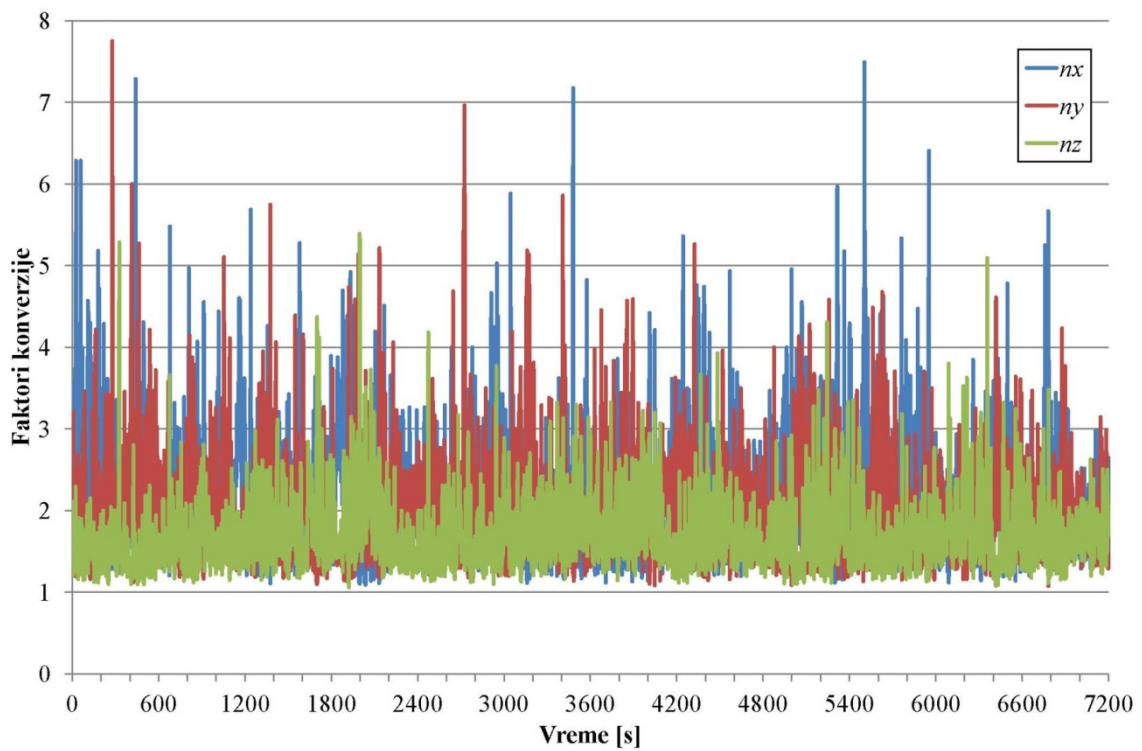
Najmanja vrednost merne nesigurnosti (21.83%) dobijena je za scenario 6 (suburbano *outdoor* okruženje), gde je postojalo više predajnika instaliranih na različitim bliskim lokacijama. Pored toga, zbog tipa okruženja postojao je veliki broj komponenti reflektovanih od zemlju i okolne kuće. Slični slučajevi, sa velikim brojem predajnika i reflektovanih komponenti, bili su za scenario 2 (*indoor* urbano okruženje sa *outdoor* predajnim antenama postavljenim - 25.86%) i scenario 3 (*outdoor* urbano okruženje - 27.49%). Veliki broj predajnika i brojne reflektovane komponente dovele su do toga da je ukupno električno polje rezultat velikog broja različito orjentisanih komponenti, što je za posledicu imalo male vrednosti merne nesigurnosti za tri pomenuta scenarija.

Vrednost merne nesigurnosti 32.61% za scenario 1 (*indoor* urbano okruženje sa *indoor* predajnim antenama) nalazi se u sredini u poređenju sa ostalim scenarijima. Ova vrednost merne nesigurnosti posledica je malog broja predajnika (dve bazne stanice sa osam kros-polarizovanih antena), ali velikog broja komponenti reflektovanih od zidove objekta.

Funkcija gustine verovatnoće faktora konverzije  $n_{ALL}$  (prikazana na slici 5.4), pokazuje da faktor konverzije  $n_{ALL}$  ima približno log-normalnu raspodelu, što je u skladu sa [97]-[98].

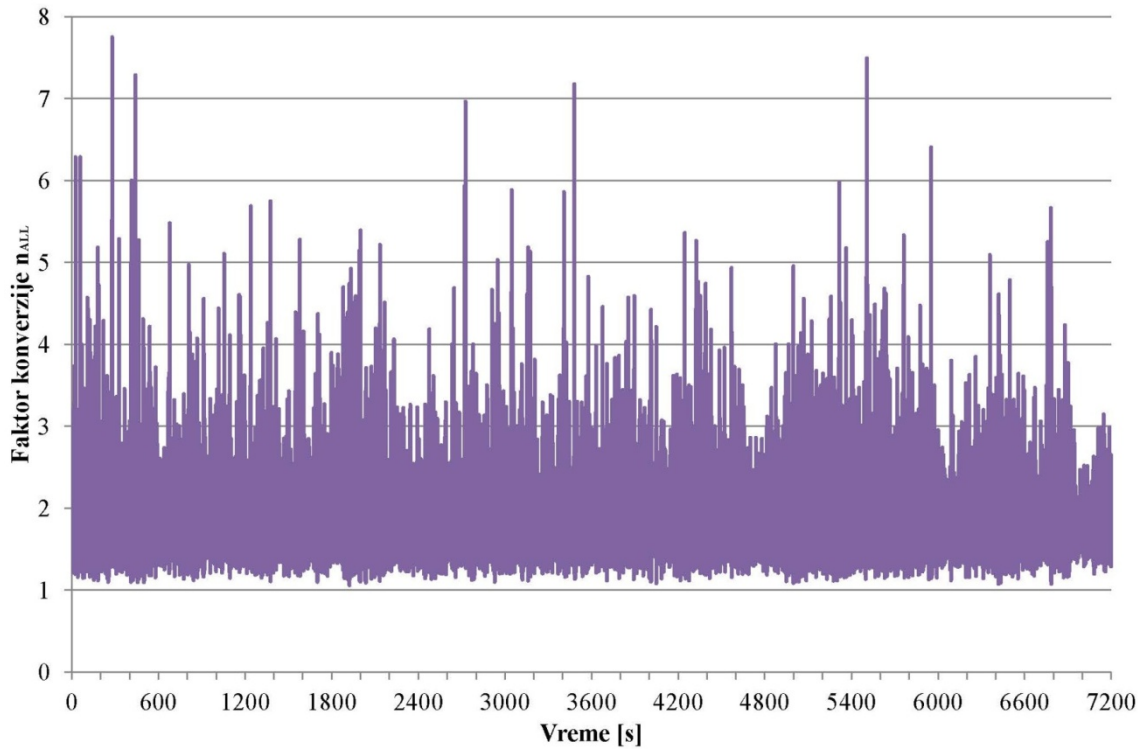


*Slika 5.1* Intenzitet električnog polja u zavisnosti od vremena za scenario 1

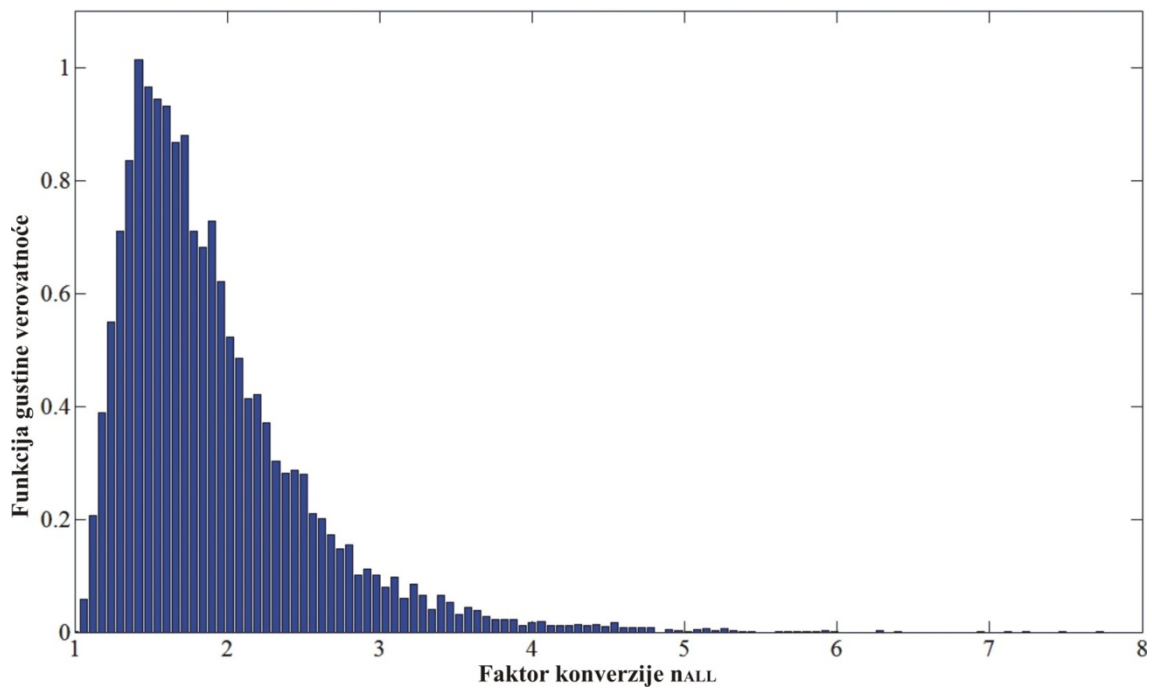


*Slika 5.2* Faktori konverzije  $n_x$ ,  $n_y$  i  $n_z$  u zavisnosti od vremena za scenario 1





*Slika 5.3* Faktor konverzije  $n_{ALL}$  u zavisnosti od vremena za scenario 1



*Slika 5.4* Funkcija gustine verovatnoće faktora konverzije  $n_{ALL}$  za scenario 1

**Tabela 5.2** Srednja vrednost, medijana i standardna devijacija faktora konverzije

Faktor konverzije		$n_X$	$n_Y$	$n_Z$	$n_{ALL}$
Scenario 1	Srednja vrednost	2.08	2.03	1.70	1.94
	Medijana	1.91	1.89	1.60	1.78
	Standardna devijacija	0.71	0.65	0.44	0.63
Scenario 2	Srednja vrednost	2.10	1.87	1.65	1.87
	Medijana	2.02	1.76	1.59	1.76
	Standardna devijacija	0.56	0.43	0.31	0.48
Scenario 3	Srednja vrednost	2.00	1.89	1.76	1.88
	Medijana	1.90	1.78	1.67	1.77
	Standardna devijacija	0.58	0.49	0.45	0.52
Scenario 4	Srednja vrednost	1.96	2.32	2.01	2.10
	Medijana	1.74	2.00	1.72	1.83
	Standardna devijacija	0.85	1.00	0.92	0.94
Scenario 5	Srednja vrednost	2.20	2.30	1.56	2.02
	Medijana	1.99	2.06	1.49	1.79
	Standardna devijacija	0.84	0.87	0.32	0.79
Scenario 6	Srednja vrednost	2.00	1.89	1.64	1.84
	Medijana	1.94	1.86	1.56	1.78
	Standardna devijacija	0.41	0.36	0.35	0.40
Scenario 7	Srednja vrednost	2.07	1.81	2.15	2.01
	Medijana	1.77	1.53	2.00	1.79
	Standardna devijacija	0.94	0.74	0.65	0.80
Srednje	Srednja vrednost	2.06	2.02	1.78	1.95
	Medijana	1.90	1.84	1.66	1.79
	Standardna devijacija	0.70	0.65	0.49	0.65

**Tabela 5.3** Uporedni prikaz mernih nesigurnosti za sve scenarije

Nesigurnost [%]	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4	Scenario 5	Scenario 6	Scenario 7	Srednja vrednost
$u_X$	33.99	26.75	28.81	43.26	38.18	20.59	45.36	33.85
$u_Y$	31.94	23.17	26.22	43.25	37.62	18.88	40.84	31.70
$u_Z$	25.78	18.71	25.33	45.67	20.79	21.19	30.07	26.79
$u_{ALL}$	32.61	25.86	27.49	44.77	39.20	21.83	39.70	33.07

## 5.6 Zaključak

Rezultati ovog istraživanja pokazali su da je moguće odrediti ukupni intezitet električnog polja korišćenjem monoaksijalne merne sonde (umesto izotropne,

triaksijalne merne sonde). Kada se koristi monoaksijalna merna sonda, potrebno je primeniti dodatni faktor konverzije da bi se odredio ukupni intenzitet električnog polja. Primena monoaksijalne merne sonde ima za posledicu dodatnu mernu nesigurnost koju treba uzeti u obzir prilikom merenja.

Rezultati merenja pokazuju da su faktori konverzije veoma slični za sve analizirane scenarije (koji predstavljaju najčešće tipove okruženja). Naime, srednja vrednost faktora konverzije  $n_{ALL}$  je u opsegu od 1.84 za suburbano *outdoor* propagaciono okruženje, do 2.10 za podzemnu železničku stanicu. Pored toga, medijanske vrednosti su u opsegu od 1.76 za *indoor* urbano okruženje (sa *outdoor* predajnim antenama), do 1.83 za podzemnu železničku stanicu. Sa druge strane, merna nesigurnost usled korišćenja monoaksijalne merne sonde za merenje ukupnog intenziteta električnog polja, zavisi od tipa okruženja. Najveća vrednost relativne standardne merne nesigurnosti je za podzemnu železničku stanicu, i iznosi 44.77%. Najmanja vrednost standardne merne nesigurnosti, u iznosu od 21.83%, dobijena je za suburbano *outdoor* propagaciono okruženje.

Na bazi vrednosti dobijenih usrednjavanjem na svih sedam scenarija može se zaključiti da je pri korišćenju monoaksijalne merne sonde za određivanje ukupnog intenziteta električnog polja, potrebno primeniti dodatni faktor konverzije vrednosti 1.95, kao i da je potrebno uzeti u obzir dodatnu standardnu mernu nesigurnost vrednosti 33.07%.

Za druge tipove okruženja koji nisu razmatrani u ovom poglavlju, očekuje se da faktori konverzije imaju slično ponašanje i slične vrednosti za slučajeve srednje vrednosti i medijane. Sa druge strane, merna nesigurnost usled korišćenja monoaksijalne merne sonde zavisi od tipa okruženja, sa obzirom da broj komponenti koje čine ukupno električno polje utiče na mernu nesigurnost. Ovaj broj zavisi od broja različitih radio-predajnika u okruženju (različiti mobilni operatori, bazne stanice, ćelije), kao i od tipa okruženja (LOS propagacioni uslovi, NLOS propagacioni uslovi, reflektovane komponente). U okruženjima sa većim brojem različito polarizovanih komponenti, merni rezultat je manje zavisao od pravca usmerenja merne sonde, pa je i merna nesigurnost manja, i obrnuto.

Razvijeni model konverzije može biti primenjen na sve monoaksijalne merne sonde i merne antene, dizajnirane tako da ne utiču značajno na polje koje se meri, da

imaju dimenzije manje ili uporedive sa talasnom dužinom najveće frekvencije merenog polja, kao i da imaju dijagram zračenja antene sličan dijagramu zračenja kratkog dipola [38]-[40]. Potrebno je istaći da u većini slučajeva, merne sonde i merne antene koje se koriste za merenje izloženosti ljudi elektromagnetnim poljima, zadovoljavaju navedene uslove.

Model za konverziju monoaksijalnih u izotropna merenja, razvijen u ovom istraživanju, baziran je na statističkoj analizi faktora konverzije dobijenih za svaki odbirak intenziteta električnog polja. Za slučaj merenja na jednoj mernoj poziciji (pojedinačno merenje bez promene pozicije ili orijentacije merne sonde), dobijene vrednosti faktora konverzije i pripadajuće merne nesigurnosti mogu se koristiti za procenu opsega odstupanja rezultata merenja od tačne vrednosti. Vremenskim usrednjavanjem rezultata merenja dobijenih sa stacionarnom monoaksijalnom mernom sondom, povećava se preciznost rezultata merenja, ali tačnost ostaje ista [55]. Sa druge strane, za slučajeve pokretne merne sonde (npr. ekspozimetri koje nose ljudi), vremensko usrednjavanje rezultata merenja može dovesti do povećanja preciznosti i tačnosti, što dovodi do manje merne nesigurnosti [55]. Slično je i za slučaj prostornog usrednjavanja rezultata merenja dobijenih na više mernih pozicija sa stacionarnom monoaksijalnom mernom sondom (npr. mreža fiksnih ekspozimetara [96]). Navedeni slučajevi usrednjavanja će biti razmotreni u budućem radu.

Rezultati ovog poglavlja disertacije, koje se odnosi na razvijeni model za konverziju rezultata merenja intenziteta jedne prostorne komponente električnog polja (dobijeni korišćenjem monoaksijalne merne sonde) u intenzitet koji se dobija izotropnim merenjima, publikovani su u radu [102].

## 6. EKSPERIMENTALNA ANALIZA DUGOROČNE PROMENLJIVOSTI INTENZITETA ELEKTRIČNOG POLJA

Pored dobro poznatog *short-term* fedinga, koji generalno karakteriše propagaciju radio-talasa [77], na nivo elektromagnetnog zračenja u okolini bazne stanice utiče još nekoliko efekata od kojih su najznačajniji [47]: saobraćajno opterećenje, automatska kontrola snage predajnika i emitovanje sa prekidima (diskontinualna predaja). Ukupna snaga koju emituje bazna stanica direktno zavisi od broja aktivnih veza, odnosno njenog saobraćajnog opterećenja. Prethodno navedeni efekti dovode do velike nestabilnosti elektromagnetnog polja na mernoj poziciji.

Iz tog razloga, veoma je značajno da dodatna merna nesigurnost koja potiče od promenljivosti saobraćajnog opterećenja i funkcionalnosti predajnika bude uzeta u obzir prilikom analize srednje vrednosti u definisanom intervalu vremena. Vrednost ovog tipa nesigurnosti određuje se na bazi dnevnih profila dobijenih merenjem. *Long-term* (dugoročna) promenljivost intenziteta električnog polja, dobijena *band*-selektivnim merenjima u realnom mrežnom okruženju, razmatrana je u ovom poglavlju. Sprovedena su merenja intenziteta električnog polja u opsezima u kojima rade bazne stanice GSM, DCS i UMTS sistema sva tri operatera.

Nosivi ekspozimetar [103] i pojednostavljeni ekspozimetar [96] su razvijeni za *band*-selektivna merenja intenziteta električnog polja, i suštinski mere veliki broj komponenti polja električnog polja, koje potiču od različitih baznih stanica. Ove komponente se menjaju nezavisno jedna od druge, pošto su bazne stanice instalirane na različitim geografskim lokacijama i imaju različita saobraćajna opterećenja. To dovodi do potrebe za analizom dugoročne promenljivosti intenziteta električnog polja koje potiče od baznih stanica u celom opsegu rada javnog mobilnog sistema.

Ovo poglavlje je organizovano u 4 dela. Merni sistem i merna metodologija prezentovani su u prvom delu. Drugi deo je posvećen rezultatima merenja dugoročne promenljivosti intenziteta električnog polja. Merna nesigurnost koja potiče od

promenljivosti saobraćajnog opterećenja i funkcionalnosti predajnika analizirana je u trećem delu. Na kraju, u okviru četvrtog dela, izvedeni su zaključci.

## 6.1 Merni sistem i merna metodologija

Za potrebe analize sprovedene u ovom radu, korišćen je kalibrisani merni sistem koji se sastoji od spektralnog analizatora *Rohde&Schwarz FSH6* i izotropne merne sonde *Rohde&Schwarz TS-EMF*. Ovaj sistem je namenjen za frekvencijski selektivna merenja intenziteta električnog polja u opsegu od 30MHz do 3GHz. Za kontrolu rada mernog sistema korišćen je softver za dugoročna merenja *White Tigress Baby – Measurements*, napravljen posebno za ove namene u okviru Laboratorije za radio-komunikacije.

Sprovedena su *band*-selektivna merenja sa intervalom uzimanja odbirka od 10s, pri čemu je bio korišćen RMS detektor. Na mernom uređaju su bili podešeni sledeći parametri:

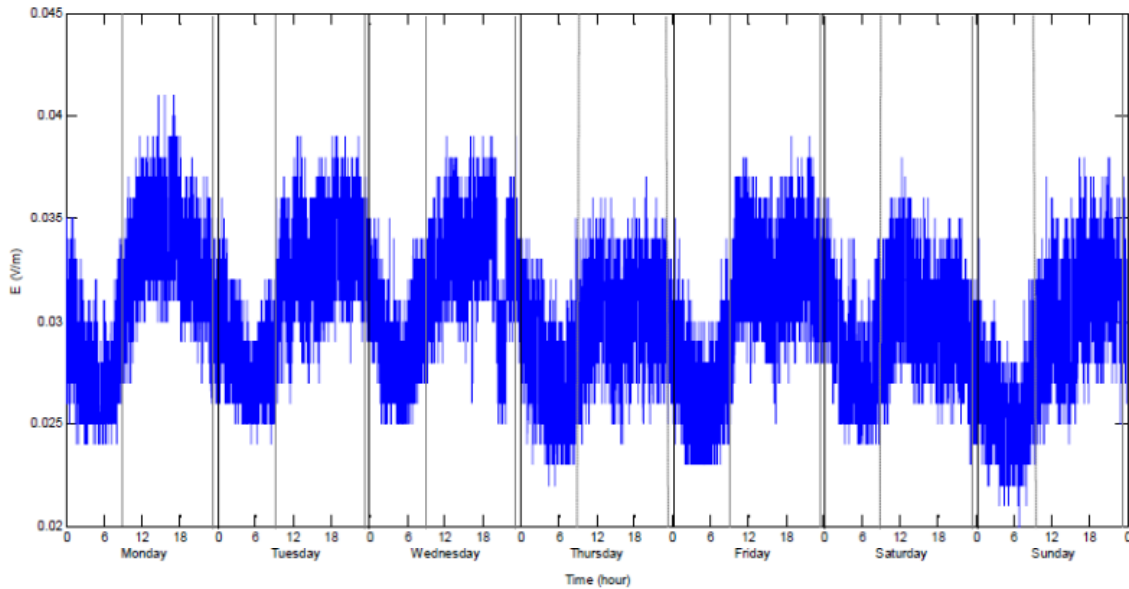
- centralna frekvencija 947.5MHz i širina opsega 25MHz (GSM opseg),
- centralna frekvencija 1830.1MHz i širina opsega 50.2MHz (DCS opseg), i
- centralna frekvencija 2140MHz i širina opsega 60MHz (UMTS opseg).

Merenja intenziteta električnog polja su sprovedena na 7 različitih lokacija u urbanoj zoni grada Beograda. Pet lokacija su izabrane kao merne pozicije u *indoor* okruženju, dok su preostale dve u *outdoor* okruženju. Merenja su sprovedena u vremenskom intervalu od 7 dana, na svakoj lokaciji. Tokom sedmodnevnih merenja merni sistem je bio stacionaran, a merna sonda je bila postavljena na tronižni drveni stativ. Na ovaj način, prikupljeni su rezultati merenja intenziteta električnog polja za frekvencijske opsege u kojima rade bazne stanice GSM, DCS i UMTS sistema, sva tri mobilna operatora.

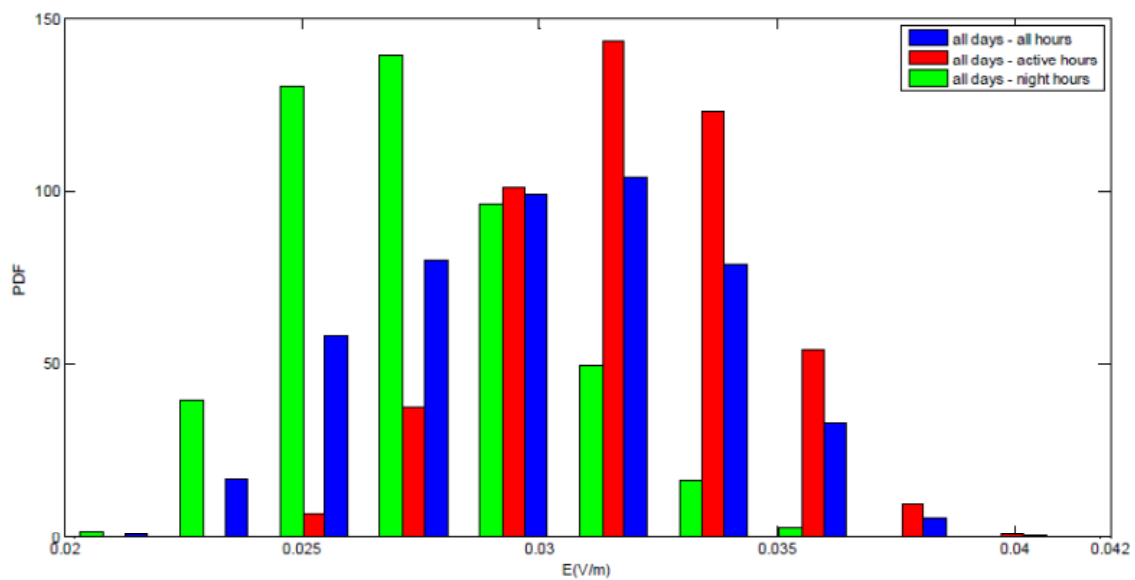
## 6.2 Rezultati merenja

Radi uštede prostora, u oviru disertacije dati su rezultati merenja za samo jednu od analiziranih lokacija i prikazani na slikama 6.1 do 6.9. Konkretno, na slikama 6.1, 6.4 i 6.7, prikazana je vremenska promenljivost intenziteta električnog polja u opsegu GSM, DCS i UMTS sistema, respektivno. Uprkos činjenici da su rezultati merenja prikazani

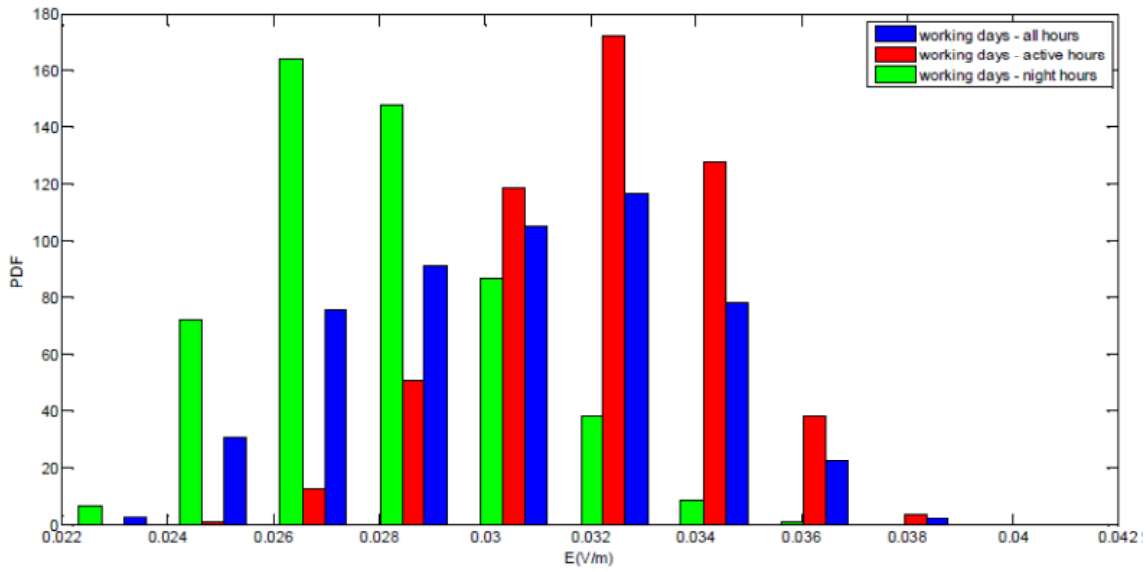
za samo jednu od analiziranih lokacija, diskusija i zaključci su zasnovani na rezultatima dobijenim za svih sedam lokacija.



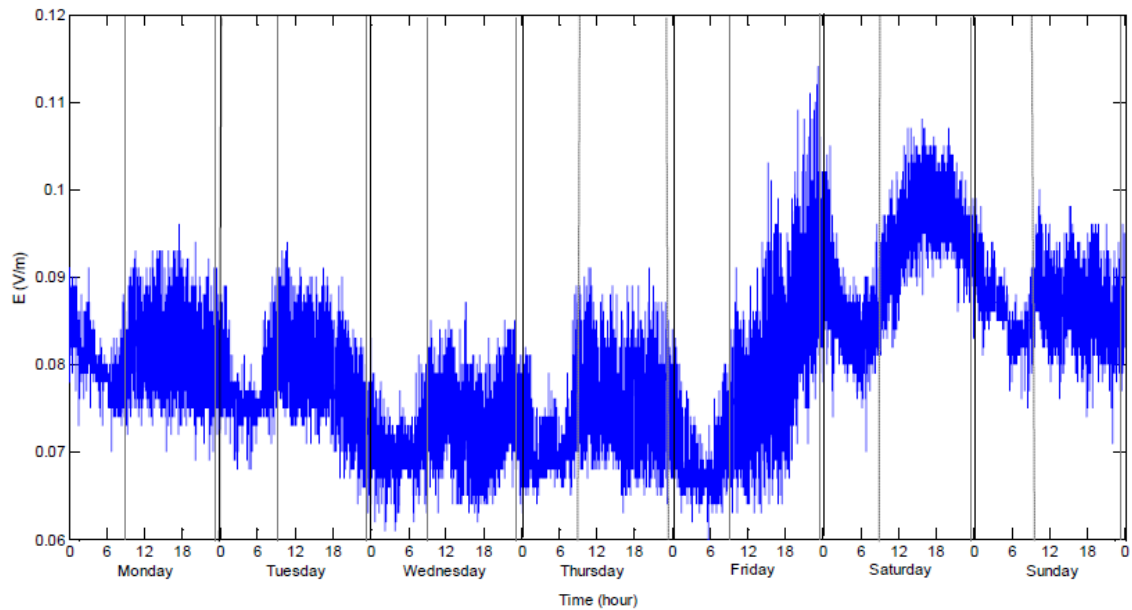
*Slika 6.1 Vremenska promenljivost intenziteta električnog polja u opsegu GSM sistema*



*Slika 6.2 Funkcija gustine verovatnoće intenziteta električnog polja u opsegu GSM sistema za kategorije “svi dani”*

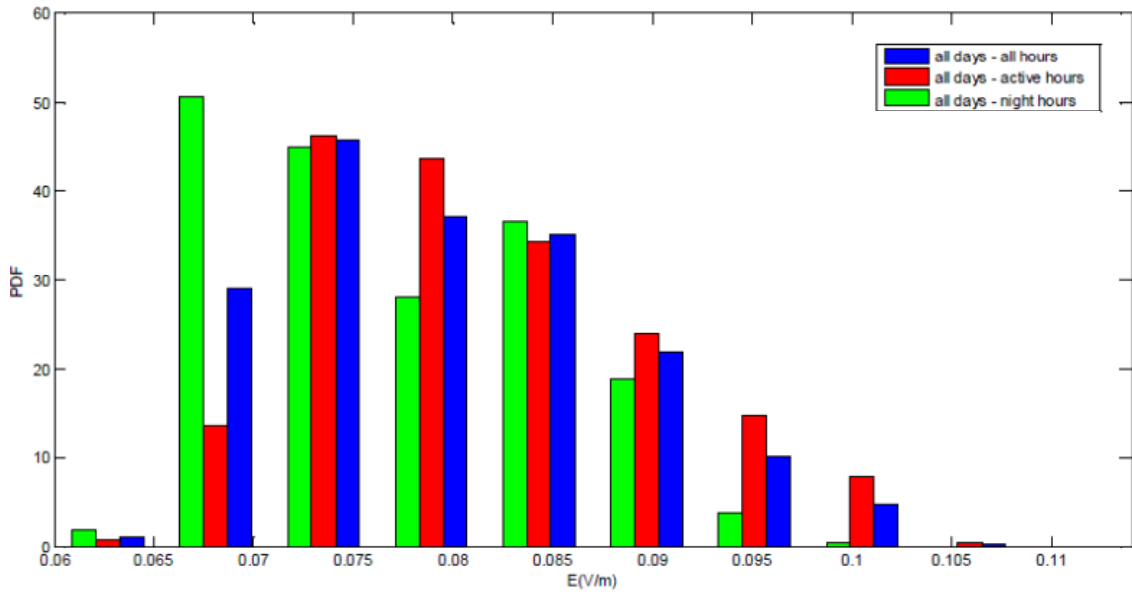


*Slika 6.3* Funkcija gustine verovatnoće intenziteta električnog polja u opsegu GSM sistema za kategorije “radni dani”

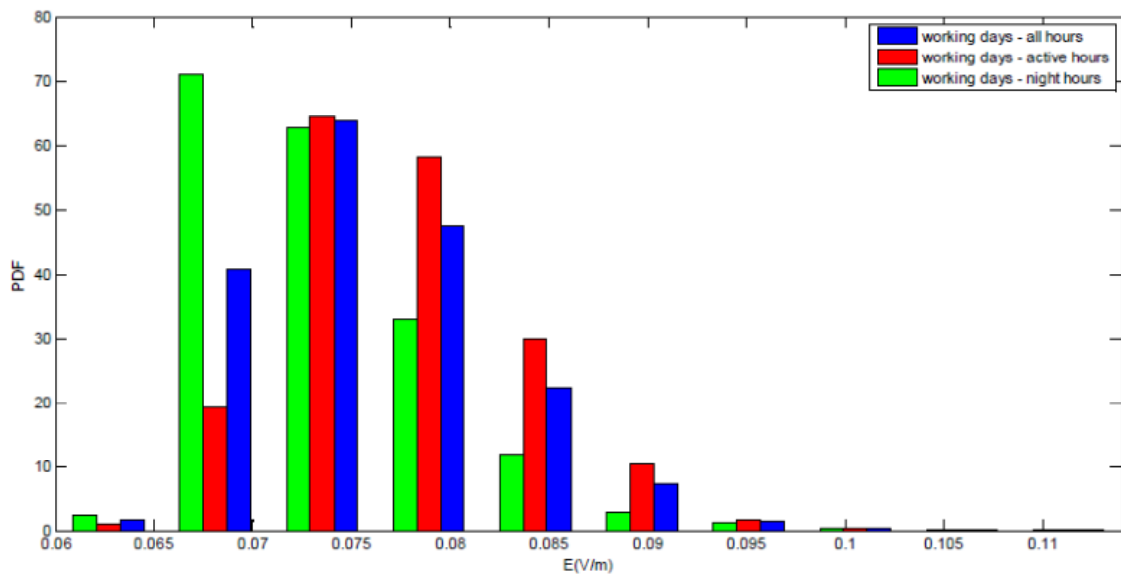


*Slika 6.4* Vremenska promenljivost intenziteta električnog polja u opsegu DCS sistema

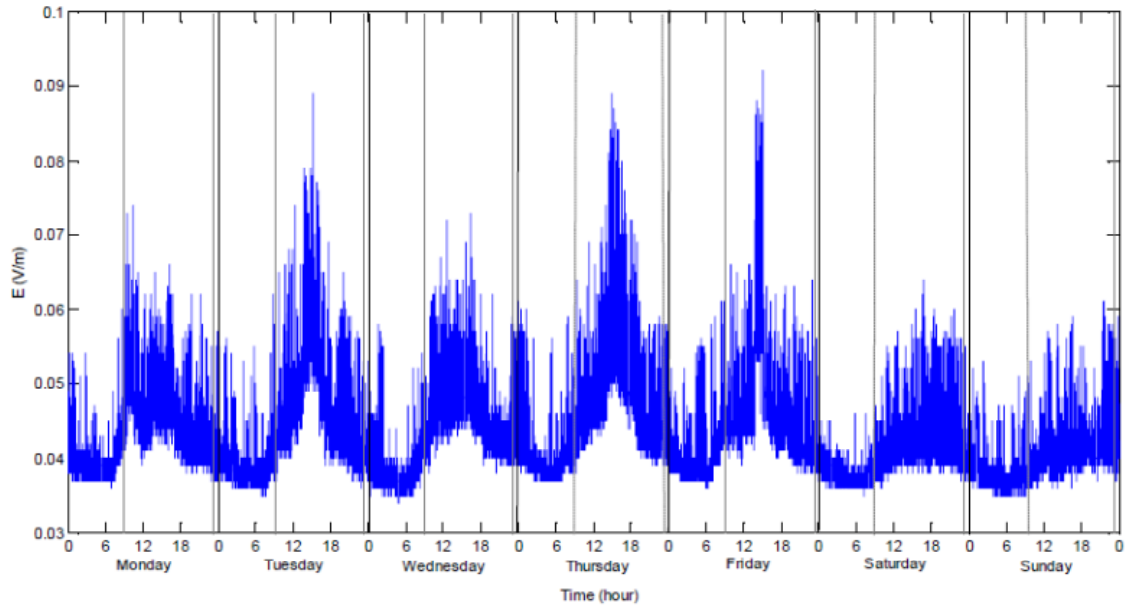




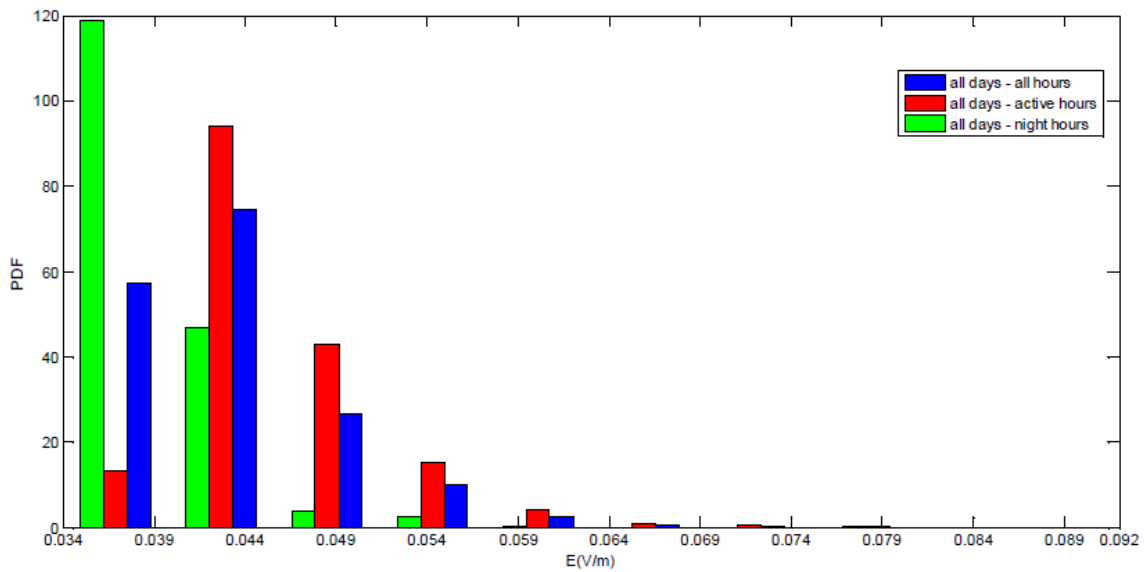
*Slika 6.5* Funkcija gustine verovatnoće intenziteta električnog polja u opsegu DCS sistema za kategorije “svi dani”



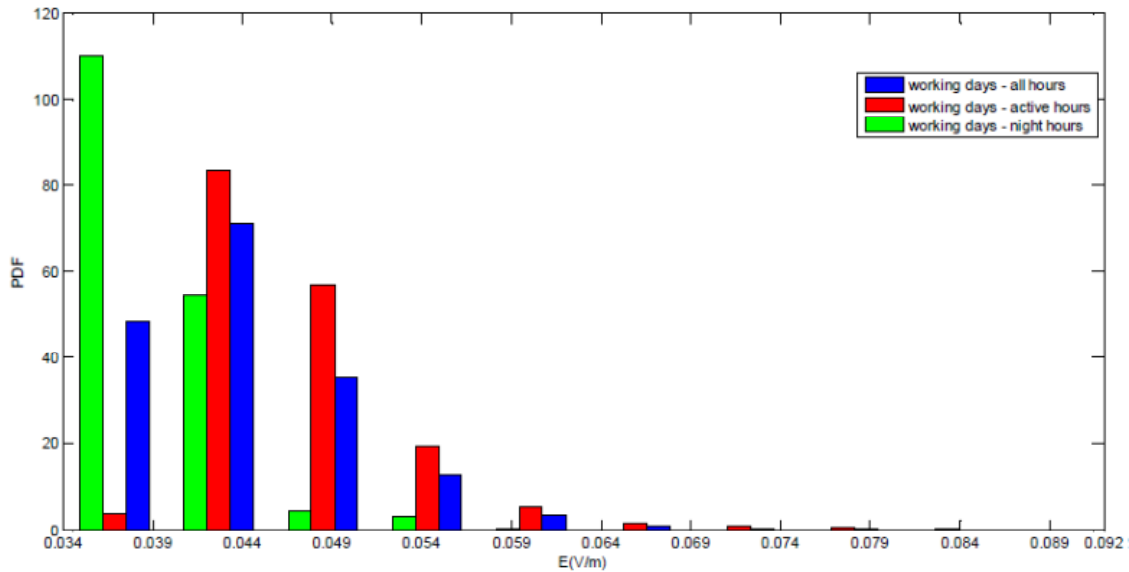
*Slika 6.6* Funkcija gustine verovatnoće intenziteta električnog polja u opsegu DCS sistema za kategorije “radni dani”



*Slika 6.7 Vremenska promenljivost intenziteta električnog polja u opsegu UMTS sistema*



*Slika 6.8 Funkcija gustine verovatnoće intenziteta električnog polja u opsegu UMTS sistema za kategorije “svi dani”*



*Slika 6.9 Funkcija gustine verovatnoće intenziteta električnog polja u opsegu UMTS sistema za kategorije “radni dani”*

Rezultati merenja intenziteta električnog polja za sva tri sistema jasno pokazuju da se za svaki dan mogu uočiti dva različita perioda, jedan sa višim nivoima i jedan sa nižim nivoima. Promene intenziteta električnog polja imaju veoma slično ponašanje u toku dana za svih sedam lokacija. Na početku dana (ponoć), intenzitet električnog polja opada. Nakon toga dolazi period, približno od 2:00h do 7:00h, u kom intenzitet električnog polja ima najmanju vrednost. Počevši od jutra, intenzitet električnog polja počinje da raste do približno 9:00h, kada dostiže nivo koji odgovara aktivnom delu dana. Aktivni deo dana ima najveću vrednost intenziteta električnog polja i traje do približno 23:00h. Na samom kraju dana, intenzitet električnog polja počinje da opada. U skladu sa uočenim ponašanjem intenziteta električnog polja, dan je podeljen u dva različita perioda: “aktivni sati” (9h-23h) i “noćni sati” (23h-9h).

Kao što je očekivano, rezultati merenja pokazuju da je kratkoročna promenljivost (promenljivost u kraćem vremenskom intervalu) tokom “aktivnih sati” veća nego tokom “noćni sati”. Međutim, kada se posmatra lokalna srednja vrednost ove varijabilnosti, to je suprotan slučaj. Lokalne srednje vrednosti su prilično stabilne tokom celog perioda “aktivnih sati” i imaju najveću vrednost. Ipak, utvrđeni su neki izuzeci za UMTS sistem, gde postoje karakteristični periodi sa značajnim porastom intenziteta električnog polja tokom “aktivnih sati”.

Kao što je već rečeno, tokom “noćnih sati” kratkoročna varijabilnost intenziteta električnog polja je manja nego u “aktivnim satima”. Nasuprot periodu “aktivnih sati”, lokalne srednje vrednosti imaju značajne promene u periodu “noćnih sati”. Na početku perioda “noćnih sati”, detektovano je značajno smanjenje lokalnih srednjih vrednosti. Takođe, na kraju perioda “noćnih sati” utvrđeno je značajno povećanje lokalnih srednjih vrednosti. Sa druge strane, period u sredini “noćnih sati” (približno od 2:00h do 7:00h) je vreme neaktivnosti u kojem kratkoročna varijabilnost, kao i lokalne srednje vrednosti intenziteta električnog polja, imaju najniže vrednosti.

Kada su u pitanju dani u nedelji, može se zaključiti da se dani vikenda neznatno razlikuju od radnih dana. Ove razlike se manifestuju u manjoj razlici srednjih vrednosti intenziteta električnog polja između “aktivnih sati” i “noćnih sati” tokom vikenda, nego što je to slučaj tokom radnih dana.

Za potrebe detaljnije analize, definisane su dve specifične kategorije za sedmodnevnu nedelju: “radni dani” (od ponedeljka do petka) i “svi dani” (od ponedeljka do nedelje). U skladu sa ovim, razmatrano je šest različitih kategorija:

- “svi dani - svi sati”,
- “radni dani - svi sati”,
- “svi dani - aktivni sati”,
- “radni dani - aktivni sati”,
- “svi dani - noćni sati” i
- “radni dani - noćni sati”.

Funkcija gustine verovatnoće intenziteta električnog polja za prethodno definisanih 6 kategorija data je na slikama 6.2 i 6.3 za GSM, 6.5 i 6.6 za DCS, i 6.8 i 6.9 za UMTS. U slučaju GSM i DCS sistema, funkcija gustine verovatnoće za kategorije “svi sati” ima ponašanje slično normalnoj raspodeli (i za “svi dani” kategorije i za “radni dani” kategorije). Sa druge strane, funkcija gustine verovatnoće za UMTS sistem ima ponašanje slično log-normalnoj raspodeli i za kategorije “svi dani” i za kategorije “radni dani”.

Razmatrajući funkciju gustine verovatnoće za kategorije “aktivni sati” i “noćni sati” odvojeno, može se zaključiti da oba tipa raspodela imaju slično ponašanje kao i za slučaj kategorije “svi sati”, sa jedinom razlikom u srednjim vrednostima. Raspodele za

GSM i DCS sistem imaju ponašanje slično normalnoj raspodeli, dok raspodele za UMTS sistem imaju ponašanje slično log-normalnoj raspodeli.

### 6.3 Merna nesigurnost koja potiče od promenljivosti saobraćajnog opterećenja i funkcionalnosti predajnika

U skladu sa prethodno navedenim efektima, koji dovode do veće nestabilnosti intenziteta elektromagnetnog polja koje potiče od baznih stanica javnih mobilnih sistema, dodatna standardna merna nesigurnost  $u$  koja potiče od promenljivosti saobraćajnog opterećenja i funkcionalnosti predajnika, mora biti uzeta u obzir prilikom analize srednje vrednosti u definisanom intervalu vremena.

Za svaku od 6 prethodno definisanih kategorija, navedena merna nesigurnost je analizirana za različite intervale usrednjavanja: 10s, 30s, 1min, 6min, 15min, 30min, 1h, 3h, 5h i 10h. Skup rezultata merenja podeljen je na nepreklapajuće intervale definisanog trajanja. Za svaki od intervala određivana je jedinstvena srednja vrednost, izuzev u slučaju intervala od 10s, gde nije bilo usrednjavanja. Maksimalno trajanje intervala usrednjavanja bilo je 10h, i ono je određeno u skladu sa trajanjem perioda “noćni sati”.

Merna nesigurnost  $u$  koja potiče od promenljivosti saobraćajnog opterećenja i funkcionalnosti predajnika, određuje se statističkom analizom serije izračunatih srednjih vrednosti [55] i [61]. U prvom koraku, određuju se srednja vrednost  $E_{meas}$  i standardna devijacija  $\sigma(E_{meas})$  pomoću jednačina:

$$E_{meas} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_{meas\_i} \quad (6.1)$$

$$\sigma(E_{meas}) = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (E_{meas\_i} - E_{meas})^2} \quad (6.2)$$

gde  $E_{meas\_i}$  predstavlja  $i$ -tu srednju vrednost, a  $N$  ukupan broj srednjih vrednosti.

Relativni odnos standardne devijacije i srednje vrednosti određuje vrednost relativne standardne merne nesigurnosti koja potiče od promenljivosti saobraćajnog opterećenja i funkcionalnosti predajnika [55]:

$$u = \frac{\sigma(E_{meas})}{E_{meas}} \quad (6.3)$$

Korišćenjem jednačina (6.1)-(6.3), određena je relativna standardna merna nesigurnost za svih 6 definisanih kategorija. Relativna standardna merna nesigurnost koja potiče od promenljivosti saobraćajnog opterećenja i funkcionalnosti predajnika u zavisnosti od intervala usrednjavanja, usrednjena za svih 7 analiziranih lokacija, data je u tabelama 6.1, 6.2 i 6.3, za GSM, DCS i UMTS, respektivno. Dobijeni rezultati su takođe prikazani na slikama 6.10 do 6.15.

Dodatno, relativna standardna merna nesigurnost koja potiče od promenljivosti saobraćajnog opterećenja i funkcionalnosti predajnika analizirana je za specifične intervale usrednjavanja od 24h (svi sati), 14h (aktivni sati) i 10h (noćni sati). Rezultati usrednjeni na svih 7 lokacija su prikazani u tabeli 6.4. Ovi rezultati pokazuju da su standardne merne nesigurnosti za vrednosti usrednjenje za sve sate, aktivne sate i noćne sate ispod 5%.

**Tabela 6.1** Relativna standardna merna nesigurnost [%] u zavisnosti od intervala usrednjavanja za GSM sistem

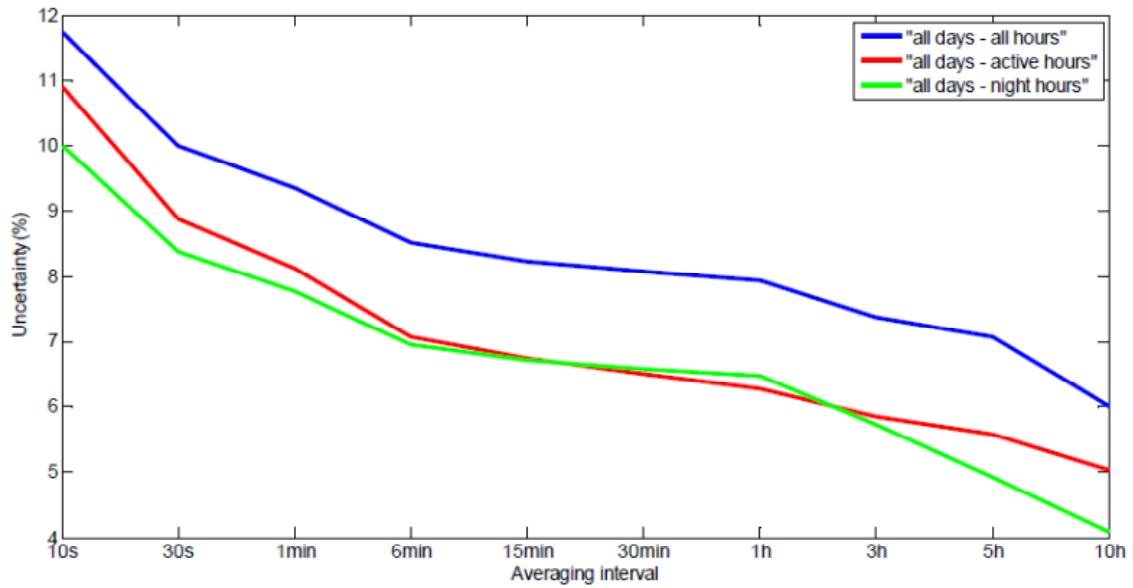
Kategorija	Interval usrednjavanja									
	10s	30s	1min	6min	15min	30min	1h	3h	5h	10h
“svi dani – svi sati”	11.74	10.00	9.35	8.51	8.23	8.07	7.94	7.38	7.08	6.00
“radni dani – svi sati”	12.11	10.36	9.71	8.86	8.59	8.43	8.27	7.67	7.27	6.03
“svi dani – aktivni sati”	10.91	8.87	8.12	7.08	6.74	6.51	6.28	5.85	5.58	5.04
“radni dani – aktivni sati”	11.16	8.90	8.13	7.04	6.68	6.43	6.19	5.59	5.07	4.52
“svi dani – noćni sati”	9.99	8.38	7.77	6.95	6.71	6.58	6.48	5.73	4.93	4.08
“radni dani – noćni sati”	10.13	8.53	7.91	7.10	6.88	6.75	6.63	5.90	4.89	4.04

**Tabela 6.2** Relativna standardna merna nesigurnost [%] u zavisnosti od intervala usrednjavanja za DCS sistem

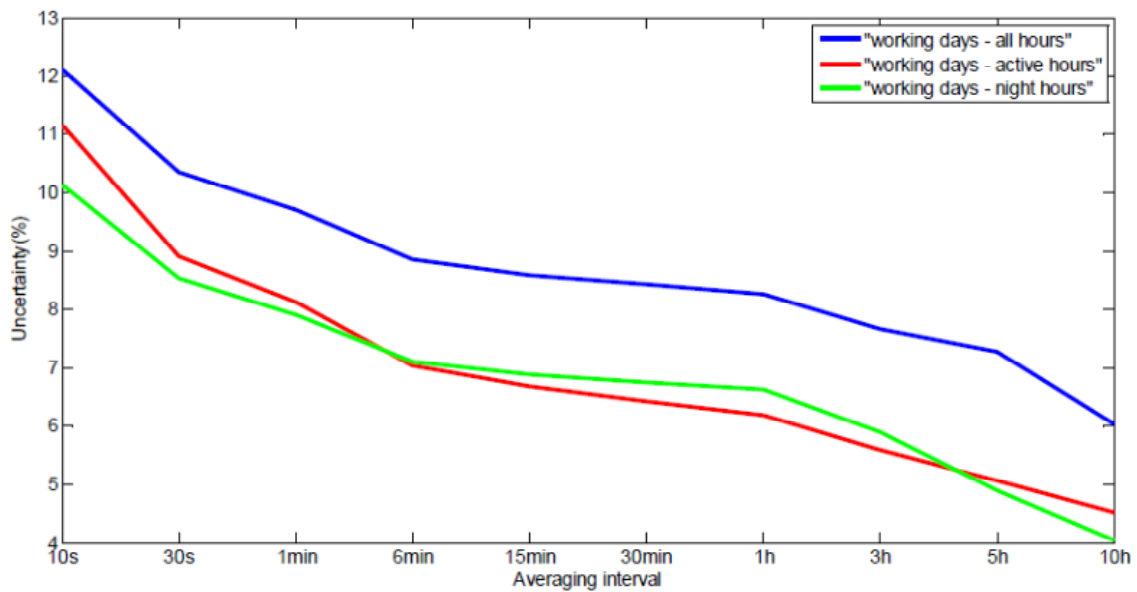
Kategorija	Interval usrednjavanja									
	10s	30s	1min	6min	15min	30min	1h	3h	5h	10h
“svi dani – svi sati”	7.73	7.11	6.90	6.58	6.46	6.36	6.24	5.84	5.51	4.80
“radni dani – svi sati”	7.70	7.08	6.87	6.55	6.39	6.29	6.16	5.69	5.28	4.44
“svi dani – aktivni sati”	7.88	7.09	6.80	6.33	6.14	5.99	5.80	5.42	4.86	4.27
“radni dani – aktivni sati”	7.92	7.10	6.81	6.32	6.12	5.96	5.76	5.23	4.52	3.88
“svi dani – noćni sati”	5.92	5.36	5.17	4.91	4.81	4.76	4.68	4.24	3.80	3.79
“radni dani – noćni sati”	5.22	4.64	4.44	4.16	4.04	3.98	3.86	3.37	2.76	2.71

**Tabela 6.3** Relativna standardna merna nesigurnost [%] u zavisnosti od intervala usrednjavanja za UMTS sistem

Kategorija	Interval usrednjavanja									
	10s	30s	1min	6min	15min	30min	1h	3h	5h	10h
“svi dani – svi sati”	14.58	13.04	12.47	11.60	11.30	11.08	10.86	10.32	9.73	7.70
“radni dani – svi sati”	14.69	13.13	12.55	11.67	11.37	11.13	10.91	10.35	9.71	8.07
“svi dani – aktivni sati”	13.44	11.43	10.66	9.41	8.92	8.62	8.29	7.51	6.79	6.10
“radni dani – aktivni sati”	13.18	11.12	10.32	9.02	8.49	8.16	7.81	6.86	5.72	4.69
“svi dani – noćni sati”	12.21	10.90	10.42	9.70	9.43	9.27	9.13	8.26	6.67	5.15
“radni dani – noćni sati”	12.67	11.36	10.86	10.13	9.83	9.66	9.51	8.65	6.93	5.33

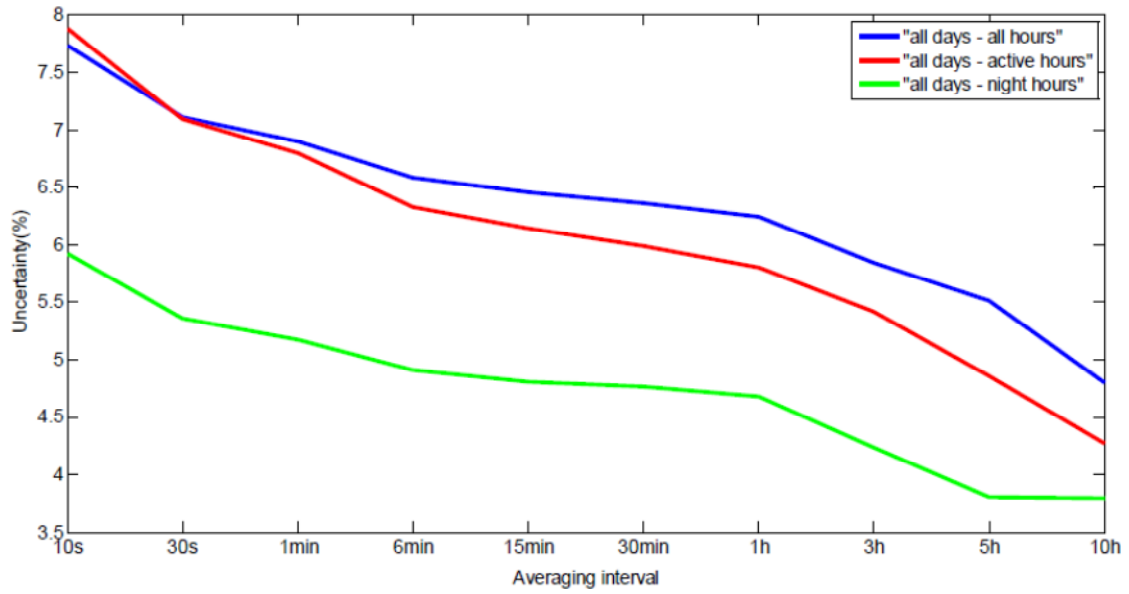


**Slika 6.10** Relativna standardna merna nesigurnost u zavisnosti od intervala usrednjavanja za kategorije "svi dani" - GSM sistem

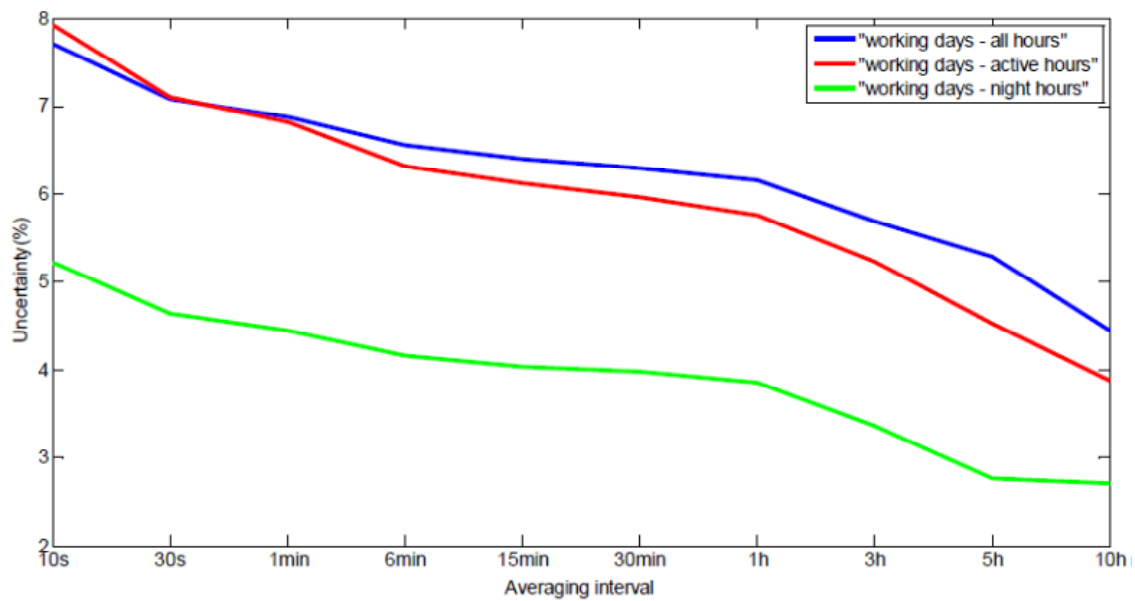


**Slika 6.11** Relativna standardna merna nesigurnost u zavisnosti od intervala usrednjavanja za kategorije "radni dani" - GSM sistem

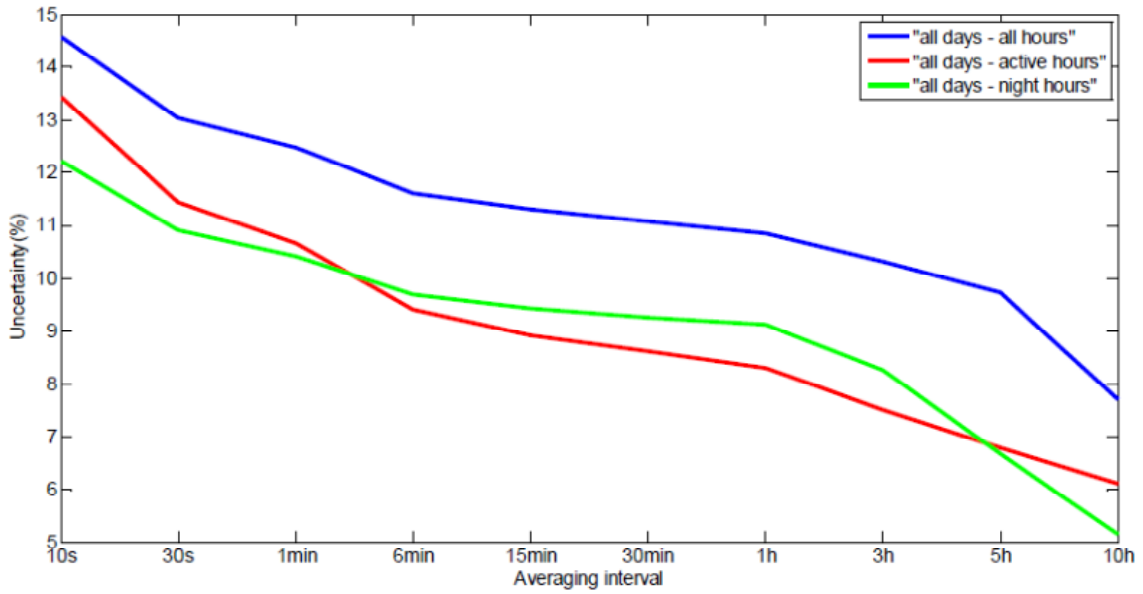




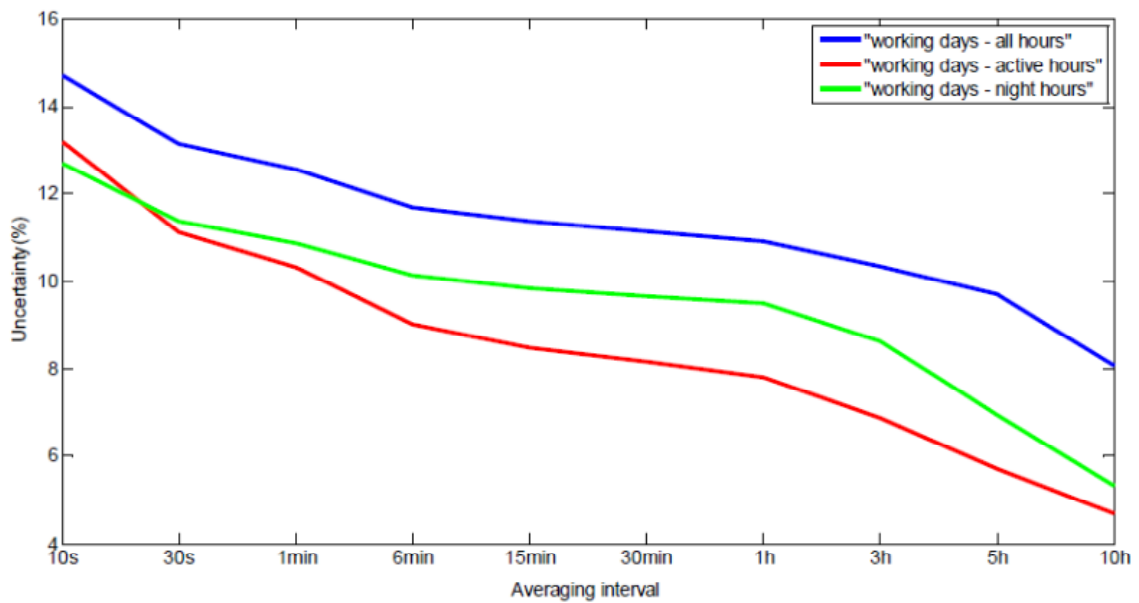
**Slika 6.12** Relativna standardna merna nesigurnost u zavisnosti od intervala usrednjavanja za kategorije “svi dani” - DCS sistem



**Slika 6.13** Relativna standardna merna nesigurnost u zavisnosti od intervala usrednjavanja za kategorije “radni dani” - DCS sistem



*Slika 6.14* Relativna standardna merna nesigurnost u zavisnosti od intervala usrednjavanja za kategorije “svi dani” - UMTS sistem



*Slika 6.15* Relativna standardna merna nesigurnost u zavisnosti od intervala usrednjavanja za kategorije “radni dani” - UMTS sistem

**Tabela 6.4** Relativna standardna merna nesigurnost [%] u zavisnosti od intervala usrednjavanja za GSM, DCS i UMTS sistem

Sistem	Kategorija	Interval usrednjavanja		
		Noćni sati	Aktivni sati	Svi sati
GSM	“svi dani”	4.08	4.72	3.83
	“radni dani”	4.04	4.31	3.57
DCS	“svi dani”	4.05	4.79	3.86
	“radni dani”	4.18	4.40	3.67
UMTS	“svi dani”	3.76	4.67	3.68
	“radni dani”	4.00	4.30	3.51

## 6.4 Zaključak

*Long-term* (dugoročna) promenljivost intenziteta električnog polja, dobijena *band*-selektivnim merenjima u realnom mrežnom okruženju, razmatrana je u ovom poglavlju. Rezultati merenja intenziteta električnog polja u opsezima u kojima rade bazne stanice GSM, DCS i UMTS sistema sva tri operatora, jasno pokazuju da se dan može podeliti u dva različita perioda: “aktivni sati” (9h-23h) sa većim vrednostima i “noćni sati” (23h-9h) sa manjim vrednostima.

Sa druge strane, kao što je i očekivano, sedmodnevna merenja pokazuju da se za nedelju mogu definisati dve kategorije: “radni dani” (od ponedeljka do petka) i “svi dani” (od ponedeljka do nedelje).

Dodatna merna nesigurnost koja potiče od promenljivosti saobraćajnog opterećenja i funkcionalnosti predajnika, mora biti uzeta u obzir prilikom analize srednje vrednosti u definisanom intervalu vremena. Ova nesigurnost je određena za 6 različitih kategorija definisanih u zavisnosti od dana u nedelji i specifičnih perioda dana. Za svaku od definisanih kategorija, navedena merna nesigurnost je analizirana za različite intervale usrednjavanja: 10s, 30s, 1min, 6min, 15min, 30min, 1h, 3h, 5h i 10h.

Poređenjem opsega merne nesigurnosti za različite sisteme, može se zaključiti da su najveće vrednosti za UMTS sistem, sa opsegom standardne merne nesigurnosti 4,69-14.69%. Opseg standardne merne nesigurnosti za GSM sistem je 4.04-12.11%. Najmanje vrednosti standardne merne nesigurnosti ima DCS, opseg je 2.71-7.92%.

Pored govorne komunikacije, UMTS sistem se često koristi za prenos podataka, što dovodi do veće varijabilnosti intenziteta električnog polja, a samim tim i veće

nesigurnosti. Sa druge strane, GSM sistem pruža servise široj populaciji korisnika, i to uglavnom za govornu komunikaciju, a manje za prenos podataka. Na kraju, DCS sistem ima najmanji deo saobraćaja i uglavnom obezbeđuje govorni servis za korisnike. Sa druge strane, prenos podataka je mali deo saobraćaja u DCS sistemu.

Rezultati pokazuju da se nesigurnost smanjuje sa povećanjem intervala usrednjavanja. Na primer, za kategoriju “svi dani - svi sati” za UMTS, nesigurnost se smanjuje sa 14.58% (dobijenih za interval od 10s), na 7.7% (za interval od 10h). Za kategoriju “svi dani - svi sati” za GSM, nesigurnost se smanjuje sa 11.74% (za interval od 10s) na 6% (za interval od 10h). Za DCS, i kategoriju “svi dani - svi sati”, nesigurnost se smanjuje sa 7.73% (za interval od 10s) na 4.8% (za interval od 10h). Za sve ostale kategorije može se uočiti slično ponašanje.

Dodatno, standardna merna nesigurnost koja potiče od promenljivosti saobraćajnog opterećenja i funkcionalnosti predajnika analizirana je za intervale usrednjavanja 24h (svi sati), 14h (aktivni sati) i 10h (noćni sati). Rezultati usrednjeni na svih 7 lokacija pokazuju da su standardne merne nesigurnosti za vrednosti usrednjenje za sve sate, aktivne sate i noćne sate, ispod 5%.

Kao što je već rečeno, da bi se proverila usaglašenost sa propisanim normama, većina standarda koji definišu metode merenja izlaganja ljudi elektromagnetnim poljima, kao i dokumenti kojima su propisane norme, zahteva određivanje maksimalne 6-minutne vrednosti intenziteta električnog polja. Rezultati merenja dugoročne analize sprovedene u ovom poglavlju pokazuju da se maksimalne 6-minutne vrednosti intenziteta električnog polja javljaju u toku “aktivnih sati” dana. Sa druge strane, postupak merenja se u praksi sprovodi takođe u okviru “aktivnih sati” u toku dana, i to “svih dana” u toku nedelje. S obzirom da se merenja sprovode tokom dana, vrednosti koje se izmere mogu da odstupaju od slučaja maksimalnog opterećenja, pa se zbog toga javlja dodatna nesigurnost rezultata merenja. To upravo odgovara analiziranoj relativnoj standardnoj mernoj nesigurnosti u slučaju intervala usrednjavanja od 6min za kategoriju “svi dani – aktivni sati”. Dakle, prilikom sprovođenja postupka merenja na lokaciji, da bi smo obuhvatili “najkritičniji” slučaj (tj. maksimalne 6-minutne vrednosti), potrebno je uzeti u obzir dodatnu standardnu mernu nesigurnost u iznosu 7.08%, 6.33% i 9.41%, za GSM, DCS i UMTS, respektivno.

Deo rezultata ovog poglavlja disertacije, koji se odnosi na analizu dugoročne promenljivosti intenziteta električnog polja u opsegu GSM sistema, kao i određivanje pripadajuće merne nesigurnosti koja potiče od promenljivosti saobraćajnog opterećenja i funkcionalnosti predajnika, publikovani su u radu [104].

## **7. STATISTIČKA ANALIZA REZULTATA MERENJA INTENZITETA ELEKTRIČNOG POLJA U OKOLINI BAZNIH STANICA**

Intenzivan razvoj bežičnih komunikacionih sistema obeležio je prethodnu deceniju. Zbog prostorne rasprostranjenosti naročito se ističu javni mobilni sistemi (GSM, DCS i UMTS). Sa obzirom da za međusobnu komunikaciju koriste elektromagnetne talase, kao posledica se javlja porast nivoa elektromagnetnog zračenja u životnom okruženju. Generalno, kod stanovništva postoji strah od efekata ovog zračenja [105]-[106]. Sa druge strane, mobilni sistemi su danas nezamenljiv deo savremenog života i ne mogu se jednostavno ukloniti ili zameniti. Iz tih razloga, od velike važnosti je potreba za objektivnim sagledavanjem nivoa elektromagnetnog zračenja u životnom okruženju. Pored toga, izloženost ljudi radio-frekvencijskim elektromagnetnim poljima potrebno je redovno pratiti, zbog očekivanog ogromnog rasta saobraćaja u budućim bežičnim mrežama [107] i planirane guste instalacije malih ćelija, sa baznim stanicama postavljenim bliže korisnicima [108].

Poslednjih godina, porastao je interes naučne zajednice prema biološkim efektima i zdravstvenim posledicama izlaganja ljudi elektromagnetnim poljima [16]. Povećana koncentracija elektromagnetne energije u opsegu radio-frekvencija na ljudima izaziva efekte koji se grubo mogu klasifikovati u dve osnovne kategorije [1]-[15]: toplotni efekat i stimulativni efekat. Treba istaći da se potencijalni negativni efekti mogu očekivati tek na nivou izloženosti znatno iznad propisanih normi.

U poslednje tri decenije, sprovedena su obimna teorijska i eksperimentalna istraživanja nivoa elektromagnetnih zračenja koja potiču od različitih vrsta radio sistema u neposrednom životnom okruženju [109]-[119]. Metode za merenje intenziteta elektromagnetnog polja su definisane i standardizovane [38]-[44]. Poslednjih godina, posebna pažnja posvećena je proceni izloženosti opšte ljudske populacije elektromagnetnim zračenjima, a naročito zračenjima koja potiču od javnih mobilnih

sistema. Merenja i proračuni u cilju određivanja izloženosti opšte ljudske populacije u okolini GSM i UMTS baznih stanica u Nemačkoj, sprovedeni su u radu [120]. Autori rada [78], prikazali su rezultate merenja izloženosti poljima baznih stanica javnih mobilnih sistema u urbanim zonama, korišćenjem personalnih ekspozimetara. Merenje elektromagnetnog zračenja u Italiji i Grčkoj, uspostavljanjem mreže za monitoring, sa velikim brojem mernih pozicija distribuiranih u ovim zemljama, dato je u radovima [121]-[123]. Elektromagnetno zračenje koje potiče od baznih stanica javnih mobilnih sistema u operativnom radu, analizirano je u Kini [124], Koreji [125]-[126], Gani [127], Španiji [128], Turskoj [129] i Australiji [130]. Veoma velika baza od gotovo 260000 merenja ćelijskih i FM radio signala iz sedam Afričkih zemalja je bila predmet istraživanja rada [131]. Izloženosti opšte ljudske populacije elektromagnetnim poljima LTE baznih stanica u Štokholmu, analizirana je u radu [51]. Poređenje nivoa izloženosti u *outdoor* okruženju, između četiri različita evropska grada (Amsterdam, Basel, Gent and Brisel), urađeno je u radu [132]. Merenje izloženosti na krovu objekta, prezentovano je od strane autora rada [133]. Rezultati merenja izloženosti radio-frekvencijskim i mikrotalasnim zračenjima antena baznih stanica postavljenih na krovu objekata u Maleziji, prezentovani su u radu [134].

Za potrebe ovog poglavlja, sprovedena su intenzivna merenja intenziteta električnog polja na 664 različite lokacije baznih stanica javnih mobilnih sistema. U zavisnosti od načina instalacije antenskog sistema, lokacije baznih stanica su klasifikovane u tri osnovne kategorije: stubovi (316 lokacija), lokacije sa instalacijom na objektu (276 lokacija) i lokacije sa instalacijom unutar objekta (72 lokacije). Za svaku od navedenih kategorija sprovedena je zasebna statistička analiza rezultata merenja intenziteta električnog polja u okolini baznih stanica. Cilj ovih analiza bio je da se dobije bolji uvid u izloženost ljudi elektromagnetnom zračenju u realnim okruženjima baznih stanica, kao i da se proverí usklađenost sa postojećim normama.

Za kategoriju stubovi, sprovedena je statistička analiza rezultata merenja sa 316 lokacija baznih stanica, na kojima je antenski sistem bio instaliran na antenskom stubu. U radu [135], izvršena su merenja nivoa elektromagnetnog zračenja u okolini 60 GSM baznih stanica postavljenih na antenskim stubovima u Iranu, i merne pozicije su razvrstane u pet skupova u zavisnosti od udaljenosti od antenskog stuba (0 do 250m sa korakom od 50m). Autori rada [135] su došli do zaključka da se maksimalne vrednosti

javljaju u opsegu udaljenosti od 0 do 50m, uprkos činjenici da ove zone nisu u glavnom snopu zračenja antene. U poglavlju 7.3, sprovedena je statistička analiza rezultata merenja intenziteta električnog polja u okolini baznih stanica instaliranih na antenskom stubu, za horizontalne udaljenosti od 0 do 50m, sa korakom 5m.

Za kategoriju instalacija na objektu, statistička analiza rezultata merenja sprovedena je za 276 lokacija baznih stanica, na kojima je antenski sistem bazne stanice bio postavljen na objektu. Elektromagnetno zračenje baznih stanica instaliranih na krovovima objekata, analizirano je u radovima [133]-[134]. Ova kategorija lokacija baznih stanica je takođe definisana kao jedan od scenarija razmatranih u radu [120]. Po najboljem znanju autora, do sada nije bila sprovedena analiza izloženosti elektromagnetnom zračenju za različite kategorije objekata, u zavisnosti od namene objekta. U poglavlju 7.4, sprovedena je analiza i poređenje nivoa elektromagnetnog zračenja za slučajeve (podkategorije) stambenih, industrijskih, kancelarijskih i zdravstvenih objekata. Lokacije sa antenama baznih stanica instaliranih na nivou prizemlja i prvog sprata objekta svrstane su u posebnu podkategoriju koja je nazvana prizemne instalacije. Dodatno, sprovedena je i analiza za različite slučajeve načina postavljanja antena (instalacija na ivici krova objekta, instalacija na stubu na krovu objekta i instalacija na bočnom zidu objekta). Potrebo je istaći da su merenja sprovedena u *outdoor* i *indoor* okruženju. U slučaju *outdoor* okruženja, merenja su sprovedena na spoljašnjim delovima zgrade (krov i terase), izuzev u slučaju prizemnih instalacija. Za ovu podkategoriju, merenja su vršena na nivou tla u okolini objekta. Sa druge strane, merenja u *indoor* okruženju su podrazumevala merenje unutar objekta.

Kada je reč o kategoriji instalacija unutar objekta, statistička analiza je sprovedena na 72 lokacije mikro baznih stanica, na kojima su antene bile instalirane unutar objekta. *Indoor* mikro bazne stanice predstavljaju često rešenje, naročito kada postoji potreba da se obezbedi servis unutar objekata koje koristi veliki broj ljudi, a u kojima se očekuje veliki saobraćaj (npr. tržni centri ili veliki kancelarijski prostori). Imajući u vidu da *indoor* mikro bazne stanice pokrivaju znatno manju servisnu zonu, one obično imaju manju predajnu snagu nego *outdoor* makro bazne stanice. Pored toga, *indoor* mikro bazne stanice obično rade sa manji brojem kanala (1 ili 2 predajnika), i koriste antene koje imaju mala usmerenja (često omidirekcione antene). Sa obzirom da regulatorna tela često zahtevaju analize elektromagnetnog zračenja samo za bazne stanice koje imaju



efektivnu izračenu snagu (ERP - *Effective Radiated Power*) iznad propisane vrednosti (npr. u Srbiji je po uredbi vlade definisana granica za ERP od 250W), uticaj *indoor* mikro baznih stanica često biva zanemaren. Ipak, u slučaju *indoor* mikro baznih stanica, ljudi mogu da se nađu veoma blizu antena (na samo par metara), što nije slučaj sa *outdoor* makro baznim stanicama. Iz tog razloga, elektromagnetno zračenje koje potiče od *indoor* mikro baznih stanica, treba pažljivo analizirati.

Većina radova iz ove oblasti [120]-[135] se bavi analizom elektromagnetnog zračenja i u *outdoor* i u *indoor* okruženju, ali za slučajeve zračenja koje potiče od baznih stanice, koje su instalirane izvan objekata. Elektromagnetno zračenje koje potiče od *indoor* baznih stanica analizirano je u radovima [136] i [137], ali za slučajeve piko i femto baznih stanica, respektivno. Iako piko i femto bazne stanice imaju sličan način postavljanja antena, one emituju sa manjom snagom od *indoor* mikro baznih stanica. Predajna snaga piko i femto baznih stanica je obično reda 200mW i 20mW, respektivno, dok je predajna snaga *indoor* mikro baznih stanica reda 2W. Pored toga, *indoor* mikro bazne stanice su često rešenje za *indoor* pokrivanje u Srbiji, za razliku od piko i femto baznih stanica.

Po najboljem znanju autora, *indoor* mikro bazne stanice su analizirane samo u radu [120], kao jedan od 11 različitih scenarija. Najveći nivoi elektromagnetnog zračenja su utvrđeni upravo za scenario *indoor* mikro baznih stanica. Ipak, samo dve lokacije *indoor* mikro baznih stanica su analizirane i nije sprovedena nikakva dodatna analiza za ovaj slučaj. Iz tog razloga, u okviru poglavlja 7.5, sprovedena je statistička analiza *indoor* mikro baznih stanica. Pored toga, da bi se istakao uticaj obično zanemarenih *indoor* mikro baznih stanica, dobijeni rezultati su upoređeni sa kategorijama antenskih stubova i instalacija na objektu.

Ovo poglavlje je organizovano u 6 delova. U prvom delu, prezentovani su merna metodologija i merni sistem kojim su sprovedena merenja. Klasifikacija lokacija baznih stanica izvršena je u drugom delu. Treći, četvrti i peti deo, posvećeni su statističkoj analizi rezultata merenja intenziteta električnog polja u okolini baznih stanica instaliranih na antenskom stubu, na objektu i unutar objekta, respektivno. Na kraju, u okviru šestog dela, izvedeni su zaključci.

## 7.1 Merna metodologija i merni sistem

Za potrebe ovog poglavlja, sprovedena su obimna merenja intenziteta električnog polja na 664 različite lokacije baznih stanica javnih mobilnih sistema, u različitim delovima Srbije. Korišćena merna metoda za svaku pojedinačnu lokaciju baznih stanica u potpunosti je usklađena sa međunarodnim standardima [38]-[44], i detaljnije je opisana u 2. poglavlju. Potupak merenja intenziteta elektromagnetnog zračenja na lokaciji bazne stanice sastojao se od dve faze. U prvoj fazi, određivani su relevantni izvori elektromagnetnog zračenja za analiziranu lokaciju, kao i relevantne zone same lokacije u kojima je bilo neophodno izvršiti merenja [41]. Da bi se odredila prostorna raspodela elektromagnetnog zračenja, u drugoj fazi, sprovedena su merenja intenziteta električnog polja relevantnih izvora, na velikom broju mernih pozicija u okviru relevantnih zona razmatrane lokacije.

Prilikom merenja na svakoj mernoj poziciji, merna sonda je bila postavljena na drveni tronožni stativ. U toku merenja, članovi mernog tima, bili su udaljeni od merne sonde bar 1.5m. Za svaku mernu poziciju, merenja su sprovedena na tri visine (1.1 m, 1.5 m and 1.7 m), i kao rezultat uzimana je maksimalna od tri izmerene vrednosti [41]. Merenja su sprovedena izvan bliske reaktivne zone, odnosno u bliskoj radijacijskoj zoni i zoni dalekog polja zračenja antenskog sistema i meren je intenzitet električnog polja.

Sva merenja su sprovedena sa mernim sistemima koji su etalonirani u skladu sa [39] i [48]. Za potrebe određivanja relevantnih zona korišćen je širokopojasni merni sistem koji se sastoji od mernog prijemnika *NARDA EMR300* i izotropnih mernih sondi *NARDA TYPE 18c* (100kHz to 3GHz) i *NARDA TYPE 9c* (3MHz to 18GHz). Proširena merna nesigurnost (koja odgovara intervalu poverenja od 95%) mernog sistema *NARDA EMR300* bila je  $\pm 33.2\%$  (za mernu sondu *NARDA TYPE 18c*) i  $\pm 51.4\%$  (za mernu sondu *NARDA TYPE 9c*).

Za pretraživanje radio-frekvencijskog spektra u opsegu 30MHz do 3GHz i za merenja svih relevantnih izvora ponaosob, na velikom broju mernih pozicija, korišćen je sistem za frekvencijski selektivna merenja koji se sastoji se od spektralnog analizatora *Rohde&Schwarz FSH6* i izotropne merne sonde *Rohde&Schwarz TS-EMF*. Samo za potrebe merenja UMTS sistema, korišćen je sistem koji se sastoji se od radio-mrežnog analizatora *Rohde&Schwarz TSMU* i izotropne merne sonde *Rohde&Schwarz TS-EMF*. Proširena merna nesigurnost mernog sistema sa spektralnim analizatorom

*Rohde&Schwarz FSH6* bila je  $\pm 44.6\%$ , dok je za merni sistem sa radio-mrežnim analizatorom *Rohde&Schwarz TSMU* bila  $\pm 41.6\%$ . Da bi se proverila usklađenost sa referentnim graničnim nivoima, korišćene su tehnike za ekstrapolaciju izmerenih vrednosti na slučaj sa maksimalnom predajnom snagom definisane standardom [40].

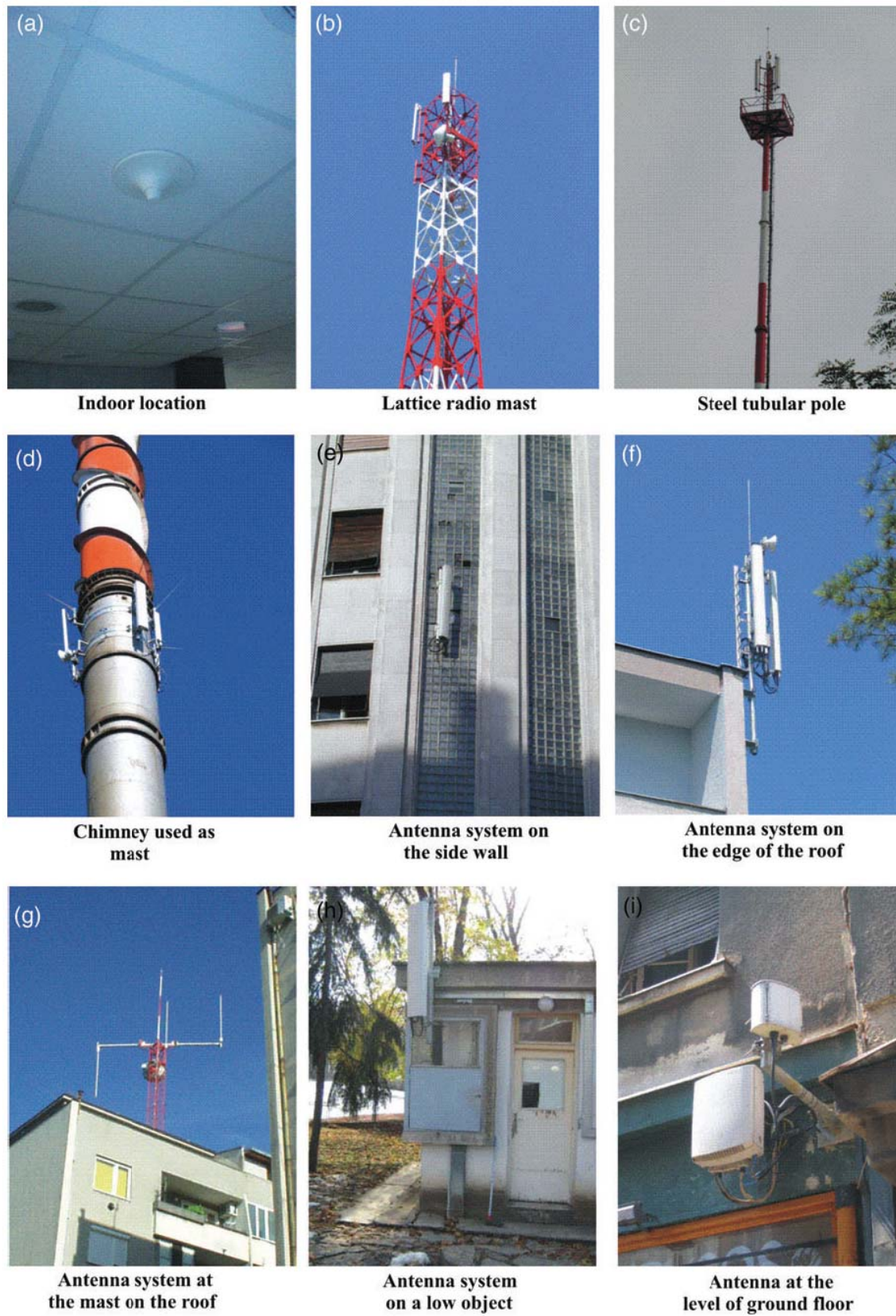
## 7.2 Klasifikacija lokacija baznih stanica

U zavisnosti od načina instalacije antenskog sistema, lokacije baznih stanica su klasifikovane u tri osnovne kategorije: stubovi (316 lokacija), lokacije sa instalacijom na objektu (276 lokacija) i lokacije sa instalacijom unutar objekta (72 lokacije).

U kategoriju stubovi su svrstane sve one lokacije na kojima se antenski sistem bazne stanice nalazi na stubu, bilo da je on namenski izgrađen za potrebe javne mobilne mreže ili ne. Dodatno, stubovi su razvrstani po visinama. U javnim mobilnim sistemima obično se koriste stubovi visina od 18m do 50m. Treba napomenuti da su u kategoriju stubova svrstavane i one lokacije na kojima je antenski sistem bio instaliran na objektima čija osnovna namena nije da budu stubovi, ali po svojim osobinama odgovaraju ovom tipu instalacija. Tako su dimnjaci toplana ili vodotornjevi svrstani u ovu kategoriju. Tipični predstavnici kategorije stubova prikazani su na slici 7.1 (b-d).

U kategoriju lokacije sa instalacijom na objektu ubrojane su sve one lokacije na kojima je antenski sistem bazne stanice instaliran spolja na objektu, bilo da je u pitanju bočni zid ili krov zgrade. Tako se razlikuju slučajevi antene bočno na objektu, antene na ivici krova i antene na stubu na krovu. Primeri različitih tipova ovih instalacija antenskog sistema dati su na slici 7.1 (e-g). Za razmatranje ovakvih lokacija vrlo je bitno utvrditi namenu objekta, kako bi se znalo koliko vremena ljudi provode u njemu. Zavisno od namene, objekti su razvrstani u podkategorije: stambeni (73 lokacije), industrijski (58 lokacija), kancelarijski (125 lokacija) i zdravstveni objekti (5 lokacija).

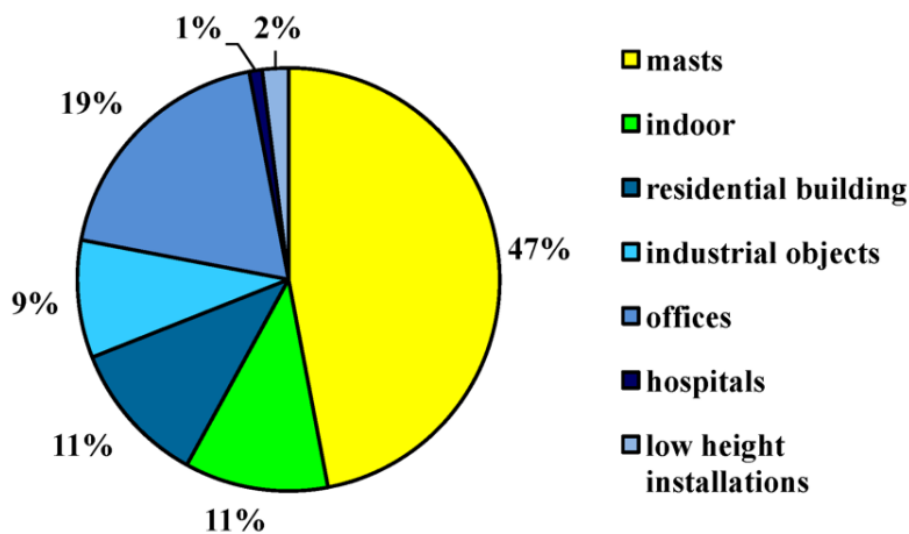
Pošto je na izvesnom broju objekata antenski sistem postavljen na nivou prvog sprata ili prizemlja, što je nepovoljnije sa stanovišta nivoa elektromagnetnog zračenja na tlu u odnosu na slučaj antenskog sistema na krovu, ove instalacije svrstane su u posebnu kategoriju nazvanu prizemne instalacije (15 lokacija). Na slici 7.1 (h-i), prikazane su dve varijante lokacija koje su svrstavane u prizemne instalacije. Na slici 7.1 (h), u pitanju je objekat koji ima samo prizemlje, dok je na slici 7.1 (i) objekat kod koga je antenski sistem postavljen na nivou prvog sprata.



*Slika 7.1 Tipični primeri lokacija baznih stanica*

U kategoriju lokacija sa instalacijom unutar objekta (*indoor*), svrstane su sve one lokacije na kojima je antenski sistem bazne stanice smešten unutar objekta. Ovakve instalacije su česte u slučaju da je potrebno obezbediti pokrivanje u objektima namenjenim velikom broju korisnika i u kojima se zbog toga očekuje veliki saobraćaj. Primer za to su tržni centri ili velike poslovne zgrade. Primer lokacija sa instalacijom unutar objekta dat je na slici 7.1 (a).

Ukupan skup od 643 lokacije baznih stanica razvrstan je u skladu sa prethodno navedenom kategorizacijom (slika 7.2).



*Slika 7.2 Procenti lokacija baznih stanica u zavisnosti od kategorije i podkategorije*

Zastupljenost određenog tipa radio-sistema po lokacijama baznih stanica određena je na dva načina. Prvo je određena raspodela određenog tipa radio-sistema zavisno od kategorije lokacije bazne stanice (tabela 7.1). Potom je u okviru jedne kategorije lokacije određena raspodela zastupljenosti određenog tipa radio-sistema (tabela 7.2). Slučajevi kada su na lokacijama izmereni uticaji više sistema istog tipa (npr., različiti GSM operateri ili različite TV i FM radio stanice) svrstavani su u posebne kategorije.

Kao što je i očekivano, GSM sistem instaliran je na svim tipovima lokacija. Od toga je najveća zastupljenost tipa GSM i na lokacijama sa stubovima (48.8%). Pri tome, na približno dve trećine stubova uočen je samo jedan GSM sistem, dok je na jednoj trećini bilo po dva GSM sistema. U jednom broju slučajeva uz GSM sisteme, na stubovima su bili instalirani i DCS (7.55%) i UMTS (5.66%) sistemi. Kolociranje GSM,

DCS i UMTS baznih stanica se moglo i očekivati s obzirom na činjenicu da sva tri tipa sistema učestvuju u formiranju ukupnog javnog mobilnog sistema jednog operatera. Takođe, interesantno je uočiti da su u izvesnom broju slučajeva bazne stanice bile kolocirane sa TV (7.23%) i FM (4.72%) radio-predajnicima. Razlog u relativno skromnom procentu kolociranja baznih stanica sa predajnicima TV i FM radio stanica leži u činjenici da je za potrebe realizacije javne mobilne mreže potreban znatno veći broj instalacija koje po pravilu, u prostornom smislu, moraju biti bliže korisnicima.

**Tabela 7.1** Procentualna zastupljenost određenog tipa radio-sistema na lokaciji bazne stanice određene kategorije (A - indoor, B - stubovi, C - stambeni, D - industrijski, E - kancelarijski, F - zdravstveni, G - prizemne instalacije)

Sistem (No*)	Kategorija lokacije						
	A	B	C	D	E	F	G
GSM 900 (420)	8.57	49.52	11.9	8.1	18.1	1.19	2.62
2xGSM 900 (217)	9.22	49.31	10.14	11.06	18.43	-	1.84
GSM 1800 (100)	13	24	23	7	32	1	-
2xGSM 1800 (10)	-	-	30	-	70	-	-
UMTS (46)	4.35	39.13	8.7	2.17	43.48	-	2.17
TV (17)	-	41.17	23.53	17.65	17.65	-	-
2xTV (9)	-	88.89	-	11.11	-	-	-
3xTV (8)	-	87.5	-	12.5	-	-	-
4xTV (1)	-	100	-	-	-	-	-
6xTV (1)	-	-	100	-	-	-	-
FM (26)	-	30.77	30.77	23.08	11.53	-	3.85
2xFM (13)	-	38.46	38.46	15.39	7.69	-	-
3xFM (3)	-	66.67	-	33.33	-	-	-
4xFM (1)	-	-	-	100	-	-	-
Tetra (3)	-	-	-	-	100	-	-
Privatni mob. (2)	50	50	-	-	-	-	-

\* Ukupan broj lokacija sa određenim tipom radio-sistema

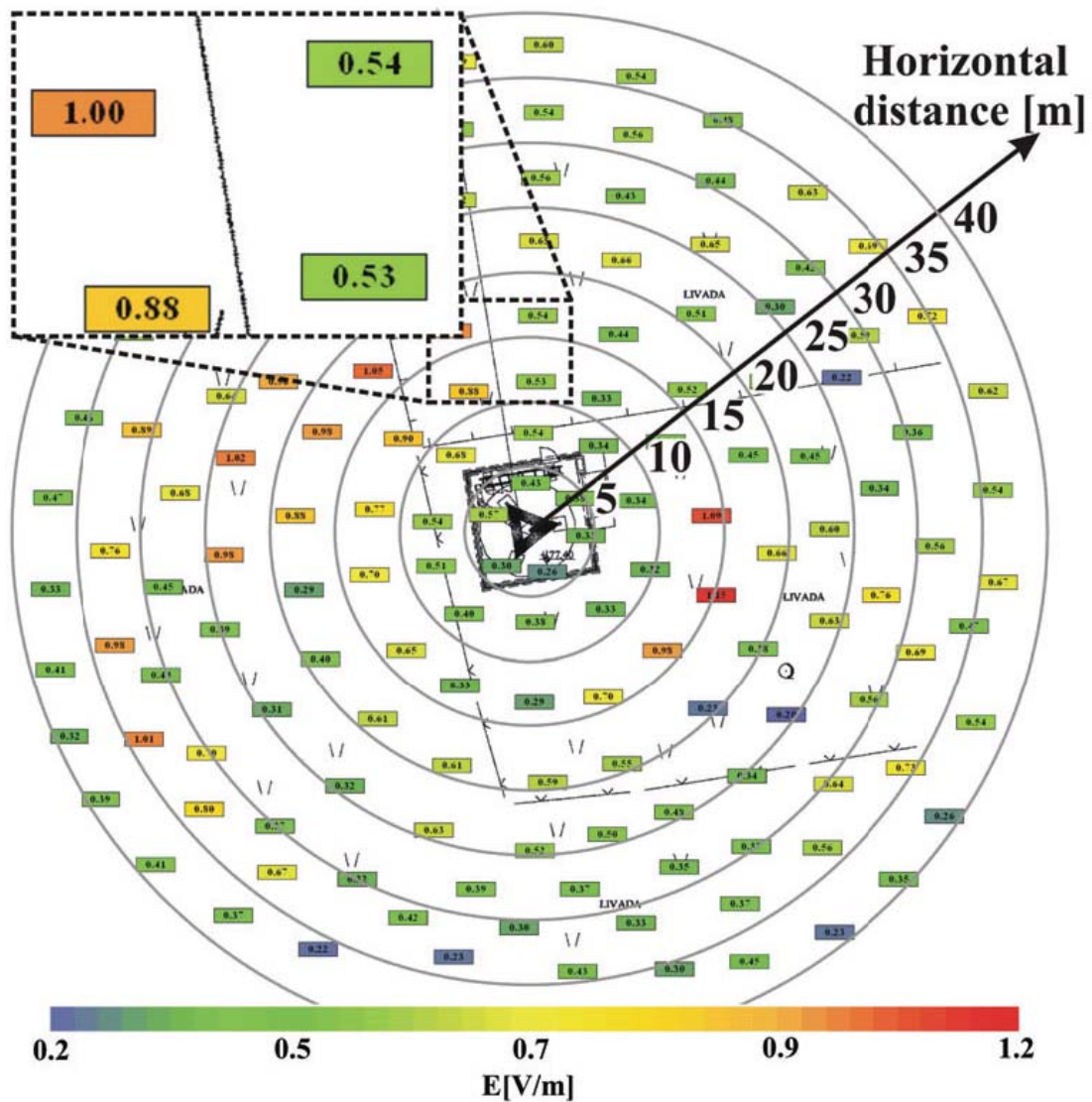
**Tabela 7.2** Procentualna zastupljenost tipa sistema u okviru jedne kategorije lokacija baznih stanica (A - indoor, B - stubovi, C - stambeni, D - industrijski, E - kancelarijski, F - zdravstveni, G - prizemne instalacije)

Sistem	Kategorija lokacije (No*)						
	A (72)	B (316)	C (73)	D (58)	E (125)	F (5)	G (15)
GSM 900	50	65.41	68.49	58.62	60.8	100	73.33
2xGSM 900	27.78	33.65	30.14	41.38	32	-	26.67
GSM 1800	18.06	7.55	31.51	12.07	25.6	20	-
2xGSM 1800	-	-	4.11	-	5.6	-	-
UMTS	2.78	5.66	5.48	1.72	16	-	6.67
TV	-	2.2	5.48	5.17	2.4	-	-
2xTV	-	2.52	-	1.72	-	-	-
3xTV	-	2.2	-	1.72	-	-	-
4xTV	-	0.31	-	-	-	-	-
6xTV	-	-	1.37	-	-	-	-
FM	-	2.52	10.96	10.34	2.4	-	6.67
2xFM	-	1.57	6.85	3.45	0.8	-	-
3xFM	-	0.63	-	1.72	-	-	-
4xFM	-	-	-	1.72	-	-	-
Tetra	-	-	-	-	2.4	-	-
Privatni mob.	1.39	0.31	-	-	-	-	-

\* Ukupan broj lokacija određene kategorije

### 7.3 Statistička analiza rezultata merenja intenziteta električnog polja u okolini baznih stanica instaliranih na antenskom stubu

U okviru mernog procesa na svakoj pojedinačnoj lokaciji bazne stanice instalirane na antenskom stubu, merenja su sprovedena u 50 do 120 mernih pozicija (u proseku 80). Na svakoj mernoj poziciji, meren je intenzitet električnog polja za svaki relevantni sistem (u proseku 4 do 5). Uzimajući u obzir ukupan broj analiziranih lokacija baznih stanica instaliranih na antenskom stubu, ukupno je prikupljeno više od 100 000 vrednosti intenziteta električnog polja. Ove vrednosti su prikupljene korišćenjem namenski razvijenog softvera *White Tigress Baby – Measurements*, koji omogućava direktno grafičko prikazivanje na situacionom planu lokacije (primer je dat na slici 7.3).



*Slika 7.3 Primer rezultata merenja intenziteta električnog polja u okolini antenskog stuba*

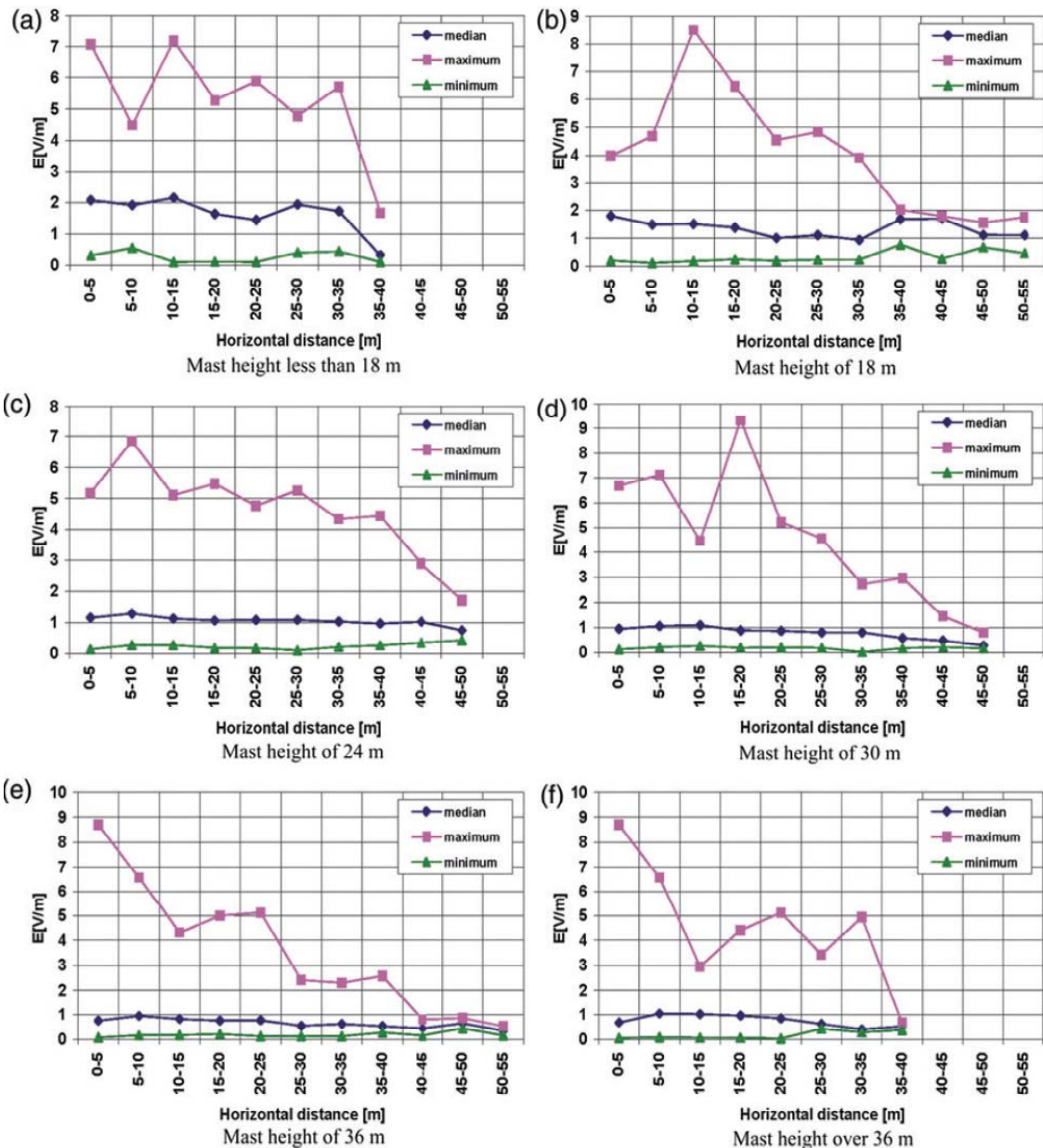
Lokacije su grupisane u skladu sa visinom antenskog stuba: manje od 18m (15 lokacija), 18m (30 lokacija), 24m (65 lokacija), 30m (87 lokacija), 36m (107 lokacija) i više od 36m (12 lokacija). Pri tome, visinski razmeštaj antena različitih tipova sistema nije posebno analiziran. Za svaku pojedinačnu lokaciju, sprovedena je statistička obrada i to na sledeći način (slika 7.3): zona oko stuba je podeljena na koncentrične kružnice poluprečnika 5m, 10m, 15m ... Unutar definisanih prstenova širine 5m određivane su i beležene u tabele maksimalne vrednosti izmerenog ukupnog intenziteta električnog polja. Dobijene vrednosti grupisane su u zavisnosti od visine antenskog stuba. Potom su u okviru svake grupe, za svaki definisani prsten širine 5m, određivani minimum,



maksimum i medijana. Dobijeni rezultati prikazani su na slici 7.4 (a-f). Polazeći od dobijenih grafika može se izvesti nekoliko jasnih zaključaka:

- Ni u jednom slučaju ukupni nivo električnog polja ne prelazi vrednost od 10V/m što je znatno ispod normi propisanih ICNIRP preporukom [1], odnosno normi propisanih Pravilnikom o granicama izlaganja nejonizujućim zračenjima [24].
- Na rastojanjima od podnožja stuba većim od 50m medijanska i maksimalna vrednost padaju ispod 1V/m, odnosno 2V/m, respektivno.
- Za isto horizontalno rastojanje, medijanska i minimalna vrednost evidentno opadaju kako se povećava visina stuba. Uočena pojava je direktna posledica činjenice da je sa povećanjem visine stuba, antenski sistem relativno dalje od korisnika što zbog prirode prostiranja elektromagnetnih talasa utiče na opadanje vrednosti izmerenog intenziteta električnog polja. Sa druge strane, ovakav zaključak ne važi za maksimalne vrednosti. To je posledica činjenice da u slučaju velike visine stuba, operatori po pravilu u većoj meri povijaju antenske dijagrame (*downtilting*) kako bi signalom pokrili blisku zonu bazne stanice. Zbog toga se prvi bočni lobovi vertikalnog antenskog dijagrama približavaju stubu i pri tome uzrokuju veće maksimalne vrednosti u blizini antenskog stuba.
- Evidentno je da se maksimumi za medijanske vrednosti ne nalaze u zonama neposredno uz stub već na nešto većim rastojanjima. To je direktna posledica vertikalnog dijagrama zračenja antene koji za velike vertikalne uglove (zona uz stub) ima relativno male dobitke antene. Slična pojava se može uočiti i u slučaju maksimalnih vrednosti za visine stuba do 30m, samo što su u ovom slučaju relativne promene veće. Za veće visine stuba (36m i preko 36m) uočena pravilnost ne važi. Ovo je posledica efekta intenzivnijeg usmeravanja antenskog dijagrama prema zemlji opisanog u prethodnoj tački.

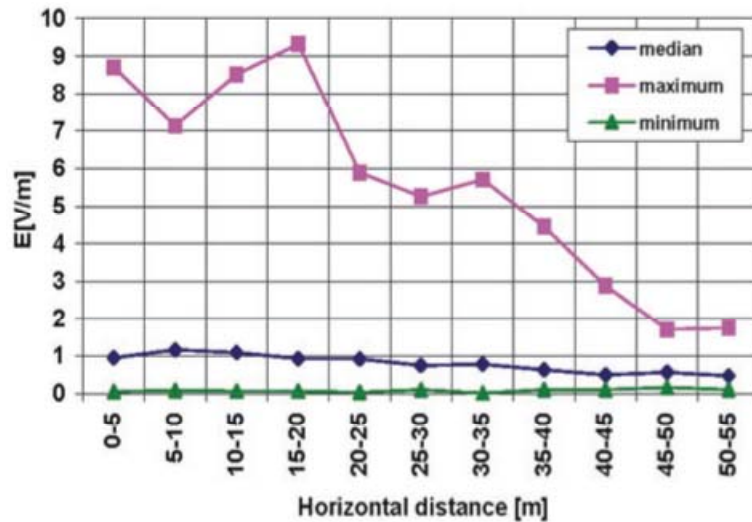
Zbirni rezultat za sve stubove, nezavisno od njihove visine, prikazan je na slici 7.5. Dobijeni grafik je u potpunoj saglasnosti sa prethodno izvedenim zaključcima za stubove definisanih visina.



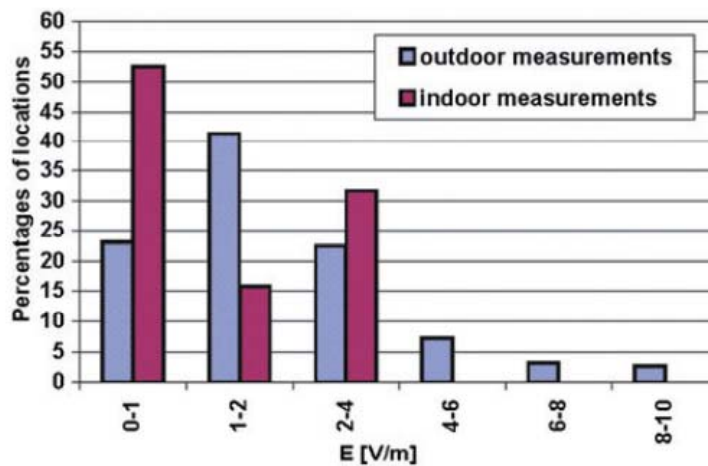
**Slika 7.4** Izmereni intenzitet električnog polja za slučaj kada je antenski sistem bazne stanice instaliran na antenskom stubu (u zavisnosti od visine stuba)

Da bi se stekao potpuniji uvid u nivo elektromagnetnog zračenja baznih stanica instaliranih na stubovima dodatno je statistički određena raspodela broja lokacija u zavisnosti od dobijenih apsolutnih maksimalnih vrednosti (maksimalna vrednost ukupnog intenziteta električnog polja za celu lokaciju). Pri tome, za razliku od prethodne diskusije u okviru ove analize razmotrene su i vrednosti izmerene u zatvorenom prostoru (*indoor* merenje) u objektima iz neposrednog okruženja stuba. Naime, u sklopu mernih aktivnosti kad god je to bilo moguće vršeno je merenje

intenziteta električnog polja i u *indoor* uslovima, i to uglavnom uz prozor ili zid objekta na strani prema analiziranom stubu (na različitim visinama u odnosu na tlo zavisno od objekta). Dobijeni rezultati prikazani su na slici 7.6.



**Slika 7.5** Izmereni intenzitet električnog polja za slučaj kada je antenski sistem bazne stanice instaliran na antenskom stubu (agregiran za sve visine stuba)



**Slika 7.6** Procenti lokacija baznih stanica u odnosu na apsolutne maksimalne vrednosti intenziteta električnog polja izmerene na lokaciji

Na osnovu slike 7.6 može se zaključiti da je u uslovima *outdoor* merenja apsolutni maksimum na lokaciji u granicama 1-2V/m ostvaren u preko 40% slučajeva, dok je u oko 90% slučajeva njegova vrednost manja od 4V/m. Sa druge strane, u *indoor* uslovima u najvećem broju slučajeva apsolutni maksimum na lokaciji je manji od 1V/m,

dok njegova vrednost ni u jednom slučaju nije prešla 4V/m. Pri tome, treba naglasiti da su apsolutni maksimumi za *indoor* uslove po pravilu odgovarali mernoj poziciji u neposrednoj blizini prozora objekta na strani prema stubu. Ovakav rezultat je logičan s obzirom na činjenicu su građevinski objekti gotovo uvek prostorno razdvojeni od antenskog stuba za više desetina metara.

Rezultati ovog poglavlja disertacije, koje se odnosi na statističku analizu rezultata merenja intenziteta električnog polja u okolini baznih stanica instaliranih na antenskom stubu, publikovani su u radu [138].

#### **7.4 Statistička analiza rezultata merenja intenziteta električnog polja u okolini baznih stanica instaliranih na objektu**

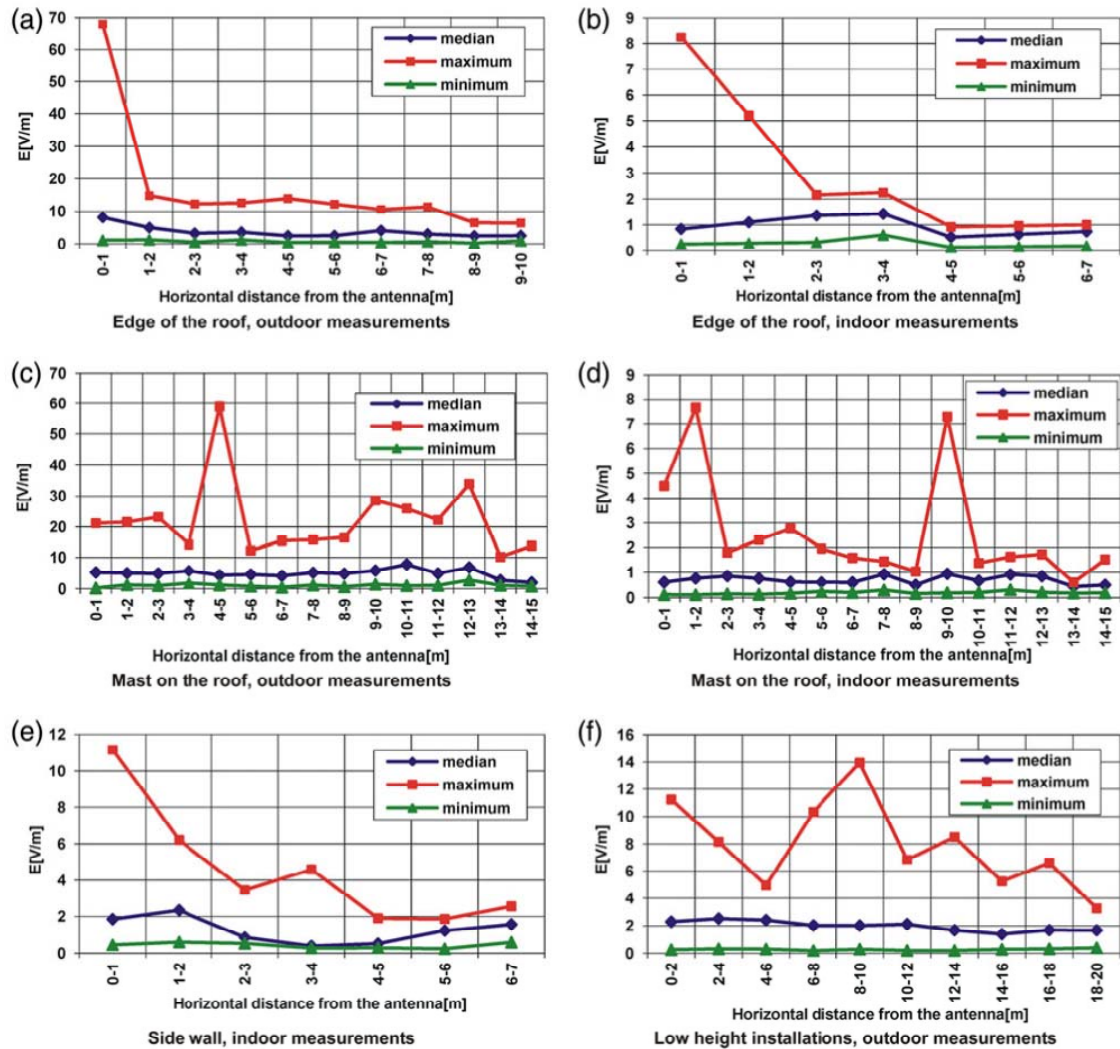
U okviru mernog procesa na svakoj pojedinačnoj lokaciji bazne stanice instalirane na objektu, merenja su sprovedena u 70 do 180 mernih pozicija (u proseku 120). Na svakoj mernoj poziciji, meren je intenzitet električnog polja za svaki relevantni sistem (u proseku 4 do 5). Uzimajući u obzir ukupan broj analiziranih lokacija baznih stanica instaliranih na objektu, ukupno je prikupljeno više od 140 000 vrednosti intenziteta električnog polja.

Za svaku pojedinačnu lokaciju, sprovedena je statistička obrada i to na sledeći način: 1) za slučaj instalacije antenskog sistema na stubu na krovu, zona u kojoj su izvršena merenja je podeljena na koncentrične krugove, dok je horizontalna udaljenost računata od antenskog sistema ka ivici objekta, 2) za slučaj instalacije antenskog sistema na ivici krova, kao i na bočnom zidu objekta, zona u kojoj su izvršena merenja je podeljena na isti način, dok je horizontalna udaljenost računata od antenskog sistema ka centru objekta, i 3) u slučaju prizemnih instalacija, zona u kojoj su izvršena merenja je podeljena na koncentrične krugove, dok je horizontalna udaljenost računata od antenskog sistema i od objekta. Na ovaj način, zona u kojoj su izvršena merenja podeljena je na koncentrične krugove u zavisnosti od horizontalne udaljenosti (bez obzira na visinu antene). Širina formiranih prstenova bila je 1m bez obzira na način realizacije antenskog sistema, sa izuzetkom prizemnih instalacija gde je širina bila 2m. Za svaku pojedinačnu lokaciju bazne stanice, unutar svakog prstena širine 1m (ili 2m), određena je maksimalna vrednost izmerenog ukupnog intenziteta električnog polja. Lokacije su grupisane u odnosu na način instalacije antenskog sistema i zonu u kojoj su

izvršena merenja (*outdoor* and *indoor*). Nakon toga, za svaku grupu i za svaki prsten širine 1m (ili 2m), određivani su minimum, maksimum i medijana. Dobijeni rezultati prikazani su na slici 7.7 (a-f). Polazeći od dobijenih grafika može se izvesti nekoliko jasnih zaključaka:

- U neposrednoj blizini (1-2m) antenskog sistema instaliranog na ivici krova, *outdoor* maksimalne vrednosti intenziteta električnog polja prevazilaze referentne granične nivoe za opštu ljudsku populaciju propisane ICNIRP preporukama [1] i Pravilnikom o granicama izlaganja nejonizujućim zračenjima [24]. Ovo je posledica činjenice da na nekoliko lokacija horizontalno usmerenje antene nije bilo u potpunosti normalno u odnosu na ivicu krova. U takvim slučajevima delovi krova mogu biti zahvaćeni glavnim snopom zračenja antene. Ipak, malo je verovatno da neko iz opšte ljudske populacije bude izložen u ovim slučajevima, pošto u većini slučajeva opšta ljudska populacija nema pravo pristupa ovim zonama. Sličan zaključak, samo za veće horizontalne udaljenosti (5m za ICNIRP i do 13m za referentne granične nivoe u Srbiji), može biti izveden za slučaj antenskog sistema postavljenog na stubu na krovu. U ovim slučajevima, stub se najčešće nalazi blizu centralne tačke objekta, i zone krova blizu ivica objekta mogu biti zahvaćene glavnim snopom zračenja antene. Ipak, treba istaći da su sve izmerene vrednosti ispod referentnih graničnih nivoa za tehničko osoblje propisanih ICNIRP preporukama.
- Za *indoor* merenja, dobijene maksimalne vrednosti intenziteta električnog polja nisu prevazišle referentne granične vrednosti propisane ICNIRP preporukama [1] i Pravilnikom o granicama izlaganja nejonizujućim zračenjima [24]. Prema rezultatima merenja, maksimalna dobijena vrednost za antenski sistem instaliran na ivici krova, na stubu na krovu i na bočnom zidu objekta su ispod 9V/m, 8V/m i 12V/m, respektivno.
- Ni u jednom slučaju medijanske vrednosti intenziteta električnog polja nisu premašile 10V/m i 3V/m, za *outdoor* i *indoor* merenja, respektivno.
- U slučaju antenskog sistema instaliranog na ivici krova, kao što je očekivano, maksimalne vrednosti intenziteta električnog polja se smanjuju sa povećanjem horizontalnog rastojanja, za *outdoor* i *indoor* merenja. Sličan zaključak je i za slučaj antenskog sistema instaliranog na bočnom zidu objekta, za *indoor* merenja. Sa druge strane, za slučaj antenskog sistema instaliranog na stubu na krovu, maksimalne

vrednosti nisu nađene u blizini stuba, nego na nešto većoj udaljenosti, za *outdoor* i *indoor* merenja. Ovo je direktna posledica vertikalnog dijagrama zračenja antene.

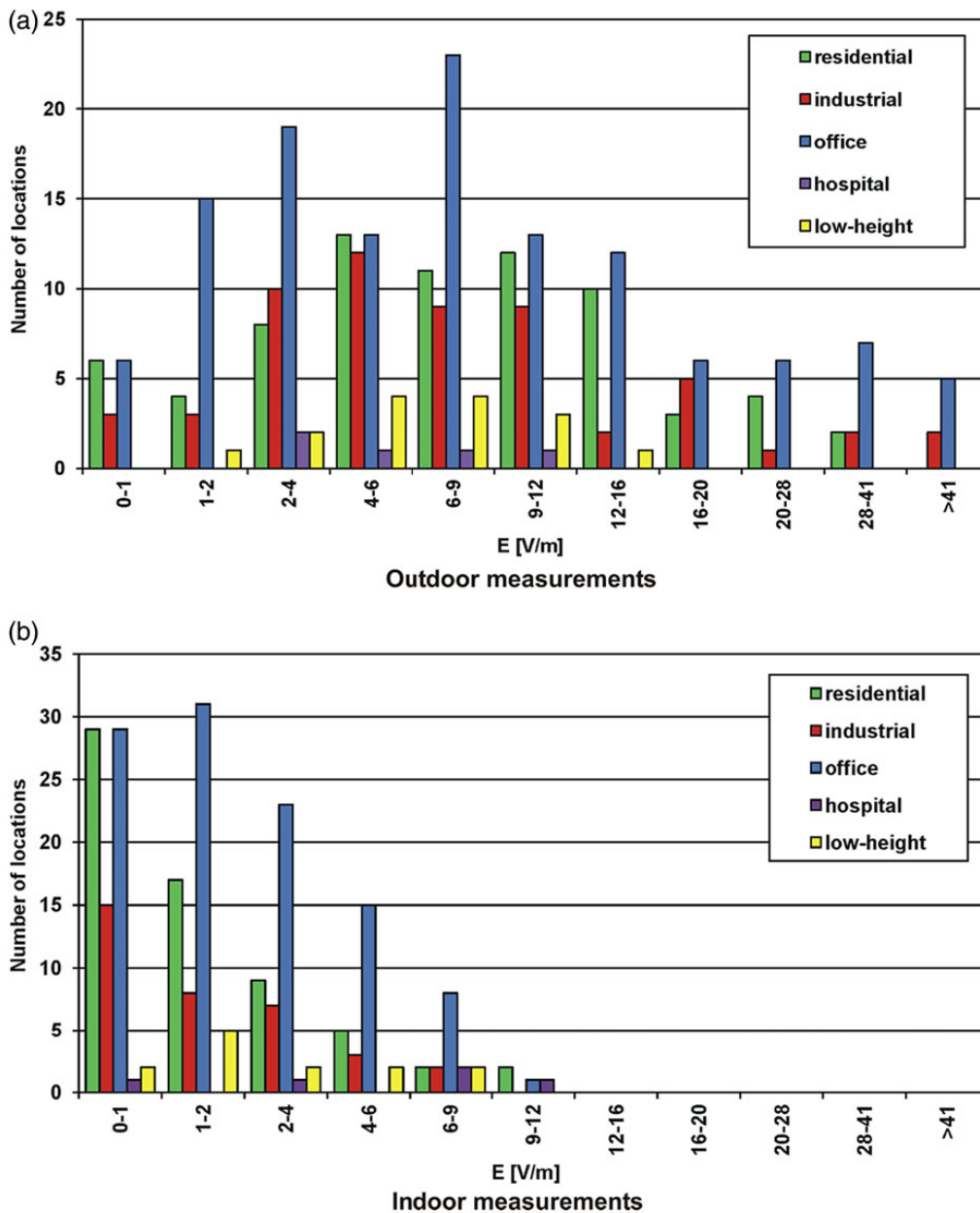


**Slika 7.7** Izmereni intenzitet električnog polja za slučaj kada je antenski sistem bazne stanice instaliran na objektu

- Za prizemne instalacije kad je antenski sistem postavljen na nivou prvog sprata, maksimalne vrednosti intenziteta električnog polja nisu nađene neposredno uz zgradu, nego na nešto većim udaljenostima (8-10m). Sa druge strane, za prizemne instalacije u kojima je antenski sistem postavljen na nivou prizemlja, maksimalne vrednosti intenziteta električnog polja nađene su neposredno uz objekat. U oba

slučaja prizemnih instalacija, zone na nivou tla u okolini bazne stanice, gde opšta populacija može da ima pristup, mogu da se nađu u glavnom snopu zračenja antene

Da bi se stekao potpuniji uvid u nivo elektromagnetnog zračenja baznih stanica instaliranih na objektu, dodatno je statistički određena raspodela broja lokacija u zavisnosti od dobijenih apsolutnih maksimalnih vrednosti (maksimalna vrednost ukupnog intenziteta električnog polja za celu lokaciju). Dobijeni rezultati prikazani su na slici 7.8 (a-b).



**Slika 7.8** Broj lokacija baznih stanica u odnosu na apsolutne maksimalne vrednosti intenziteta električnog polja izmerene na lokaciji

Na osnovu slike 7.8 (a), može se zaključiti da su u slučaju *outdoor* merenja, referentne granične vrednosti propisane ICNIRP preporukama prevaziđene u 2.5% svih lokacija (2 industrijska i 5 kancelarijskih objekata). Sa druge strane, referentne granične vrednosti propisane Pravilnikom o granicama izlaganja nejonizujućim zračenjima [24] prevaziđene su u 15.6% svih lokacija (10 industrijskih, 24 kancelarijska i 9 stambenih objekata) za *outdoor* merenja. Ne treba zaboraviti da su ove vrednosti izmerene na krovovima objekata, u zonama gde ljudi ne borave, i čak u većini slučajeva nemaju pristup. U slučajevima zdravstvenih objekata i prizemnih instalacija apsolutni maksimum intenziteta električnog polja nije prevazišao referentne granične vrednosti propisane ICNIRP preporukama [1] i Pravilnikom o granicama izlaganja nejonizujućim zračenjima [24]. Pored toga, vrednosti apsolutnog maksimuma intenziteta električnog polja bile su manje od 20V/m na 90% lokacija, dok nisu prevazišle 70V/m ni u jednom slučaju.

Sa druge strane, *indoor* ukupni intenzitet električnog polja nije prevazišao ICNIRP i referentne granične nivoe u Srbiji, ni u jednom slučaju (slika 7.8 (b)). Za *indoor* merenja, u 90% svih lokacija, vrednosti apsolutnog maksimuma intenziteta električnog polja bile su ispod 5.4V/m, dok nisu prevazišle 12V/m ni u jednom slučaju. Ove niže vrednosti u poređenju sa *outdoor* merenjima su logične sa obzirom na činjenicu da intenzitet električnog polja slabi prilikom prolaska kroz zid objekta.

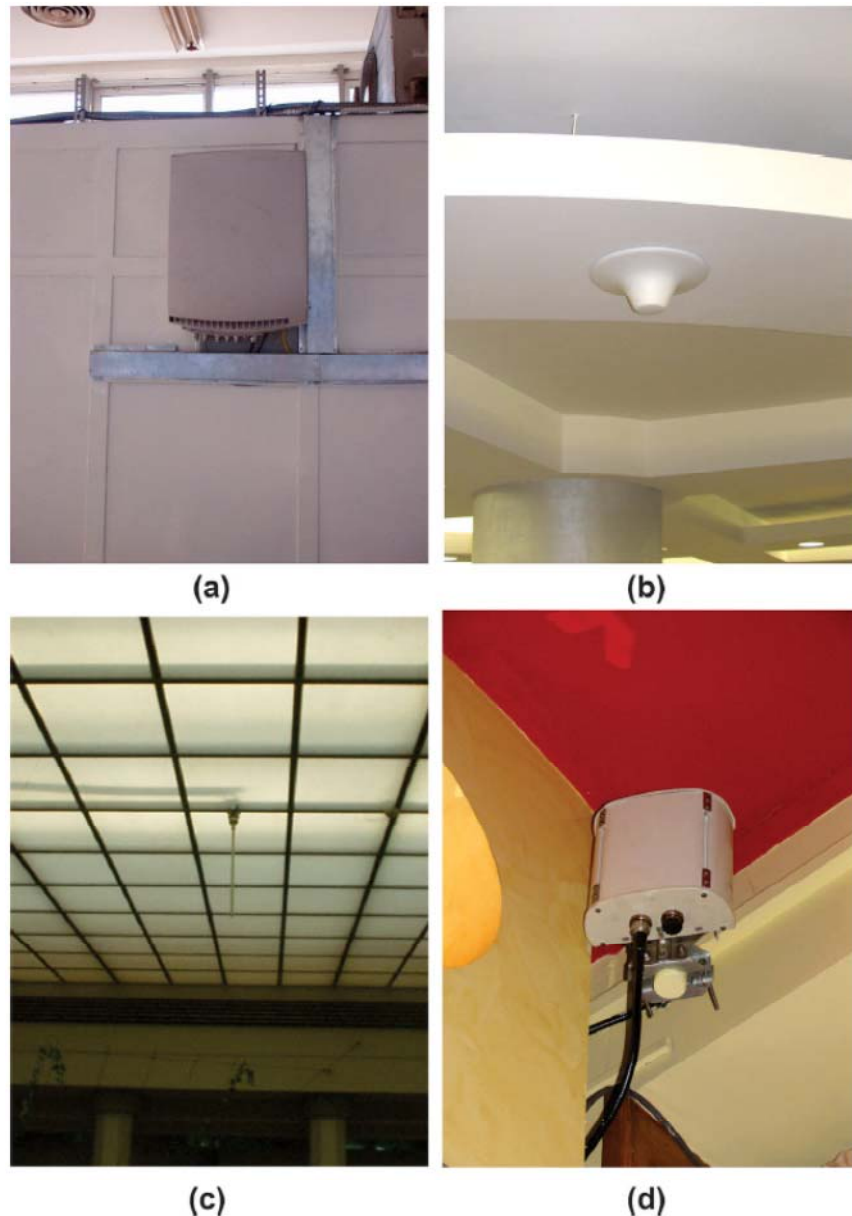
Rezultati ovog poglavlja disertacije, koje se odnosi na statističku analizu rezultata merenja intenziteta električnog polja u okolini baznih stanica instaliranih na objektu, publikovani su u radu [139].

## **7.5 Statistička analiza rezultata merenja intenziteta električnog polja u okolini baznih stanica instaliranih unutar objekta**

Kao što je već rečeno, merenja su sprovedena na 72 lokacije sa *indoor* mikro baznim stanicama. U zavisnosti od načina instalacije antenskog sistema, ove lokacije su klasifikovane na sledeći način (slika 7.9): 1 *indoor* mikro bazna stanica sa integrisanom antenom (visina antene 2.5m), 58 *indoor* mikro baznih stanica sa omni antenom *Mexican Hat* postavljenom na plafonu (opseg visina antene 2.5m-6m), 6 lokacija sa omnidirekcionom monopol antenom (opseg visina antene 3m-6.5m), i 7 lokacija sa panel antenom postavljenom na bočni zid (opseg visina antene 3m-7m).



U okviru mernog procesa na svakoj pojedinačnoj lokaciji bazne stanice instalirane unutar objekta, merenja su sprovedena u 50 do 100 mernih pozicija (u proseku 75). Na svakoj mernoj poziciji, meren je intenzitet električnog polja za svaki relevantni sistem. Uzimajući u obzir ukupan broj analiziranih lokacija baznih stanica instaliranih unutar objekta, ukupno je prikupljeno više od 10 000 vrednosti intenziteta električnog polja.

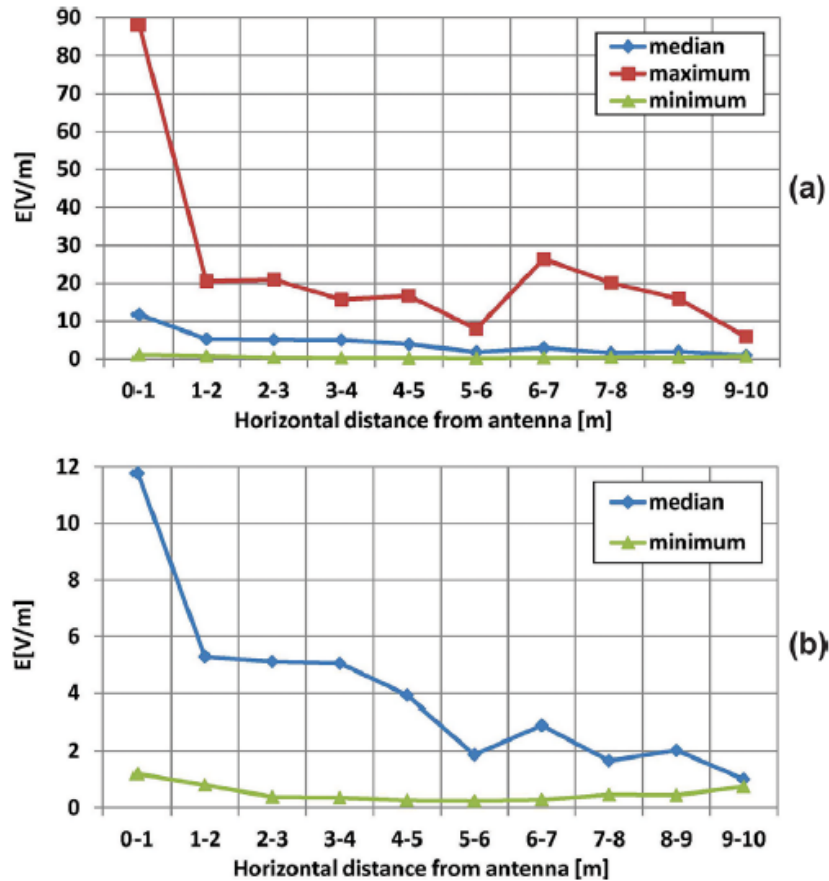


**Slika 7.9** Tipični primeri indoor mikro baznih stanica: (a) mikro bazna stanica sa integrisanom antenom, (b) omni antena Mexican Hat postavljena na plafonu, (c) omnidirekciona monopol antena, i (d) panel antena postavljena na bočni zid

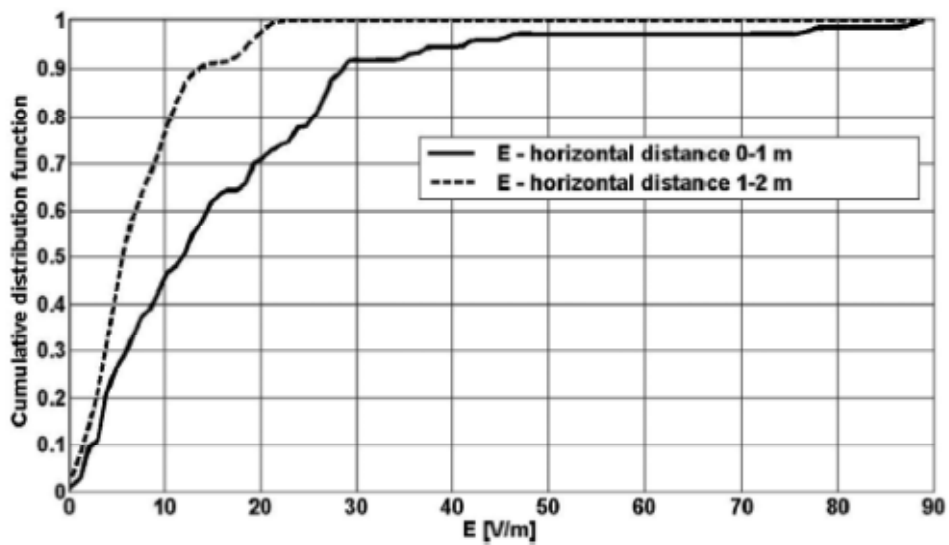
Za svaku pojedinačnu lokaciju, sprovedena je statistička obrada i to na sledeći način: rezultati merenja su podeljeni u klase na osnovu horizontalne udaljenosti merne pozicije od antenskog sistema. Horizontalna udaljenost predstavlja udaljenost od merne pozicije u relevantnoj zoni do pozicije antene bazne stanice, merena horizontalno bez obzira na visinu antene. Potrebno je napraviti razliku između horizontalne udaljenosti i stvarne udaljenosti merne sonde od antene bazne stanice. Izabran je korak od 1m, pa prva klasa obuhvata rezultate merenja na mernim pozicijama horizontalne udaljenosti do 1m, druga klasa obuhvata rezultate merenja na mernim pozicijama horizontalne udaljenosti 1m-2m, itd. Za svaku klasu posebno, utvrđena je maksimalna vrednost intenziteta električnog polja. Nakon toga, utvrđene maksimalne vrednosti su grupisane po klasama za sve analizirane lokacije *indoor* mikro baznih stanica. Uzimajući u obzir sve lokacije, za svaku klasu je određena minimalna, maksimalna i medijanska vrednost. Dobijeni rezultati prikazani su na slici 7.10. Povrh toga, za dva najznačajnija opsega horizontalnih udaljenosti 0-1m i 1-2m, određena je kumulativna funkcija raspodele intenziteta električnog polja i data na slici 7.11.

Polazeći od dobijenih grafika može se izvesti nekoliko jasnih zaključaka:

- Na određenom broju lokacija *indoor* mikro baznih stanica, maksimalna vrednost intenziteta električnog polja, izmerena na horizontalnoj udaljenosti od 1m prevazilazi referentne granične vrednosti propisane ICNIRP preporukama i Pravilnikom o granicama izlaganja nejonizujućim zračenjima [24]. Ovo je direktna posledica blizine antenskog sistema bazne stanice mernoj poziciji. Potrebno je istaći da ove situacije, u kojima se ljudi mogu naći u blizini antenskog sistema bazne stanice su verovatnije za slučaj *indoor* mikro baznih stanica, nego za slučajeve antenskog stuba i instalacije na objektu.
- Na horizontalnim udaljenostima većim od 1m, maksimalna izmerena vrednost intenziteta električnog polja bila je ispod referentnih graničnih nivoa propisanih ICNIRP preporukom, ali za nekoliko lokacija bila je veća od graničnih nivoa propisanih Pravilnikom [24].
- Za horizontalne udaljenosti od *indoor* antenskog sistema veće od 10m, medijanska i maksimalna vrednost intenziteta električnog polja pale su ispod 1V/m i 6V/m, respektivno.

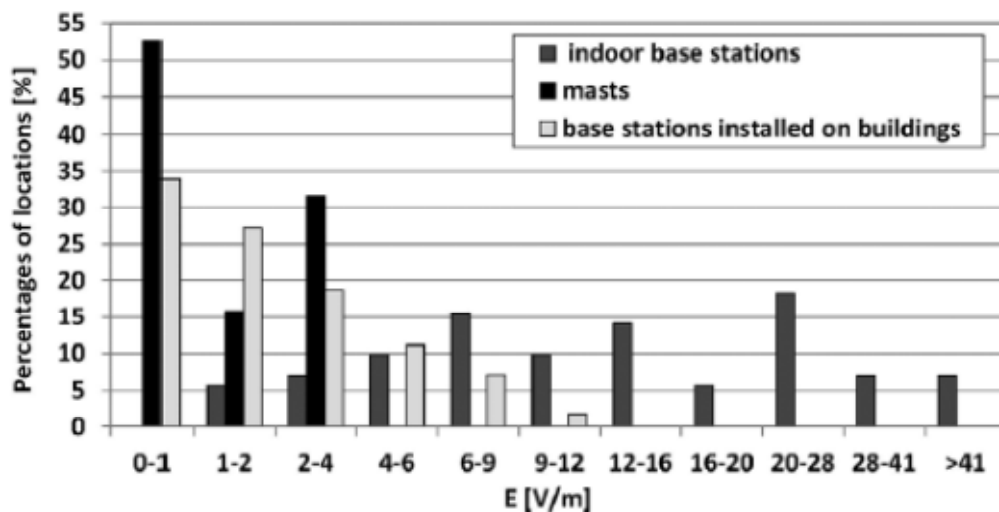


*Slika 7.10* Maksimalna, minimalna i medijanska vrednost intenziteta električnog polja u zavisnosti od horizontalne udaljenosti od antene (a), sa uvećanim prikazom za minimalnu i medijansku vrednost (b)



*Slika 7.11* Kumulativna funkcija raspodele intenziteta električnog polja za opsege horizontalnih udaljenosti 0-1m i 1-2m

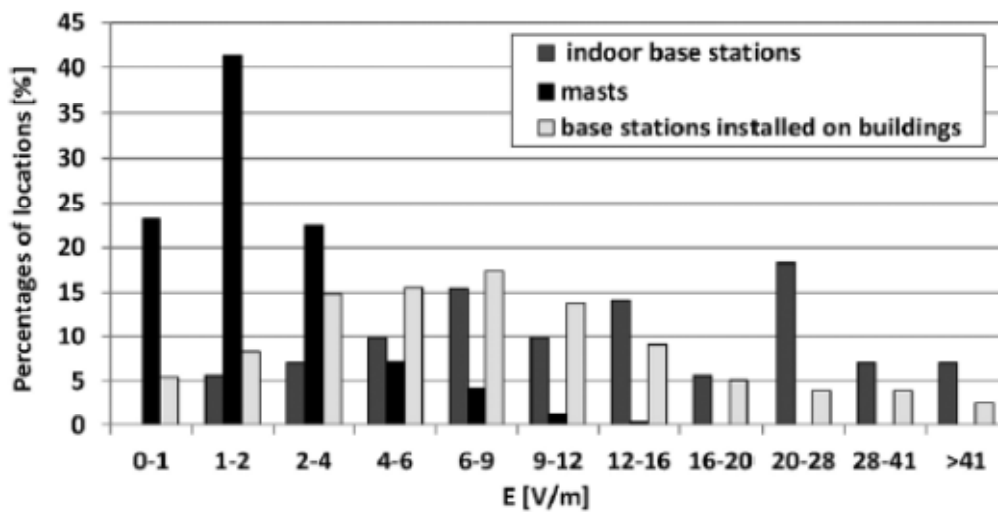
Uzimajući u obzir da ljudi više vremena provode *indoor*, posebna pažnja je posvećena komparativnoj analizi nivoa elektromagnetnog zračenja u *indoor* okruženju, koje potiče od *indoor* mikro baznih stanica i druge dve kategorije lokacija (stubovi i instalacija na objektu). Za svaku lokaciju bazne stanice, koja pripada jednoj od ove tri kategorije, određena je maksimalna vrednost ukupnog intenziteta električnog polja za celu lokaciju, ali samo u *indoor* okruženju. Nakon toga, za svaku od kategorija lokacija baznih stanica, određena je raspodela broja lokacija u zavisnosti od apsolutnih maksimalnih vrednosti, i rezultati su međusobno upoređeni (slika 7.12). Na osnovu slike 7.12, može se zaključiti da za slučaj *indoor* mikro baznih stanica apsolutna maksimalna vrednost prevazilazi referentne granične nivoe propisane Pravilnikom [24] na približno 38% lokacija, i prevazilazi ICNIRP referentne granične nivoe na približno 7% lokacija. Apsolutna maksimalna vrednost intenziteta električnog polja u *indoor* okruženju, za kategorije antenskih stubova i instalacija na objektu, ne prelazi 4V/m i 12V/m, respektivno.



*Slika 7.12 Procenti lokacija baznih stanica u odnosu na apsolutne maksimalne vrednosti intenziteta električnog polja izmerene indoor, za tri različite kategorije lokacija*

Da bi se obezbedilo preciznije poređenje ove tri kategorije lokacija baznih stanica, za svaku lokaciju bazne stanice apsolutna maksimalna vrednost intenziteta električnog polja je određena u zoni u kojoj se očekuje najveća izloženost, u zavisnosti od kategorije lokacije (*indoor* za *indoor* kategoriju, *outdoor* zona oko antenskog stuba i spoljašnji

delovi objekta za instalacije na objektu). Na bazi ovih rezultata, prikazanih na slici 7.13, može se zaključiti da je za slučaj stubova apsolutna maksimalna vrednost intenziteta električnog polja ispod referentnih graničnih vrednosti propisanih ICNIRP preporukama i Pravilnikom [24], u svim slučajevima. U slučaju baznih stanica instaliranih na objektu, na 15.6% lokacija, dobijena apsolutna maksimalna vrednost intenziteta električnog polja je bila iznad referentnih graničnih nivoa u Srbiji i na 2.5% lokacija iznad ICNIRP referentnih graničnih nivoa. Ipak, potrebno je istaći da su ove vrednosti dobijene na krovovima gde ljudi obično ne borave. Drugima rečima, one se ne nalaze u zonama povećane osetljivosti, za razliku od prethodno analiziranih *indoor* okruženja.



*Slika 7.13* Procenti lokacija baznih stanica u odnosu na apsolutne maksimalne vrednosti intenziteta električnog polja za indoor mikro bazne stanice (indoor merenja), i stubovi i instalacije na objektu (outdoor merenja)

Rezultati ovog poglavlja disertacije, koje se odnosi na statističku analizu rezultata merenja intenziteta električnog polja u okolini mikro baznih stanica instaliranih unutar objekta, publikovani su u radu [140].

## 7.6 Zaključak

Za potrebe ovog poglavlja, sprovedena su intenzivna merenja intenziteta električnog polja na 664 različite lokacije baznih stanica javnih mobilnih sistema. U zavisnosti od načina instalacije antenskog sistema, lokacije baznih stanica su klasifikovane u tri osnovne kategorije: stubovi (316 lokacija), lokacije sa instalacijom

na objektu (276 lokacija) i lokacije sa instalacijom unutar objekta (72 lokacije). Za svaku od navedenih kategorija sprovedena je zasebna statistička analiza rezultata merenja intenziteta električnog polja u okolini baznih stanica. Cilj ovih analiza bio je da se dobije bolji uvid u izloženost ljudi elektromagnetnom zračenju u realnim okruženjima baznih stanica, kao i da se proverí usklađenost sa postojećim normama.

Rezultati merenja za kategoriju stubovi pokazuju da ni u jednom slučaju ukupni intenzitet električnog polja ne prelazi vrednost od 10V/m, što je znatno ispod referentnih graničnih nivoa propisanih ICNIRP preporukom [1], kao i referentnih graničnih nivoa propisanih Pravilnikom o granicama izlaganja nejonizujućim zračenjima [24].

Na osnovu sprovedene analize za kategoriju instalacije na objektu, može se zaključiti da su u slučaju *outdoor* merenja, referentne granične vrednosti propisane ICNIRP preporukama prevaziđene u 2.5% svih lokacija (2 industrijska i 5 kancelarijskih objekata). Sa druge strane, referentne granične vrednosti propisane Pravilnikom o granicama izlaganja nejonizujućim zračenjima [24] prevaziđene su u 15.6% svih lokacija (10 industrijskih, 24 kancelarijska i 9 stambenih objekata) za *outdoor* merenja. Ne treba zaboraviti da su ove vrednosti izmerene na krovovima objekata, u zonama gde ljudi ne borave, i čak u većini slučajeva nemaju pristup. Sa druge strane, *indoor* ukupni intenzitet električnog polja nije prevazišao ICNIRP i Srpske referentne granične nivoe ni u jednom slučaju.

Na određenom broju lokacija *indoor* mikro baznih stanica, maksimalna vrednost intenziteta električnog polja, izmerena na horizontalnoj udaljenosti od 1m prevazilazi referentne granične vrednosti propisane ICNIRP preporukama i Pravilnikom o granicama izlaganja nejonizujućim zračenjima [24]. Apsolutna maksimalna vrednost prevazilazi Srpske referentne granične nivoe na približno 38% lokacija, i prevazilazi ICNIRP referentne granične na približno 7% lokacija.

Prethodni rezultati pokazuju da elektromagnetno zračenje koje potiče od *indoor* mikro baznih stanica treba pažljivo analizirati, iako one imaju manju efektivnu izračenu snagu (ERP) u poređenju sa baznim stanicama druge dve kategorije. Razlog za to je činjenica da u slučaju *indoor* mikro baznih stanica, ljudi mogu da se nađu veoma blizu antena (na samo par metara), što nije slučaj sa *outdoor* makro baznim stanicama. Ovo je posebno značajno zbog toga što najčešće regulatorna tela zahtevaju analize

elektromagnetnog zračenja samo za bazne stanice koje imaju ERP iznad propisane vrednosti, pa uticaj *indoor* mikro baznih stanica često biva zanemaren.

U budućnosti se očekuje razvoj mobilnih mreža, pa treba očekivati i povećanje elektromagnetnog zračenja koje potiče od baznih stanica. Naime, razvoj mobilnih mreža dovodi do povećanja broja predajnika na postojećim lokacijama (na već izgrađenim sajtovima), kao i dodavanje novih mobilnih sistema (npr. dodavanje UMTS na GSM lokaciji, dodavanje LTE baznih stanica itd.). Dodavanje novih predajnika na postojećim lokacijama sigurno će dovesti do povećanja elektromagnetnog zračenja baznih stanica. S obzirom da je implementacija LTE sistema u Srbiji u toku, analiza elektromagnetnog zračenja koje potiče od LTE baznih stanica biće obuhvaćena budućim istraživanjem.

## 8. SAVREMENI TRENDVI U ODREĐIVANJU IZLOŽENOSTI LJUDI ELEKTROMAGNETNIM POLJIMA

Očekivani veliki rast broja bežičnih uređaja, kao i povećanje saobraćaja koji oni prenose, neminovno će dovesti do velike ekspanzije u njihovom korišćenju. Kao posledica toga, očekuje se značajno povećanje izlaganja ljudi radio-frekvencijskim elektromagnetnim poljima. Kao što je već rečeno, da bi se kontrolisao uticaj elektromagnetnog zračenja na ljude, definisane su norme kojima se ograničava izlaganje elektromagnetnim poljima koja potiču od telekomunikacionih uređaja. Ovim normama definisane su granice, preko kojih ljudi ne smeju biti izloženi elektromagnetnim poljima, što se u praksi proverava sprovođenjem merenja i proračuna definisanih međunarodnim standardima. Ovakav pristup predstavlja standardni pristup u analizi izloženosti ljudi elektromagnetnim poljima, i baziran je na potpuno nezavisnoj analizi elektromagnetnog zračenja koje potiče od baznih stanica i elektromagnetnog zračenja koje potiče od mobilnih korisničkih terminala.

Potrebno je istaći da u oblasti u analize izloženosti ljudi, postoji posredni efekat koji često nije baziran na objektivnim okolnostima, ali ima veoma značajnu ulogu, a to je strah ljudi od elektromagnetnog zračenja. Rastući strah stanovništva od elektromagnetnog zračenja dovodi do sve većeg otpora razvoju mobilnih mreža, koje *de facto* predstavljaju infrastrukturu svake zemlje. U radovima [105]-[106], pokazano je da značajan procenat ljudi strahuje od eventualnih efekata elektromagnetnog zračenja. Takođe, utvrđeno je da ljudi češće strahuju od uticaja baznih stanica, dok zanemaruju uticaj mobilnih telefona. Iz tog razloga, često se insistira na sprovođenju jednostranih mera kojima će se smanjiti zračenje baznih stanica, a da se pritom ne vodi računa kako to utiče na zračenje mobilnih telefona korisnika.

Jedan od primera iz prakse je da se insistira na tome da se bazne stanice udalje što više od korisnika, kako bi se smanjilo zračenje koje potiče od baznih stanica. Međutim, u mobilnim sistemima, implementirane tehnike za kontrolu predajne snage mobilnih



telefona i baznih stanica, dovode do toga da kada je kvalitet veze bolji, telefon i bazna stanica zrače manjom predajnom snagom, i obrnuto. Primera radi, telefon koji je više udaljen od bazne stanice će zračiti većom snagom, nego što će to biti slučaj sa telefonom koji se nalazi bliže baznoj stanici. To znači, da će udaljavanjem bazne stanice od korisnika, mobilni telefoni korisnika zračiti većom snagom. Sa obzirom da u najvećem broju slučajeva, mobilni telefoni uzrokuju veće doze zračenja nego bazne stanice, ovakva mera može dovesti do pogoršanja po pitanju zračenja ljudi.

Iz tog razloga, u okviru savremenog pristupa u analizi izloženosti ljudi elektromagnetnim poljima, autori sve češće uzimaju u obzir ukupno izaganje ljudi kombinovanjem izlaganja u *downlink*-u (koje potiče od baznih stanica i *access point*-a) i izlaganja u *uplink*-u (koje potiče od mobilnih korisničkih uređaja) [141]-[146]. Povrh toga, u okviru EU FP7 projekta LEXNET (*Low-EMF Exposure Future Networks*), definisana je nova metrika za određivanje srednje izloženosti ljudske populacije koja potiče od mobilne mreže u analiziranom geografskom području, i koja uzima u obzir izloženost od baznih stanica i izloženost od mobilnih korisničkih uređaja [95]. Nova metrika je nazvana indeks izloženosti (*EI - Exposure Index*) [147]-[148], i uzima u obzir veliki broj parametara koji utiču na izloženost, kao što su: starost ljudi, položaj tela, način upotrebe korisničkog terminala, korišćena radio-tehnologija, okruženje, itd.

Kao što je već rečeno, procena merne nesigurnosti predstavlja jednu od ključnih komponenti u svim metrološkim primenama [53]-[55]. Određivanje merne nesigurnosti *EI*-a je od velikog značaja, posebno imajući u vidu da su koncept *EI*-a i metode za njegovo određivanje, u postupku diskusije za standardizaciju u okviru CENELEC TC106x tehničkog komiteta, kao i u okviru ITU SG5: *Environment and climate change* studijske grupe. U okviru ovog poglavlja disertacije razvijena je metoda za određivanje merne nesigurnosti *EI*-a, koja daje analitički izraz za izračunavanje merne nesigurnosti *EI*-a, na bazi poznatih mernih nesigurnosti brojnih ulaznih parametara. Pored toga, predložen je i način za procenu funkcije gustine verovatnoće *EI*-a za slučaj da su ulazni parametri promenljive sa normalnom raspodelom, i da imaju velike srednje vrednosti i male standardne devijacije (tj. male relativne standardne merne nesigurnosti), što je najčešće slučaj u praksi.

Ovo poglavlje je organizovano u 6 delova. U prvom delu, data je definicija *EI*-a. Različiti pristupi za procenu merne nesigurnosti *EI*-a, razmotreni su u drugom delu.

Nakon toga, u trećem delu, navedeni su aritmetički izrazi za propagaciju merne nesigurnosti koji se primenjuju u predloženoj metodi. Analitički pristup za određivanje merne nesigurnosti  $EI$ -a dat je u četvrtom delu, dok je procena funkcije gustine verovatnoće  $EI$ -a data u petom delu. Na kraju, u okviru šestog dela, izvedeni su zaključci.

## 8.1 Definicija $EI$ -a

Kao što je već rečeno,  $EI$  predstavlja novu metriku koja se koristi za određivanje srednje izloženosti ljudske populacije u analiziranom geografskom području, koja potiče od mobilne mreže kao celine [147]-[148].  $EI$  uzima u obzir izloženost u *downlink*-u (koja potiče od baznih stanica i *access point*-a) preko srednje vrednosti gustine snage incidentnog polja i izloženost u *uplink*-u (koja potiče od mobilnih korisničkih uređaja) preko srednje predajne snage mobilnih korisničkih uređaja. Potrebno je napomenuti, da  $EI$  omogućava uzimanje u obzir i izlaganja koje potiče od mobilnih uređaja korisnika koji se nalaze u blizini, kao *downlink* izlaganja. Ipak, navedeno izlaganje u većini slučajeva ima zanemarljiv uticaj na vrednost  $EI$ -a, i obično se zanemaruje u praksi. Za potrebe ovog poglavlja, izlaganje koje potiče od mobilnih uređaja drugih korisnika u neposrednom okruženju, je zanemareno.

Ukratko,  $EI$  predstavlja transfer funkciju koja se koristi za određivanje jedinstvene vrednosti (parametra) na osnovu veoma kompleksnog skupa ulaznih podataka, koja treba da bude razumljiva, prihvatljiva i korisna svim akterima u oblasti analize izloženosti ljudi elektromagnetnim poljima (od opšte ljudske populacije do regulatornih tela). Za izračunavanje vrednosti  $EI$ -a koristi se sledeći izraz [147]-[148]:

$$EI^{SAR} = \frac{1}{T} \sum_t^{N_T} \sum_p^{N_P} \sum_e^{N_E} \sum_r^{N_R} \sum_c^{N_C} \sum_l^{N_L} \sum_{pos}^{N_{pos}} f_{t,p,e,r,l,c,pos} \left[ \sum_u^{N_U} (d^{UL} \bar{P}_{TX}) + d^{DL} \bar{S}_{inc} \right] \left[ \frac{W}{kg} \right] \quad (8.1)$$

gde:

- $EI^{SAR}$  predstavlja srednju izloženosti ljudske populacije u analiziranom geografskom području u vremenskom periodu  $T$ , izraženu preko SAR-a.  $SAR$  može da se odnosi na

SAR za celo telo  $SAR_{wb}$ , SAR za specifične organe (*Organ Specific*)  $SAR_{os}$  ili SAR lokalizovan na deo tela  $SAR_l$ .

- $N_T$  predstavlja broj razmatranih perioda u okviru celokupnog vremenskog okvira, npr. jednog dana ( $T$  - *Time*).
- $N_P$  predstavlja broj razmatranih kategorija ljudi u okviru populacije ( $P$  - *Population*).
- $N_E$  predstavlja broj razmatranih kategorija okruženja ( $E$  - *Environment*).
- $N_R$  predstavlja broj razmatranih radio-tehnologija ( $R$  - *Radio Access Technologies (RAT)*).
- $N_C$  predstavlja broj razmatranih tipova ćelija ( $C$  - *Cell Types*).
- $N_L$  predstavlja broj razmatranih kategorija korisničkih profila ( $L$  - *User Load Profiles*).
- $N_{pos}$  predstavlja broj razmatranih položaja tela ( $P$  - *Postures*).
- $N_U$  predstavlja broj razmatranih načina korišćenja uređaja ( $U$  - *Usages with Devices*).
- $\bar{P}_{TX}$  predstavlja srednju predajnu snagu sa kojom emituju korisnički uređaji tokom perioda  $t$ , sa načinom korišćenja uređaja  $u$ , povezani na radio-tehnologiju  $r$ , u kategoriji okruženja  $e$ . Srednja predajna snaga korisničkih uređaja određuje se uzimajući u obzir raspodelu snaga za celu razmatranu geografsku oblast.
- $\bar{S}_{inc}$  predstavlja srednju incidentnu gustinu snage na ljudskom telu tokom perioda  $t$ , koja potiče od radio-tehnologije  $r$ , u kategoriji okruženja  $e$ . Srednja incidentna gustina snage određuje se uzimajući u obzir raspodelu snaga za celu razmatranu geografsku oblast.
- $d^{UL} [\frac{Ws}{kg}/W]$  i  $d^{DL} [\frac{Ws}{kg}/\frac{W}{m^2}]$  predstavljaju normalizovane vrednosti doze za *uplink* (koja potiče od mobilnih korisničkih uređaja) i *downlink* (koja potiče od baznih stanica i *access point*-a), respektivno, dobijene množenjem sa vremenom provedenim u razmatranoj konfiguraciji.
- $f_{t,p,e,r,l,c,pos}$  predstavlja frakciju (deo od) ukupne ljudske populacije koji odgovara kategoriji ljudi  $p$ , sa kategorijom korisničkog profila  $l$ , sa položajem tela  $pos$ , povezanih na radio-tehnologiju  $r$ , u tipu ćelije  $c$ , u kategoriji okruženja  $e$ , tokom perioda dana  $t$ .

Koeficijent  $d^{UL}$  vezan je za izlaganje u *uplink*-u i izražen kao vrednost apsorbovane doze normalizovana u odnosu na predajnu snagu korisničkog uređaja  $P_{TX}^{ref}$  od 1W:

$$d^{UL} = \frac{TD_{t,p,l,e,r,c,u,pos}^{UL} [s] \cdot SAR_{p,r,u,pos}^{UL} [W/kg]}{P_{TX}^{ref} [W]} \left[ \frac{Ws}{kg} / W \right] \quad (8.2)$$

gde:

- $TD_{t,p,l,e,r,c,u,pos}^{UL}$  predstavlja vremensko trajanje *uplink* saobraćaja pri načinu korišćenja uređaja  $u$ , za kategoriju korisničkog profila  $l$ , povezanog na radio-tehnologiju  $r$ , u tipu ćelije  $c$ , u kategoriji okruženja  $e$ , za kategoriju ljudi  $p$ , sa položajem tela  $pos$ , tokom perioda dana  $t$ .
- $\frac{SAR_{p,r,u,pos}^{UL}}{P_{TX}^{ref}}$  može biti SAR za celo telo  $SAR_{wb}$ , SAR za specifične organe  $SAR_{os}$  ili SAR lokalizovan na deo tela  $SAR_l$ , za način korišćenja uređaja  $u$ , sa položajem tela  $pos$ , u frekvencijskom opsegu radio-tehnologije  $r$ , za kategoriju ljudi  $p$ , izračunat za predajnu snagu korisničkog uređaja  $P_{TX}^{ref}$ , i normalizovan u odnosu na ovu vrednost predajne snage.

Koeficijent  $d^{DL}$  je vezan za izlaganje u *downlink*-u i takođe izražen kao vrednost apsorbovane doze normalizovana u odnosu na incidentnu gustinu snage  $S_{inc}^{ref}$  od 1W/m<sup>2</sup>:

$$d^{DL} = \frac{TD_{t,p,e,r,c,pos}^{DL} [s] \cdot SAR_{p,r,pos}^{DL} [W/kg]}{S_{inc}^{ref} [W/m^2]} \left[ \frac{Ws}{kg} / \frac{W}{m^2} \right] \quad (8.3)$$

gde:

- $TD_{t,p,e,r,c,pos}^{DL}$  predstavlja vremensko trajanje intervala provedenog u položaju tela  $pos$ , pod uticajem radio-tehnologije  $r$ , u tipu ćelije  $c$ , u kategoriji okruženja  $e$ , za kategoriju ljudi  $p$ , tokom perioda dana  $t$ .
- $\frac{SAR_{p,r,pos}^{DL}}{S_{inc}^{ref}}$  može biti SAR za celo telo  $SAR_{wb}$ , SAR za specifične organe  $SAR_{os}$  ili SAR lokalizovan na deo tela  $SAR_l$ , koji potiče od baznih stanica i *access point*-a radio-

tehnologije  $r$ , za kategoriju ljudi  $p$ , sa položajem tela  $pos$ , normalizovan u odnosu incidentnu gustinu snage  $S_{inc}^{ref}$ .

## 8.2 Različiti pristupi za procenu merne nesigurnosti EI-a

Generalno gledano, postupak procene merne nesigurnosti odnosi se na postupak propagacije raspodela verovatnoća [55]. Da bi se kvalitetno odredila vrednost neke fizičke veličine, neophodno je poznavati model mernog sistema, kao i funkcionalne relacije koje postoje između izlazne fizičke veličine  $Y$  i određenog broja ulaznih veličina  $X_i$  (ulaznih parametara), sa kojima je izlazna veličina povezana [55]. Postoje različiti pristupi za procenu merne nesigurnosti:

- pristup baziran na dokumentu “*Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM)*” definisanom od strane JCGM-a [55]-[60], koji se zasniva na primeni zakona propagacije nesigurnosti i koji karakteriše izlaznu veličinu  $Y$  kao promenljivu sa normalnom raspedelom ili t-raspedelom,
- analitičke metode, u okviru kojih se primenjuje matematička analiza za određivanje aritmetičkog izraza za raspodelu verovatnoće krajnjeg rezultata  $Y$ , i
- i *Monte Carlo Method* (MCM) [56], [64]-[65], baziran na numeričkim simulacijama pomoću kojih se određuje raspodela verovatnoće krajnjeg rezultata  $Y$ .

Okvir za procenu merne nesigurnosti baziran na GUM dokumentu [55] predstavlja generalno približan metod, koji koristi najbolje procene  $x_i$  vrednosti ulaznih veličina  $X_i$ , standardne merne nesigurnosti  $u(x_i)$  ulaznih vrednosti  $x_i$ , i koeficijente osetljivosti  $c_i = (\partial f / \partial x_i)$  za određivanje procene  $y$  izlazne veličine  $Y$ , kao i odgovarajuće kombinovane standardne merne nesigurnosti  $u_c(y)$ :

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N c_i^2 \cdot u^2(x_i)} \quad (8.4)$$

Analitičke metode se primenjuju kad god je moguće odrediti aritmetički izraz za raspodelu verovatnoća krajnjeg rezultata  $Y$ . Ove metode generalno ne unose bilo kakvu aproksimaciju, ali mogu biti primenjene samo u relativno prostim slučajevima. Primeri primene analitičkog pristupa za procenu merne nesigurnosti dati su u [62]-[63].

MCM predstavlja rešenje za procenu merne nesigurnosti sa numeričkom preciznošću koja može da se kontroliše [56]. Korišćenjem MCM-a, aproksimacija raspodele verovatnoće krajnjeg rezultata  $Y$  određuje se numeričkim putem, polazeći od raspodela verovatnoća ulaznih veličina  $X_i$ .

Uzimajući u obzir da je za određivanje vrednosti  $EI$ -a dat aritmetički izraz (8.1), može se zaključiti da je za potrebe procene standardne merne nesigurnosti  $EI$ -a, najadekvatnije primeniti analitički pristup.

### 8.3 Aritmetički izrazi za propagaciju merne nesigurnosti

Zakon propagacije nesigurnosti (propagacije raspodela verovatnoća) definiše efekat koji merne nesigurnosti ulaznih većina imaju na konačni rezultat [149]-[150]. Ovaj zakon, u stvari, predstavlja metod za kombinovanje mernih nesigurnosti ulaznih veličina, da bi se odredila vrednost merne nesigurnosti izlazne veličine. Svaki put kad procena merne nesigurnosti podrazumeva više ulaznih parametara, primena propagacije nesigurnosti je neophodna za određivanje merne nesigurnosti rezultata.

Imajući u vidu da je analitički izraz za određivanje vrednosti  $EI$ -a (8.1) baziran na množenju i, nakon toga, sabiranju vrednosti ulaznih parametara, potrebno je odrediti odnos između standardnih devijacija više ulaznih parametara i standardne devijacije konačnog rezultata, za slučajeve sabiranja i množenja.

Prema [149]-[150], za slučajne međusobno nezavisne ulazne promenljive, postoje izrazi koji su kod sabiranja i oduzimanja izraženi preko apsolutnih vrednosti standardnih devijacija, dok su kod množenja i deljenja izraženi preko relativnih vrednosti standardnih devijacija.

Za slučaj sabiranja (što važi i za oduzimanje), pod pretpostavkom da je izlazna veličina  $y$  izražena preko  $N$  ulaznih slučajnih međusobno nezavisnih veličina  $x_i$  izrazom:

$$y = \sum_{i=1}^N x_i \quad (8.5)$$

onda se standardna devijacija izlazne veličine  $\sigma_y$  može izračunati pomoću izraza [149]-[150]:

$$\sigma_y = \sqrt{\sum_{i=1}^N \sigma_{x_i}^2} \quad (8.6)$$

gde  $\sigma_{x_i}$  predstavljaju standardne devijacije ulaznih slučajnih međusobno nezavisnih veličina.

Sa druge strane, za slučaj množenja (što važi i za deljenje), pod pretpostavkom da je izlazna veličina  $y$  izražena preko  $N$  ulaznih slučajnih međusobno nezavisnih veličina  $x_i$  izrazom:

$$y = \prod_{i=1}^N x_i \quad (8.7)$$

onda se za izračunavanje standardne devijacije izlazne veličine  $\sigma_y$  može koresistiti izraz [149]-[150]:

$$\frac{\sigma_y}{y} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left( \frac{\sigma_{x_i}}{x_i} \right)^2} \quad (8.8)$$

gde  $\sigma_{x_i}$  predstavljaju standardne devijacije ulaznih slučajnih međusobno nezavisnih veličina.

Uzimajući u obzir da su svi ulazni parametri neophodni za izračunavanje vrednosti  $EI$ -a međusobno nezavisni, izrazi (8.5)-(8.8) mogu se koristiti za procenu standardne merne nesigurnosti  $EI$ -a.

#### 8.4 Analitički pristup za određivanje merne nesigurnosti $EI$ -a

Analitički obrazac za izračunavanje vrednosti  $EI$ -a, dat izrazom (8.1), može biti napisan u alternativnoj formi:

$$EI^{SAR} = \frac{1}{T} \sum_t^{N_T} \sum_p^{N_P} \sum_e^{N_E} \sum_r^{N_R} \sum_c^{N_C} \sum_l^{N_L} \sum_{pos}^{N_{pos}} \left[ \sum_u^{N_U} (A) + B \right] \left[ \frac{W}{kg} \right] \quad (8.9)$$

gde su:

$$A = f_{t,p,e,r,l,c,pos} \frac{TD_{t,p,l,e,r,c,u,pos}^{UL} [s] \cdot SAR_{p,r,u,pos}^{UL} [W/kg]}{P_{TX}^{ref} [W]} \bar{P}_{TX} [W] \quad (8.10)$$

$$B = f_{t,p,e,r,l,c,pos} \frac{TD_{t,p,e,r,c,pos}^{DL} [s] \cdot SAR_{p,r,pos}^{DL} [W/kg]}{S_{inc}^{ref} [W/m^2]} \bar{S}_{inc} [W/m^2] \quad (8.11)$$

Relativne standardne merne nesigurnosti veličina  $A$  i  $B$  označene su sa  $u(A)$  i  $u(B)$ , respektivno. Imajući u vidu da su  $P_{TX}^{ref}$  i  $S_{inc}^{ref}$  konstante, u skladu sa izrazom (8.8), relativne standardne merne nesigurnosti  $u(A)$  i  $u(B)$  mogu biti izračunate na sledeći način:

$$u(A) = \sqrt{u^2(f_{t,p,e,r,l,c,pos}) + u^2(TD_{t,p,l,e,r,c,u,pos}^{UL}) + u^2(SAR_{p,r,u,pos}^{UL}) + u^2(\bar{P}_{TX})} \quad (8.12)$$

$$u(B) = \sqrt{u^2(f_{t,p,e,r,l,c,pos}) + u^2(TD_{t,p,e,r,c,pos}^{DL}) + u^2(SAR_{p,r,pos}^{DL}) + u^2(\bar{S}_{inc})} \quad (8.13)$$

U skladu sa izrazom (8.6), relativna standardna merna nesigurnosti  $EI$ -a može biti izračunata na osnovu obrasca:

$$u(EI) = \frac{\sqrt{\sum_t^{N_T} \sum_p^{N_P} \sum_e^{N_E} \sum_r^{N_R} \sum_c^{N_C} \sum_l^{N_L} \sum_{pos}^{N_{pos}} \left[ \sum_u^{N_U} \left( A^2 \cdot u^2(A) \right) + B^2 \cdot u^2(B) \right]}}{\sum_t^{N_T} \sum_p^{N_P} \sum_e^{N_E} \sum_r^{N_R} \sum_c^{N_C} \sum_l^{N_L} \sum_{pos}^{N_{pos}} \left[ \sum_u^{N_U} (A+B) \right]} \quad (8.14)$$

## 8.5 Procena funkcije gustine verovatnoće EI-a

Za potrebe određivanja proširene merne nesigurnosti  $EI$ -a, koja se dobija množenjem kombinovane standardne merne nesigurnosti sa odgovarajućim faktorom pokrivenosti  $k$ , neophodno je poznavanje funkcije gustine verovatnoće  $EI$ -a [55], [67]-[68]. Analitički pristup dat u poglavlju 8.4, omogućava izračunavanje relativne standardne merne nesigurnosti  $EI$ -a na bazi poznatih mernih nesigurnosti brojnih ulaznih parametara, ali ne obezbeđuje informacije o funkciji gustine verovatnoće  $EI$ -a.



Za potrebe određivanja funkcije gustine verovatnoće  $EI$ -a, može se koristiti MCM. Ipak, primena MCM-a je značajno kompleksnija i vremenski zahtevnija, s obzirom da iziskuje sprovođenje simulacija za svaku pojedinačnu vrednost  $EI$ -a, odnosno za svaku pojedinačnu kombinaciju ulaznih parametara [56].

Iz tog razloga, u okviru ovog poglavlja predložen je način za procenu funkcije gustine verovatnoće  $EI$ -a za slučaj kada su ulazni parametri promenljive sa normalnom raspodelom, koje imaju velike srednje vrednosti i male standardne devijacije (tj. male relativne standardne merne nesigurnosti).

Kao što je pokazano u nastavku, pod pretpostavkom da svi ulazni parametri imaju male relativne standardne merne nesigurnosti, može se smatrati da je funkcija gustine verovatnoće  $EI$ -a normalna. Potrebno je istaći, da je ovaj uslov najčešće ispoštovan u praksi.

Da bi prethodna tvrdnja bila dokazana potrebno je krenuti od analitičkog izraza za izračunavanje  $EI$ -a (8.1). Iz ovog izraza vidi se da se vrednost  $EI$ -a dobija kao suma proizvoda ulaznih parametara. Sa druge strane, poznato je da proizvod  $N$  međusobno nezavisnih log-normalnih slučajnih promenljivih, takođe ima log-normalnu raspodelu. Dalje, za slučajne promenljive sa relativno velikim srednjim vrednostima i malim standardnim devijacijama, log-normalna raspodela liči na (konvergira ka) normalnu raspodelu. Iz toga se može zaključiti da proizvod  $N$  međusobno nezavisnih normalnih slučajnih promenljivih, sa malim relativnim standardnim mernim nesigurnostima, ima takođe normalnu raspodelu. Da bi ova tvrdnja bila dokazana, potrebno je krenuti od funkcije gustine verovatnoće za log-normalnu raspodelu.

Funkcija gustine verovatnoće za log-normalnu raspodelu data je izrazom:

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad x > 0 \quad (8.15)$$

Za log-normalnu raspodelu, srednja vrednost  $\bar{x}$  i varijansa  $\sigma_x^2$  date su izrazima:

$$\bar{x} = e^{\mu + \sigma^2/2} \quad (8.16)$$

$$\sigma_x^2 = (e^{\sigma^2} - 1)e^{2\mu + \sigma^2} \quad (8.17)$$

Kada se podeli  $\sigma_x$  sa  $\bar{x}$ , dobija se:

$$\frac{\sigma_x}{\bar{x}} = \sqrt{e^{\sigma^2} - 1} \quad (8.18)$$

Pod pretpostavkom malih relativnih standardnih mernih nesigurnosti, važi da je:  $\frac{\sigma_x}{\bar{x}} = \sqrt{e^{\sigma^2} - 1} \ll 1$ . To dalje znači da je:  $1 < e^{\sigma^2} \ll 2$ . Primenjujući razvoj u *Taylor*-ov red, izraz (8.18) postaje:

$$\frac{\sigma_x}{\bar{x}} \approx \sigma \quad (8.19)$$

Znajući da je  $\frac{\sigma_x}{\bar{x}} \approx \sigma \ll 1$ , izraz (8.16) postaje:

$$\bar{x} \approx e^\mu \quad (8.20)$$

Sa druge strane, zamenjujući  $\mu$  sa  $\mu = \ln \bar{x}$  u izrazu (8.15), dobija se:

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln x - \ln \bar{x})^2}{2\sigma^2}} \quad (8.21)$$

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln \frac{x}{\bar{x}})^2}{2\sigma^2}} \quad (8.22)$$

Znajući da je  $\frac{x}{\bar{x}} \approx 1$ , dobija se:

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln[1+(\frac{x}{\bar{x}}-1)])^2}{2\sigma^2}} \quad (8.23)$$

Uzimajući u obzir da je  $|\frac{x}{\bar{x}} - 1| \ll 1$  i primenjujući razvoj u *Taylor*-ov red, dobija se:

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\frac{x}{\bar{x}}-1)^2}{2\sigma^2}} \quad (8.24)$$

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2\bar{x}^2}} \quad (8.25)$$

$$f(x) = \frac{1}{\frac{x}{\bar{x}}\sigma\bar{x}\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2\bar{x}^2}} \quad (8.26)$$

Korišćenjem izraza (8.19), izraz (8.26) postaje:

$$f(x) = \frac{1}{\frac{x}{\bar{x}}\sigma_x\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma_x^2}} \quad (8.27)$$

Konačno, znajući da je  $\frac{x}{\bar{x}} \approx 1$ , izraz (8.27) postaje:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_x\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma_x^2}} \quad (8.28)$$

što predstavlja izraz za funkciju gustine verovatnoće normalne raspodele.

To znači da za slučajne promenljive sa srednjim vrednostima znatno većim od standardnih devijacija (male relativne standardne merne nesigurnosti), log-normalna raspodela liči na (konvergira ka) normalnoj raspodeli. Dakle, za proizvod normalnih slučajnih promenljivih sa relativno velikim srednjim vrednostima i malim standardnim devijacijama, odnosno malim relativnim standardnim mernim nesigurnostima, može se smatrati da ima takođe normalnu raspodelu.

Drugi korak u izračunavanju vrednosti  $EI$ -a je sabiranje proizvoda ulaznih parametara. Poznato je da zbir  $N$  međusobno nezavisnih normalnih slučajnih promenljivih takođe ima normalnu raspodelu.

Imajući u vidu da su svi ulazni parametri za određivanje  $EI$ -a, kao i njihovi međusobni proizvodi, međusobno nezavisni, i pretpostavljajući da su normalne slučajne promenljive sa malim relativnim standardnim mernim nesigurnostima, može se zaključiti da je funkcija gustine verovatnoće  $EI$ -a približno normalna.

## 8.6 Zaključak

Savremeni pristup u analizi izloženosti ljudi radio-frekvencijskim elektromagnetnim poljima podrazumeva određivanje ukupnog izlaganja ljudi, i to kombinovanjem izlaganja u *downlink*-u (koje potiče od baznih stanica i *access point*-a) i izlaganja u *uplink*-u (koje potiče od mobilnih korisničkih uređaja) [141]-[146]. Iz tog razloga, u okviru EU FP7 projekta LEXNET (*Low-EMF Exposure Future Networks*) [95], definisana je nova metrika nazvana indeks izloženosti (*EI - Exposure Index*), koja omogućava određivanje srednje izloženosti ljudske populacije koja potiče od mobilne mreže u analiziranom geografskom području [147]-[148]. Ova metrika uzima u obzir izloženost od baznih stanica i izloženost od mobilnih korisničkih uređaja, kao i veliki broj parametara koji utiču na izloženost, kao što su: starost ljudi, položaj tela, način upotrebe korisničkog terminala, korišćena radio-tehnologija, okruženje, itd.

Uzimajući u obzir da procena merne nesigurnosti predstavlja jednu od ključnih komponenti u svim metrološkim primenama [53]-[55], i posebno imajući u vidu da su koncepti *EI*-a u postupku diskusije za standardizaciju u okviru CENELEC TC106x tehničkog komiteta i ITU SG5: *Environment and climate change* studijske grupe, u ovom poglavlju disertacije razvijena je metoda za određivanje merne nesigurnosti *EI*-a. Ova metoda daje analitički izraz za izračunavanje relativne standardne merne nesigurnosti *EI*-a, na bazi poznatih standardnih mernih nesigurnosti brojnih ulaznih parametara. Pored toga, pokazano je da je funkcija gustine verovatnoće *EI*-a približno normalna, za slučaj kada su ulazni parametri promenljive sa normalnom raspodelom i malim relativnim standardnim mernim nesigurnostima, što je najčešće slučaj u praksi.

## 9. ZAKLJUČAK

Rastući zahtevi korisnika za pristupačnim i visokokvalitetnim telekomunikacionim servisima doveli su do intenzivnog razvoja sistema i uređaja za bežične komunikacije. Zbog prostorne rasprostranjenosti naročito se ističu javni mobilni sistemi (GSM - *Global System for Mobile Communications*, DCS - *Digital Communication System*, UMTS - *Universal Mobile Telecommunication System*, LTE - *Long-Term Evolution*). Sa obzirom da javni mobilni sistemi kao osnov za međusobnu komunikaciju koriste emisiju elektromagnetnih talasa, u životnom okruženju dolazi do porasta nivoa elektromagnetnog zračenja. Imajući u vidu da kod stanovništva postoji strah od efekata ovog zračenja sa jedne strane, dok sa druge strane mobilni sistemi predstavljaju nezamenljiv deo savremenog života, javlja se potreba za objektivnim sagledavanjem nivoa elektromagnetnog zračenja u životnom okruženju.

Elektromagnetno zračenje baznih stanica javnih mobilnih sistema spada u radio-frekvencijsko elektromagnetno zračenje. Da bi se uticaj elektromagnetnog zračenja na ljude kontrolisao i sveo na što manju moguću meru, usvojene su norme kojima se ograničava izlaganje ljudi. Ovim normama definisane su granice, iskazane kroz bazična ograničenja i izvedene referentne granične nivoe, preko kojih ljudi ne smeju biti izloženi elektromagnetnim poljima. U okviru ove disertacije dat je pregled bazičnih ograničenja i referentnih graničnih nivoa definisanih Pravilnikom o granicama izlaganja nejonizujućim zračenjima, ICNIRP (*International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection*) preporukom, FCC (*Federal Communications Commission*) preporukom, IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) standardom i ARPANSA (*Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency*) standardom. Na području Srbije, u praksi se primenjuju norme definisane Pravilnikom o granicama izlaganja nejonizujućim zračenjima u zonama povećane osetljivosti, dok se izvan zona povećane osetljivosti primenjuju norme definisane ICNIRP preporukom.

Da bi se ispitala usklađenost instalacije bazne stanice sa referentnim graničnim nivoima, sprovode se merenja intenziteta elektromagnetnog polja u okolini baznih stanica, korišćenjem metoda definisanih međunarodnim standardima. U okviru disertacije, opisana je metoda definisana Evropskim standardima, koji su bez ikakvih modifikacija usvojeni kao srpski standardi na engleskom jeziku. Ove metode se razvijaju i nadograđuju u skladu sa razvojem telekomunikacijih sistema, kao i poboljšanjima mernih uređaja.

Jedan važan segment u razvoju ovih metoda, koji je posebno aktuelan u poslednje vreme, je određivanje merne nesigurnosti rezultata merenja. U ovoj disertaciji, predložena je praktična metoda za procenu merne nesigurnosti rezultata merenja intenziteta električnog polja, za slučajeve širokopojasnog mernog sistema i frekvencijski selektivnog mernog sistema. Ova metoda bazirana je na zakonu propagacije nesigurnosti (zakon propagacije raspodela verovatnoća) i omogućava procenu kombinovane standardne merne nesigurnosti rezultata merenja, kao i proširene merne nesigurnosti sa intervalom poverenja od 95%.

Cilj ove disertacije bio je povećanje efikasnosti metoda za merenje intenziteta elektromagnetnog polja u okolini baznih stanica koje je ostvareno unapređenjima u nekoliko segmenata. Sa jedne strane, proces merenja intenziteta električnog polja na lokaciji bazne stanice treba da bude sproveden u relativno kratkom vremenu, da bi se postigla ekonomska isplativost i da bi se uznemiravanje ljudi koji žive na lokaciji svelo na minimum. Sa druge strane, standardima se zahteva merenje srednje vrednosti u definisanom periodu od 6min na svakoj mernoj poziciji. U okviru disertacije, data je procedura za povećanje efikasnosti skraćivanjem intervala merenja u jednoj mernoj poziciji. Na osnovu rezultata merenja koja su sprovedena u okolini multisistemske bazne stanice, pokazano je da se postupcima usrednjavanja u kraćim vremenskim intervalima od 1min, 30s i 15s mogu uspešno proceniti vrednosti dobijene standardnim postupkom, pri čemu se merni proces ubrzava približno 6, 12 i 24 puta, respektivno. Naravno, kada se merenje sprovodi u kraćim vremenskim intervalima, prilikom proračuna ukupne (kombinovane) merne nesigurnost u obzir mora da bude uzeta i dodatna standardna merna nesigurnost čija vrednost iznosi 3.07%, 3.80% i 4.42% za intervale usrednjavanja 1min, 30s i 15s, respektivno. Kao što je pokazano, uprkos

činjenici da su korišćeni intervali usrednjavanja kraći od zahtevanih 6min, predložena merna procedura obezbeđuje rezultate sa prihvatljivim gubitkom kvaliteta merenja.

U slučaju sistematskih merenja intenziteta električnog polja koja se sprovode u većim oblastima, često se koristi veliki broj pojednostavljenih mernih sistema ili pojednostavljenih verzija ekspozimetara, koji zbog jednostavnije realizacije i niže cene koriste monoaksijalne antene. Monoaksijalne antene omogućavaju merenje samo jedne prostorne komponente električnog polja, dok se definisanim metodama podrazumevaju izotropna merenja. U disertaciji su sprovedena istovremena merenja intenziteta sve tri prostorne komponente električnog polja, za sedam različitih tipova okruženja, koji predstavljaju tipična okruženja u kojima su ljudi izloženi elektromagnetnim poljima. Na bazi ovih rezultata razvijen je model za konverziju rezultata merenja intenziteta jedne prostorne komponente električnog polja, u intenzitet koji se dobija izotropnim merenjima. Po ovom modelu, pri korišćenju monoaksijalne merne sonde za određivanje ukupnog intenziteta električnog polja, potrebno primeniti dodatni multiplikativni faktor konverzije vrednosti 1.95, i potrebno je uzeti u obzir dodatnu standardnu mernu nesigurnost vrednosti 33.07%.

Pored dobro poznatog kratkotrajnog fadinga, koji generalno karakteriše propagaciju elektromagnetnih talasa, nekoliko dodatnih efekata mogu imati značajan uticaj na promenljivost intenziteta elektromagnetnog polja koje potiče od baznih stanica. Najznačajniji efekti koji su posledica telekomunikacionih protokola i koji direktno utiču na predajnu snagu baznih stanica su saobraćajno opterećenje, automatska kontrola snage i diskontinualna predaja. U okviru disertacije, sprovedena je analiza dugoročne promenljivosti intenziteta električnog polja u vremenskom intervalu od 7 dana. Za potrebe analize, sprovedena su *band*-selektivna merenja u realnom mrežnom okruženju na 7 urbanih lokacija, u opsezima u kojima rade bazne stanice GSM, DCS i UMTS sistema sva tri operatora. Pored toga, određena je dodatna merna nesigurnost koja potiče od promenljivosti saobraćajnog opterećenja i funkcionalnosti predajnika, koja mora biti uzeta u obzir prilikom analize srednje vrednosti u definisanom intervalu vremena. Ova nesigurnost je određena za 6 različitih kategorija definisanih u zavisnosti od dana u nedelji i specifičnih perioda dana. Za svaku od definisanih kategorija, navedena merna nesigurnost je analizirana za različite intervale usrednjavanja: 10s, 30s, 1min, 6min, 15min, 30min, 1h, 3h, 5h i 10h. Rezultati pokazuju da se nesigurnost

smanjuje sa povećanjem intervala usrednjavanja. Poređenjem opsega standardne merne nesigurnosti za različite sisteme, zaključeno je da su najveće vrednosti za UMTS sistem, sa opsegom standardne merne nesigurnosti 4,69-14,69%. Opseg standardne merne nesigurnosti za GSM sistem je 4,04-12,11%. Najmanje vrednosti standardne merne nesigurnosti ima DCS, opseg je 2,71-7,92%. S obzirom da se u praksi merenja sprovode tokom celog dana, vrednosti koje se izmere mogu da odstupaju od slučaja maksimalnog opterećenja. Zbog toga, javlja se dodatna nesigurnost rezultata merenja, koja je određena na bazi rezultata za slučaj intervala usrednjavanja od 6min i kategorije “svi dani – aktivni sati”. Prilikom sprovođenja postupka merenja na lokaciji, da bi “najkritičniji” slučaj (tj. maksimalne 6-minutne vrednosti) bio obuhvaćen, potrebno je uzeti u obzir dodatnu standardnu mernu nesigurnost u iznosu 7,08%, 6,33% i 9,41%, za GSM, DCS i UMTS, respektivno.

Pored unapređenja metoda koje se koriste, važan deo istraživanja u oblasti merenja intenziteta elektromagnetnog polja jesu i rezultati merenja sprovedenih u realnim okruženjima baznih stanica. U okviru ove disertacije, sprovedena je statistička analiza rezultata merenja intenziteta električnog polja u okolini baznih stanica na 664 različite lokacije baznih stanica javnih mobilnih sistema, klasifikovane u tri osnovne kategorije: stubovi (316 lokacija), lokacije sa instalacijom na objektu (276 lokacija) i lokacije sa instalacijom unutar objekta (72 lokacije).

Rezultati merenja za kategoriju stubovi pokazuju da ni u jednom slučaju ukupni intenzitet električnog polja ne prelazi vrednost od 10V/m, što je znatno ispod referentnih graničnih nivoa propisanih ICNIRP preporukom, kao i referentnih graničnih nivoa propisanih Pravilnikom o granicama izlaganja nejonizujućim zračenjima.

Na osnovu sprovedene analize za kategoriju instalacije na objektu, može se zaključiti da su u slučaju *outdoor* merenja, referentne granične vrednosti propisane ICNIRP preporukama prevaziđene u 2,5% svih lokacija (2 industrijska i 5 kancelarijskih objekata). Sa druge strane, referentne granične vrednosti propisane Pravilnikom o granicama izlaganja nejonizujućim zračenjima prevaziđene su u 15,6% svih lokacija (10 industrijskih, 24 kancelarijska i 9 stambenih objekata) za *outdoor* merenja. Treba istaći da su ove vrednosti izmerene na krovovima objekata, u zonama gde ljudi ne borave, i čak u većini slučajeva nemaju pristup. Sa druge strane, *indoor* ukupni intenzitet



električnog polja nije prevazišao ICNIRP i Srpske referentne granične nivoe ni u jednom slučaju.

Na određenom broju lokacija *indoor* mikro baznih stanica, maksimalna vrednost intenziteta električnog polja, izmerena na horizontalnoj udaljenosti od 1m prevazilazi referentne granične vrednosti propisane ICNIRP preporukama i Pravilnikom o granicama izlaganja nejonizujućim zračenjima. Apsolutna maksimalna vrednost prevazilazi Srpske referentne granične nivoe za približno 38% lokacija, i prevazilazi ICNIRP referentne granične za približno 7% lokacija. Ovi rezultati pokazuju da elektromagnetno zračenje koje potiče od *indoor* mikro baznih stanica treba pažljivo analizirati, iako one imaju manju efektivnu izračenu snagu u poređenju sa baznim stanicama druge dve kategorije. Razlog za to je činjenica da u slučaju *indoor* mikro baznih stanica, ljudi mogu da se nađu veoma blizu antena (na samo par metara), što nije slučaj sa *outdoor* makro baznim stanicama.

Savremeni pristup u analizi izloženosti ljudi radio-frekvencijskim elektromagnetnim poljima podrazumeva određivanje ukupnog izlaganja ljudi, i to kombinovanjem izlaganja u *downlink*-u (koje potiče od baznih stanica i *access point*-a) i izlaganja u *uplink*-u (koje potiče od mobilnih korisničkih uređaja). U okviru disertacije predstavljena je nova metrika nazvana indeks izloženosti, definisana u okviru EU FP7 projekta LEXNET (*Low-EMF Exposure Future Networks*), koja omogućava određivanje srednje izloženosti ljudske populacije koja potiče od mobilne mreže u analiziranom geografskom području. Uzimajući u obzir potrebu za procenom merne nesigurnosti, u disertaciji je razvijena metoda za određivanje merne nesigurnosti indeksa izloženosti. Ova metoda daje analitički izraz za izračunavanje relativne standardne merne nesigurnosti indeksa izloženosti, na bazi poznatih standardnih mernih nesigurnosti brojnih ulaznih parametara. Pored toga, pokazano je da je funkcija gustine verovatnoće indeksa izloženosti približno normalna, za slučaj kada su ulazni parametri promenljive sa normalnom raspodelom i malim relativnim standardnim mernim nesigurnostima, što je najčešće slučaj u praksi.

Model za konverziju monoaksijalnih u izotropna merenja, razvijen u ovoj disertaciji, baziran je na statističkoj analizi faktora konverzije dobijenih za svaki odbirak intenziteta električnog polja. Za slučajeve pokretne merne sonde (npr. ekspozimetri koje nose ljudi), vremensko usrednjavanje rezultata merenja može dovesti do povećanja

preciznosti i tačnosti, što dovodi do manje merne nesigurnosti. Slično je i za slučaj prostornog usrednjavanja rezultata merenja dobijenih na više mernih pozicija sa stacionarnom monoaksijalnom mernom sondom (npr. mreža fiksnih ekspozimetara). Navedeni slučajevi usrednjavanja predstavljaju osnov za buduća istraživanja.

U budućnosti, treba očekivati povećanje elektromagnetnog zračenja. Razvoj mobilnih mreža dovodi do povećanja broja predajnika na postojećim lokacijama baznih stanica javnih mobilnih sistema (na već izgrađenim sajtovim), kao i dodavanje novih mobilnih sistema (npr. dodavanje UMTS na GSM lokaciji, dodavanje LTE baznih stanica itd.). Dodavanje novih predajnika na postojećim lokacijama sigurno će dovesti do povećanja elektromagnetnog zračenja. Pošto je implementacija LTE sistema trenutno u toku u Srbiji, osnov za dalja istraživanja će biti uzimanje lokacija sa LTE baznim stanicama u procenu opšte izloženosti ljudi elektromagnetnim zračenjima.

## LITERATURA

- [1] 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 Physics, 74(4):494–522 (1998).
- [2] Ziskin M.C. *Electromagnetic hypersensitivity - a COMAR technical information statement*. IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine, 21(5):173–175 (2002).
- [3] Hirata A. *Temperature increase in human eyes due to near-field and far-field exposures at 900 MHz, 1.5 GHz, and 1.9 GHz*. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 47(1):68–76 (2005).
- [4] Balzano Q, Garay O, Manning T.J. *Electromagnetic energy exposure of simulated users of portable cellular telephones*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 44(3):390–403 (1995).
- [5] Pradier A, Hadjem A, Lautru D, Gati A, Wong M-F, Hanna V.F, Wiart J. *Evaluation of the SAR induced in a multilayer biological structure and comparison with SAR in homogeneous tissues*. Annals of Telecommunications, 63(1–2):79–86 (2008).
- [6] Pisa S, Cavagnaro M, Lopresto V, Piuze E, Lovisolo G.A, Bernardi P. *A procedure to develop realistic numerical models of cellular phones for an accurate evaluation of SAR distribution in the human head*. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 53(4):1256–1264 (2005).
- [7] Ilvonen S, Sarvas J. *Magnetic-field-induced ELF currents in a human body by the use of a GSM phone*. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 49(2):294–301 (2007).
- [8] Cardis E, Varsier N, Bowman J.D, Deltour I, Figuerola J, Mann S, Moissonnier M, Taki M, Vecchia P, Villegas R, Vrijheid M, Wake K, Wiart J. *Estimation of RF energy absorbed in the brain from mobile phones in the interphone study*. Occupational and Environmental Medicine, 68(9):686–693 (2011).
- [9] Li Q-X, Gandhi O.P. *Thermal implications of the new relaxed IEEE RF safety standard for head exposures to cellular telephones at 835 and 1900 MHz*. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 54(7):3146–3154 (2006).
- [10] Hirata A, Shiozawa T. *Correlation of maximum temperature increase and peak SAR in the human head due to handset antennas*. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 51(7):1834–1841 (2003).
- [11] Wiart J, Hadjem A, Wong M.F, Bloch I. *Analysis of RF exposure in the head tissues of children and adults*. Physics in Medicine and Biology, 53(13):3681–3695 (2008).

- [12] Lacroux F, Conil E, Carrasco A.C, Gati A, Wong M-F, Wiart J. *Specific absorption rate assessment near a base station antenna (2,140 MHz): some key points*. Annals of Telecommunications, 63(1–2):55–64 (2008).
- [13] Kientega T, Conil E, Hadjem A, Richalot E, Gati A, Wong M-F, Picon O, Wiart J. *A surrogate model to assess the whole body SAR induced by multiple plane waves at 2.4 GHz*. Annals of Telecommunications, 66(7–8):419–428 (2011).
- [14] Francavilla M, Schiavoni A, Bertotto P, Richiardi G. *Effect of the hand on cellular phone radiation*. IEE Proceedings - Microwaves, Antennas and Propagation, 148(4):247–253 (2001).
- [15] Gosselin M.C, Christ A, Kuhn S, Kuster N. *Dependence of the occupational exposure to mobile phone base stations on the properties of the antenna and the human body*. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 51(2):227–235 (2009).
- [16] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. *ICNIRP 16/09: Exposure to high frequency electromagnetic fields, biological effects and health consequences (100 kHz-300 GHz) - review of the scientific evidence on dosimetry, biological effects, epidemiological observations, and health consequences concerning exposure to high frequency electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz)*, ICNIRP (2009).
- [17] Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency. *Radiation protection standard - maximum exposure levels to radiofrequency fields-3 kHz to 300 GHz*. ARPANSA Radiation Protection Series, Publication No. 3 (2002).
- [18] Federal Communications Commission. *Evaluating compliance with FCC guidelines for human exposure to radiofrequency electromagnetic fields*. FCC 1997–01 ed: OET Bulletin 65 (1997).
- [19] Institute of Electrical and Electronics Engineers. *IEEE standard for safety levels with respect to human exposure to radio frequency electromagnetic fields, 3 kHz to 300 GHz*. IEEE Standard C95.1-2005 (2006).
- [20] Institute of Electrical and Electronics Engineers. *IEEE standard for safety levels with respect to human exposure to radio frequency electromagnetic fields, 3 kHz to 300 GHz. Amendment 1: Specifies ceiling limits for induced and contact current, clarifies distinctions between localizes exposure and spatial peak power density*. IEEE Standard C95.1a-2010 (2010).
- [21] Institute of Electrical and Electronics Engineers. *IEEE standard for radiofrequency energy and current-flow symbols*. IEEE Standard C95.2-1999 (1999).
- [22] Repacholi M.H. *WHO's international EMF project*. Radiation Protection Dosimetry, 83(1–2):1–4 (1999).
- [23] *Zakon o zaštiti od nejonizujućih zračenja*. Službeni glasnik Republike Srbije broj 36/2009 (2009).
- [24] *Pravilnik o granicama izlaganja nejonizujućim zračenjima*. Službeni glasnik Republike Srbije broj 104/2009 (2009).
- [25] *Pravilnik o izvorima nejonizujućih zračenja od posebnog interesa, vrstama izvora, načinu i periodu njihovog ispitivanja*. Službeni glasnik Republike Srbije broj 104/2009 (2009).
- [26] *Pravilnik o sadržini evidencije o izvorima nejonizujućih zračenja od posebnog interesa*. Službeni glasnik Republike Srbije broj 104/2009 (2009).

- [27] *Pravilnik o sadržini i izgledu obrasca izveštaja o sistematskom ispitivanju nivoa nejonizujućih zračenja u životnoj sredini*. Službeni glasnik Republike Srbije broj 104/2009 (2009).
- [28] *Pravilnik o uslovima koje moraju da ispunjavaju pravna lica koja vrše poslove sistematskog ispitivanja nivoa nejonizujućih zračenja, kao i način i metode sistematskog ispitivanja u životnoj sredini*. Službeni glasnik Republike Srbije broj 104/2009 (2009).
- [29] *Pravilnik o uslovima koje moraju da ispunjavaju pravna lica koja vrše poslove ispitivanja nivoa zračenja izvora nejonizujućih zračenja od posebnog interesa u životnoj sredini*. Službeni glasnik Republike Srbije broj 104/2009 (2009).
- [30] Institut za standardizaciju Srbije. *SRPS EN 50383:2008 - Osnovni standard za izračunavanje i merenje jačine elektromagnetskog polja i SAR-a u odnosu na izlaganje ljudi elektromagnetskom polju u radio stanicama i fiksnim priključnim stanicama za bežične telekomunikacione sisteme (od 110 MHz do 40 GHz)*. ISS (2008).
- [31] Institut za standardizaciju Srbije. *SRPS EN 50384:2008 - Standard za proizvod za pokazivanje usaglašenosti radio-stanica i fiksnih priključnih stanica za bežične telekomunikacione sisteme sa osnovnim ograničenjima ili referentnim nivoima koji se odnose na izlaganje ljudi radiofrekvencijskim elektromagnetskim poljima (od 110 MHz do 40 GHz) - Profesionalna upotreba*. ISS (2008).
- [32] Institut za standardizaciju Srbije. *SRPS EN 50385:2008 - Standard za proizvod za pokazivanje usaglašenosti radio-stanica i fiksnih priključnih stanica za bežične telekomunikacione sisteme sa osnovnim ograničenjima ili referentnim nivoima koji se odnose na izlaganje ljudi radiofrekvencijskim elektromagnetskim poljima (od 110 MHz do 40 GHz) - Opšta upotreba*. ISS (2008).
- [33] Institut za standardizaciju Srbije. *SRPS EN 50400:2008 - Osnovni standard za pokazivanje usaglašenosti stacionarne opreme za radio-prenos (od 110 MHz do 40 GHz) predviđene za upotrebu u bežičnim telekomunikacionim mrežama sa osnovnim ograničenjima ili referentnim nivoima koji se odnose na opštu izloženost radiofrekvencijskim elektromagnetskim poljima kada se stavi u upotrebu*. ISS (2008).
- [34] Institut za standardizaciju Srbije. *SRPS EN 50401:2008 - Standard za proizvod za pokazivanje usaglašenosti stacionarne opreme za radio-prenos (od 110 MHz do 40 GHz) predviđene za upotrebu u bežičnim telekomunikacionim mrežama sa osnovnim ograničenjima ili referentnim nivoima koji se odnose na opštu izloženost radiofrekvencijskim elektromagnetskim poljima, kada se stavi u upotrebu*. ISS (2008).
- [35] Institut za standardizaciju Srbije. *SRPS EN 50420:2008- Osnovni standard za procenu izlaganja ljudi elektromagnetskim poljima iz samostalnog radio predajnika (od 30 MHz do 40 GHz)*. ISS (2008).
- [36] Institut za standardizaciju Srbije. *SRPS EN 50421:2008 - Standard za proizvod za pokazivanje usaglašenosti samostalnih radio predajnika sa referentnim nivoima ili osnovnim ograničenjima koji se odnose na opšte izlaganje ljudi radiofrekvencijskim elektromagnetskim poljima (od 30 MHz do 40 GHz)*. ISS (2008).
- [37] The Council of the European Union. *Council Recommendation 1999/519/EC of 12 July 1999 on the limitation of exposure of the general public to*

- electromagnetic fields (0 Hz to 300 GHz)*. Official Journal of the European Communities of 30 July 1999 (2009).
- [38] European Committee for Electrotechnical Standardization. *European standard EN 50413:2008/A1:2013. Basic standard on measurement and calculation procedures for human exposure to electric, magnetic and electromagnetic fields (0 Hz - 300 GHz)*. CENELEC (2008).
- [39] European Committee for Electrotechnical Standardization. *European standard EN 50383:2010/AC:2013. Basic standard for the calculation and measurement of electromagnetic field strength and SAR related to human exposure from radio base stations and fixed terminal stations for wireless telecommunication systems (110 MHz — 40 GHz)*. CENELEC (2013).
- [40] European Committee for Electrotechnical Standardization. *European standard EN 50492:2008/A1:2014. Basic standard for the in-situ measurement of electromagnetic field strength related to human exposure in the vicinity of base stations*. CENELEC (2014).
- [41] European Committee for Electrotechnical Standardization. *European standard EN 50400:2006/A1:2012. Basic standard to demonstrate the compliance of fixed equipment for radio transmission (110 MHz — 40 GHz) intended for use in wireless telecommunication networks with the basic restrictions or the reference levels related to general public exposure to radio frequency electromagnetic fields, when put into service*. CENELEC (2012).
- [42] European Committee for Electrotechnical Standardization. *European standard EN 50401:2006/A1:2011. Product standard to demonstrate the compliance of fixed equipment for radio transmission (110 MHz - 40 GHz) intended for use in wireless telecommunication networks with the basic restrictions or the reference levels related to general public exposure to radio frequency electromagnetic fields, when put into service*. CENELEC (2011).
- [43] Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency. *Australian Standard AS 2772.2: Radiofrequency radiation, principles and methods of measurements—300 kHz to 100 GHz*. ARPANSA (1988).
- [44] Institute of Electrical and Electronics Engineers. *IEEE recommended practice for the measurement and computations of radio frequency electromagnetic fields with respect to human exposure to such fields, 100 kHz-300 GHz*. IEEE Standard C95.3-2002 (2003).
- [45] International Electrotechnical Commission. *IEC 62232:2011 - Determination of RF field strength and SAR in the vicinity of radiocommunication base stations for the purpose of evaluating human exposure*. IEC (2011).
- [46] Larchèveque E, Dale C, Wong M-F, Wiart J. *Analysis of electric field averaging for in situ radiofrequency exposure assessment*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 54(4):1245-1250 (2005).
- [47] Mishra A.R. (ed.). *Advanced Cellular Network Planning and Optimisation: 2G/2.5G/3G Evolution to 4G*. JohnWiley & Sons, West Sussex, England (2007).
- [48] Organization for Standardization/International Electrotechnical Commission. *ISO/IEC 17025:2005 - General requirements for the competence of testing and calibration laboratories*. ISO/IEC (2005).
- [49] Olivier C, Martens L. *Optimal settings for narrow-band signal measurements used for exposure assessment around GSM base stations*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 54(1):311-317 (2005).

- [50] Olivier C, Martens L. *Optimal settings for frequency-selective measurements used for the exposure assessment around UMTS base stations*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 56(5):1901-1909 (2007).
- [51] Joseph W, Verloock L, Goeminne F, Vermeeren G, Martens L. *Assessment of general public exposure to LTE and RF sources present in an urban environment*. Bioelectromagnetics, 31(7):576-579 (2010).
- [52] Joseph W, Verloock L, Goeminne F, Vermeeren G, Martens L. *In situ LTE exposure of the general public: Characterization and extrapolation*. Bioelectromagnetics, 33(6):466-475 (2012).
- [53] Forbes A.B, Sousa J.A. *The GUM, Bayesian inference and the observation and measurement equations*. Measurement: Journal of the International Measurement Confederation, 44(8):1422-1435 (2011).
- [54] Imai H. *Expanding needs for metrological traceability and measurement uncertainty*. Measurement: Journal of the International Measurement Confederation, 46(8):2942-2945 (2013).
- [55] Joint Committee for Guides in Metrology. *JCGM 100:2008. Evaluation of measurement data – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*. JCGM (2008).
- [56] Joint Committee for Guides in Metrology. *JCGM 101:2008. Supplement 1 to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” - Propagation of distributions using a Monte Carlo method*. JCGM (2008).
- [57] Joint Committee for Guides in Metrology. *JCGM 102:2011. Supplement 2 to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” - Extension to any number of output quantities*. JCGM (2011).
- [58] Joint Committee for Guides in Metrology. *JCGM 104:2009. Evaluation of measurement data - An introduction to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” and related documents*. JCGM (2009).
- [59] Joint Committee for Guides in Metrology. *JCGM 106:2012. Evaluation of measurement data - The role of measurement uncertainty in conformity assessment*. JCGM (2012).
- [60] Joint Committee for Guides in Metrology. *JCGM 200:2012. International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM)*. JCGM (2012).
- [61] Basso G. *Uncertainty in the measurement of electromagnetic field with isotropic broadband sensor and selective E&H field analyzer*. NARDA Safety Solutions (2009).
- [62] Casella G.C, Berger R.L. *Statistical Inference*. Pacific Grove: Duxbury Press (2001).
- [63] Dietrich C.F. *Uncertainty, Calibration and Probability: The Statistics of Scientific and Industrial Measurements*. Adam Hilger Series on Measurement Science and Technology, Bristol, UK (1991).
- [64] Forbes A.B. *An MCMC algorithm based on GUM Supplement 1 for uncertainty evaluation*. Measurement: Journal of the International Measurement Confederation, 45(5):1188-1199 (2012).
- [65] Wübbeler G, Krystek M, Elster C. *Evaluation of measurement uncertainty and its numerical calculation by a Monte Carlo method*. Measurement Science and Technology, 19(8):Article number 084009 (2008).

- [66] Wang C.M, Iyer H.K. *A generalized confidence interval for a measurand in the presence of type-A and type-B uncertainties*. Measurement: Journal of the International Measurement Confederation, 39(9):856-863 (2006).
- [67] Willink R. *Coverage intervals and statistical coverage intervals*. Metrologia, 41(3):L5-L6 (2004).
- [68] Vilbaste M, Slavin G, Saks O, Pihl V, ILeito I. *Can coverage factor 2 be interpreted as an equivalent to 95% coverage level in uncertainty estimation? Two case studies*. Measurement: Journal of the International Measurement Confederation, 43(3):392-399 (2010).
- [69] Stratakis D.I, Miaoudakis A.I, Xenos T.D, Zacharopoulos V.G. *Overall uncertainty estimation in multiple narrow-band in situ electromagnetic field measurements*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 58(8):2767-2779 (2009).
- [70] Stratakis D, Miaoudakis A, Katsidis C, Zacharopoulos V, Xenos T. *On the uncertainty estimation of electromagnetic field measurements using field sensors: A general approach*. Radiation Protection Dosimetry, 133(4):240-247 (2009).
- [71] Kim B.C, Yun J-H, Park S-O. *Uncertainty estimation for evaluating human exposure levels to RF electromagnetic fields from cellular base stations*. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 54(2):246-253 (2012).
- [72] Bertocco M, Sona A, Zanchetta P. *An improved method for the evaluation of uncertainty of channel power measurement with a spectrum analyzer*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 56(4):1165-1170 (2007).
- [73] Kühn S, Kuster N. *Evaluation of measurement techniques to show compliance with RF safety limits in heterogeneous field distributions*. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 52(4):820-828 (2010).
- [74] Prieto J, Alonso A.A, De La Rosa R, Carrera A. *Adaptive framework for uncertainty analysis in electromagnetic field measurements*. Radiation Protection Dosimetry, 164(3):422-434 (2015).
- [75] Vulević B, Osmokrović P. *Evaluation of uncertainty in the measurement of environmental electromagnetic fields*. Radiation Protection Dosimetry, 141(2):173-177 (2010).
- [76] Rohde&Schwarz. R&S TS-EMF EMF Measurement System - technical data 1158.9295.04, R&S (2009).
- [77] Bertoni H. L. *Radio Propagation for Modern Wireless Systems*. Prentice Hall PTR (2000).
- [78] Cicchetti R, Faraone A. *Estimation of the peak power density in the vicinity of cellular and radio base station antennas*. IEEE Transactions Electromagnetic Compatibility, 46(2):275-290 (2004).
- [79] Altman Z, Begasse B, Dale C, Karwowski A, Wiart J, Wong M-F, Gattoufi L. *Efficient models for base station antennas for human exposure assessment*. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 44(2):588-592 (2002).
- [80] Blanch S, Romeu J, Cardama A. *Near field in the vicinity of wireless base-station antennas: an exposure compliance approach*. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 50(5):685-692 (2002).
- [81] Gosselin M.C, Christ A, Kuhn S, Kuster N. *Dependence of the occupational exposure to mobile phone base stations on the properties of the antenna and the human body*. IEEE Transactions Electromagnetic Compatibility, 51(2):227-235 (2009).



- [82] Bernardi P, Caragnaro M, Pisa S, Piuizzi E. *Human exposure to radio base-station antennas in urban environment*. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 48(1):1996–2002 (2000).
- [83] Faraone A, Yew-Siow Tay R, Joyner K.H, Balzano Q. *Estimation of the average power density in the vicinity of cellular base-station collinear array antennas*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 49(3):984–996 (2000).
- [84] Adane Y, Gati A, Wong M-F, Dale C, Wiart J, Hanna V.F. *Optimal modeling of real radio base station antennas for human exposure assessment using spherical-mode decomposition*. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 1:215–218 (2002).
- [85] Catarinucci L, Palazzari P, Tarricone L. *Human exposure to the near field of radiobase antennas - a fullwave solution using parallel FDTD*. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 51(3):935–940 (2003).
- [86] Joseph W, Martens L. *Comparison of safety distances based on the electromagnetic field and based on the SAR for occupational exposure of a 900 MHz basestation antenna*. IEEE Transactions Electromagnetic Compatibility, 47(4):977–985 (2005).
- [87] Meyer F.J.C, Davidson D.B, Jakobus U, Stuchly M.A. *Human exposure assessment in the near field of GSM base-station antennas using a hybrid finite element method of moments technique*. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 50(2):224-233 (2003).
- [88] Vizquez I, Olias E, Barrado A, Pleite J. *Analysis of long time series of environmental electromagnetic field*. Electronics Letters, 39(1):125-127 (2003).
- [89] Neskovic N, Koprivica M, Neskovic A, Paunovic G. *Improving the efficiency of measurement procedures for assessing human exposure in the vicinity of mobile phone (GSM/DCS/UMTS) base stations*. Radiation Protection Dosimetry, 149(3):238-244 (2012).
- [90] World Health Organization. *Research Agenda on Radio Frequency Fields*. WHO, Geneva (2010).
- [91] Knafel U, Lehmann H, Riederer M. *Electromagnetic Field Measurements Using Personal Exposimeters*. Bioelectromagnetics, 29(2):160-162 (2008).
- [92] Bolte J.F, Van der Zande G, Kamer J. *Calibration and uncertainties in personal exposure measurements of radiofrequency electromagnetic fields*. Bioelectromagnetics, 32(8):652-663 (2011).
- [93] Neubauer G, Cecil S, Giczi W, Petric B, Preiner P, Fröhlich J, Rösli M. *The Association between exposure determined by radio frequency personal exposimeters and human exposure: A simulation study*. Bioelectromagnetics, 31(7): 535-545 (2010).
- [94] Thuróczy G, Molnár F, Jánossy G, Nagy N, Kubinyi G, Bakos J, Szabó J. *Personal RF exposimetry in urban area*. Annals of Telecommunications, 63(1-2):87-96 (2008).
- [95] Tesanovic M, Conil E, De Domenico A, Agüero R, Freudenstein F, Correia L, Bories S, Martens L, Wiedemann P, Wiart J. *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).
- [96] Diez L, Anwar S, Rodriguez de Lope L, Le Hennaff M, Toutain Y, Agüero R. *Design and integration of a low-complexity dosimeter into the Smart City for*

- EMF assessment*. European Conference on Networks and Communications - EUCNC 2014, Bologna (2014).
- [97] Recommendation ITU-R P.1406. *Propagation effects relating to terrestrial land mobile service in the VHF and UHF bands*. ITU-R (1999).
- [98] Recommendation ITU-R P.1145. *Propagation data for the terrestrial land mobile service in the VHF and UHF bands*. ITU-R (1995).
- [99] Tenoux T, Lostanlen Y. *Modeling and analysis of the radio wave depolarization in urban environments*. Physical Communication, 5(4):338-351 (2012).
- [100] Vilar E. *Depolarisation and field transmittances in indoor communications*. Electronics Letters, 27(9):732-733 (1991).
- [101] Kürner T, Meier A. *Prediction of Outdoor and Outdoor-to-Indoor Coverage in Urban Areas at 1.8 GHz*. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 20(3):496-506 (2002).
- [102] Koprivica M, Nešković A, Nešković N. *Conversion from mono-axial to isotropic measurements for assessing human exposure to electromagnetic fields of GSM/DCS/UMTS base stations*. Annals of Telecommunications, 70(9-10):407-414 (2015).
- [103] Anwar M.S, Toutain Y, Bories S, Dassonville D, Fernandez Y, Sanchez A. *Wearable wideband exposimeter design for electromagnetic field exposure measurements*, European Microwave week - EUMC 2014, Rome, Italy (2014).
- [104] Koprivica M, Petrić M, Popović M, Milinković J, Nikšić S, Nešković A. *Long-term variability of electromagnetic field strength for GSM 900MHz downlink band in Belgrade urban area*. 22. telekomunikacioni forum - TELFOR 2014, Beograd, 9-12 (2014).
- [105] Freudenstein F, Wiedemann P.M, Varsier N. *Exposure knowledge and risk perception of RF EMF*. Frontiers in Public Health, 2(289):1-8 (2015).
- [106] Freudenstein F, Wiedemann P.M, Pejanovic-Djurisic M, Koprivica M, Neskovic A. *Intuitive exposure and risk perception of RF EMF: Case studies Serbia and Montenegro*. 22. telekomunikacioni forum - TELFOR 2014, Beograd, 1-4 (2014).
- [107] Loskot P, Hassanien M.A.M, Farjady F, Ruffini M, Payne D. *Long-term drivers of broadband traffic in next-generation networks*. Annals of Telecommunications, 70(1-2):1-10 (2015).
- [108] Bembe M, Kim J, Mhlanga M, Rho J.J, Han Y. *Uplink spectrum resource allocation in heterogeneous networks (small cell/macroc cell)*. Annals of Telecommunications, 70(7-8):311-319 (2014).
- [109] Lin J.C. *Microwave exposure and safety associated with personal wireless telecommunication base stations*. IEEE Microwave Magazine, 3(3):28–32 (2002).
- [110] Nicolas E, Lautru D, Jacquin F, Wong M.F, Wiart J. *Specific absorption rate assessments based on a selective isotropic measuring system for electromagnetic fields*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 50(2):397–401 (2001).
- [111] Las-Heras F, Pino M.R., Loredó S, Alvarez Y, Sarkar T.K. *Evaluating near-field radiation patterns of commercial antennas*. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 54(8):2198–2207 (2006).
- [112] Habachi A.E, Conil E, Hadjem A, Vazquez E, Wong M.F, Gati A, Fleury G, i Wiart J. *Statistical analysis of whole-body absorption depending on anatomical human characteristics at a frequency of 2.1 GHz*. Physics in Medicine and Biology, 55(7):1875–1887 (2010).

- [113] Miclaus S, Bechet P, Iftode C. *The application of a channel-individualized method for assessing long-term, realistic exposure to radiofrequency radiation emitted by mobile communication base station antennas*. Measurement: Journal of the International Measurement Confederation, 46(3):1355-1362 (2013).
- [114] Petersen R.C. *Electromagnetic radiation from selected telecommunications systems*. Proceedings of the IEEE, 68(1):21–24 (1980).
- [115] Sahalos J, Vafiadis E, Samaras T, Babas D, Koukourlis S. *EM field measurements in the vicinity of an antenna park for radiation hazard purposes*. IEEE Transactions on Broadcasting, 41(4):130–135 (1995).
- [116] Mcicr K. *Broadband calibration of E-field probes in Lossy Media*. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 44(10):1954–1962 (1996).
- [117] Sanchez M.G, Cuinas I, Alejos A.V. *Electromagnetic field level temporal variation in urban areas*. Electronics Letters, 41(5):233–234 (2005).
- [118] Miclaus S, Bechet P, Gheorghievici M. *Long-term exposure to mobile communication radiation: An analysis of time-variability of electric field level in GSM900 downlink channels*. Radiation Protection Dosimetry, 154(2):164-173 (2013).
- [119] Bechet P, Miclaus S. *An improved procedure to accurately assess the variability of the exposure to electromagnetic radiation emitted by GSM base station antennas*. Measurement Science and Technology, 24(1):1–9 (2013).
- [120] Bornkessel C, Schubert M, Wuschek M, Schmidt P. *Determination of the general public exposure around GSM and UMTS base stations*. Radiation Protection Dosimetry, 124(1):40–47 (2007).
- [121] Troisi F, Boumis M, Grazioso P. *The Italian national electromagnetic field monitoring network*. Annals of Telecommunications, 63(1–2):97–108 (2008).
- [122] Gotsis A, Papanikolaou N, Komnakos D, Yalofas A, Constantinou P. *Non-ionizing electromagnetic radiation monitoring in Greece*. Annals of Telecommunications, 63(1–2):109–123 (2008).
- [123] Christopoulou M, Karabetsos E. *In situ measurements of radiofrequency exposure levels in Greece from 2008 to 2013: A multi-parametric annual analysis*. Bioelectromagnetics, 36(4):325–329 (2015).
- [124] Wu T, Shao Q, Yang L, Qi D, Lin J, Lin X, Yu Z. *A large-scale measurement of electromagnetic fields near GSM base stations in Guangxi, China for risk communication*. Radiation Protection Dosimetry, 155(1):25–31 (2013).
- [125] Kim B.C, Park S.O. *Evaluation of RF electromagnetic field exposure levels from cellular base stations in Korea*. Bioelectromagnetics, 31(6):495–498 (2010).
- [126] Kim B.C, Kim W.K, Lee G.T, Choi H.D, Kim N, Pack J.K. *Evaluation of radiofrequency exposure levels from multiple wireless installations in population dense areas in Korea*. Bioelectromagnetics, 35(8):603–606 (2014).
- [127] Deatanyah P, Amoako J.K, Fletcher J.J, Asiedu G.O, Adjei D.N, Dwapanyin G.O, Amoatey E.A. *Assessment of radiofrequency radiation within the vicinity of some GSM base stations in Ghana*. Radiation Protection Dosimetry, 151(2):218–223 (2012).
- [128] Calvente I, Fernández M.F, Pérez-Lobato R, Dávila-Arias C, Ocón O, Ramos R, Ríos-Arrabal S, Villalba-Moreno J, Olea N, Núñez M.I. *Outdoor characterization of radio frequency electromagnetic fields in a Spanish birth cohort*. Environmental Research, 138:136–143 (2015).

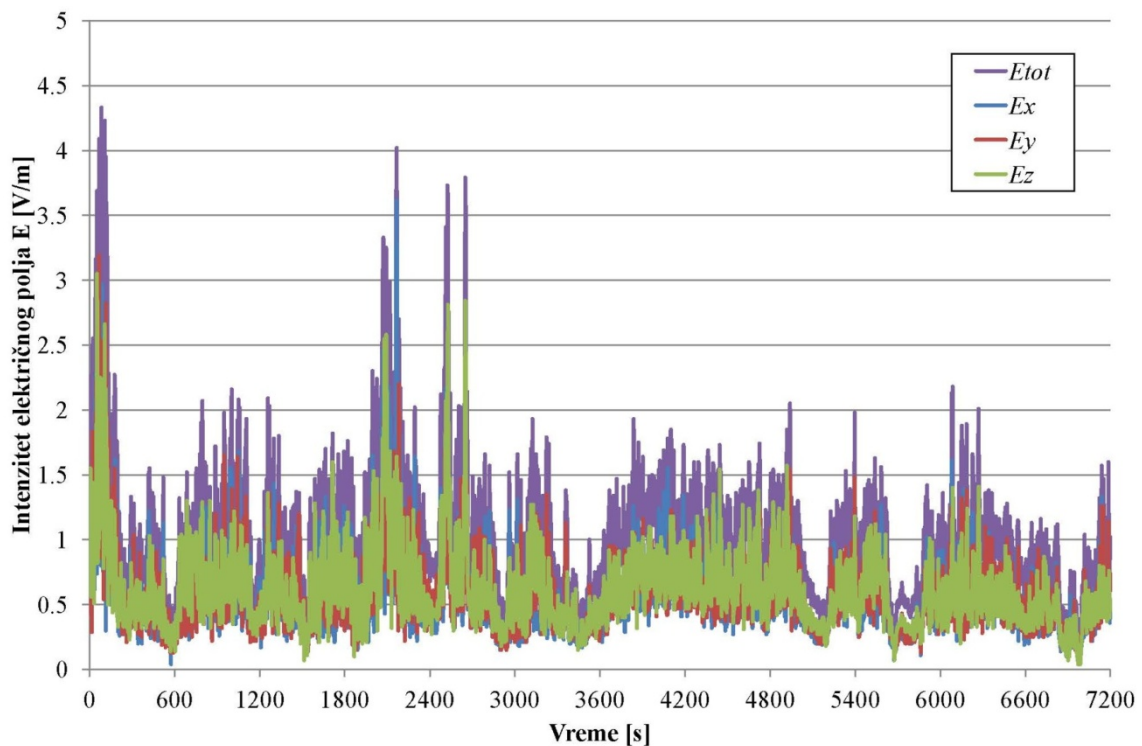
- [129] Karadağ T, Yüceer M, Abbasov T. *A large-scale measurement, analysis and modelling of electromagnetic radiation levels in the vicinity of GSM/UMTS base stations in an urban area*. Radiation Protection Dosimetry, 168(1):134–147 (2016).
- [130] Henderson S.I, Bangay M. J. *Survey of RF exposure levels from mobile telephone base stations in Australia*. Bioelectromagnetics, 27(1):73–76 (2006).
- [131] Joyner K.H, Van Wyk M.J, Rowley J.T. *National surveys of radiofrequency field strengths from radio base stations in Africa*. Radiation Protection Dosimetry, 158(3):251–262 (2014).
- [132] Urbinello D, Joseph W, Huss A, Verloockc L, Beekhuizen J, Vermeulend R, Martens L, Rössli M. *Radio-frequency electromagnetic field (RF-EMF) exposure levels in different European outdoor urban environments in comparison with regulatory limits*. Environmental International, 68:49-54 (2014).
- [133] Alanko T, Hietanen M, Nandelstadh P.V. *Occupational exposure to RF fields from base station antennas on rooftops*. Annals of Telecommunications, 63(1–2):125–132 (2008).
- [134] Keow M.A, Radiman S. *Assessment of radiofrequency/microwave radiation emitted by the antennas of rooftop-mounted mobile phone base stations*. Radiation Protection Dosimetry, 121(2):122–127 (2005).
- [135] Nayyeri V, Hashemi S.M, Borna M, Jalilian H.R, Soleimani M. *Assessment of RF radiation levels in the vicinity of 60 GSM mobile phone base stations in Iran*. Radiation Protection Dosimetry, 155(2):241-244 (2013).
- [136] Nitu V. *Electromagnetic field exposure from GSM and UMTS indoor base stations*. Applied Mechanics and Materials, 332:98-103 (2013).
- [137] Aerts S, Plets D, Verloock L, Martens L, Joseph W. *Assessment and comparison of total RF-EMF exposure in femtocell and macrocell base station scenarios*. Radiation Protection Dosimetry, 162(3):236–243 (2014).
- [138] Koprivica M, Neskovic N, Neskovic A, Paunovic G. *Statistical analysis of electromagnetic radiation measurements in the vicinity of GSM/UMTS base station antenna masts*. Radiation Protection Dosimetry, 158(3):263-275 (2014).
- [139] Koprivica M, Slavkovic V, Neskovic N, Neskovic A. *Statistical analysis of electromagnetic radiation measurements in the vicinity of GSM/UMTS base station installed on buildings in Serbia*. Radiation Protection Dosimetry, 168(4):489-502 (2016).
- [140] Koprivica M, Petrić M, Neskovic N, Neskovic A. *Statistical Analysis of Electromagnetic Radiation Measurements in the Vicinity of Indoor Microcell GSM/UMTS Base Stations in Serbia*. Bioelectromagnetics, 37(1):69–76 (2016).
- [141] Plets D, Joseph W, Vanhecke K, Vermeeren G, Wiart J, Aerts S, Varsier N, Martens L. *Joint minimization of uplink and downlink whole-body exposure dose in indoor wireless networks*. BioMed Research International, art. no. 943415, 2015:1-9 (2015).
- [142] Gati A, Conil E, Wong M-F, Wiart J. *Duality between uplink local and downlink whole-body exposures in operating networks*. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 52(4):829-836 (2010).
- [143] Plets D, Joseph W, Aerts S, Vanhecke K, Vermeeren G, Martens L. *Prediction and comparison of downlink electric-field and uplink localised SAR values for realistic indoor wireless planning*. Radiation Protection Dosimetry, 162(4):487-498 (2014).

- [144] Aerts S, Plets D, Thielens A, Martens L, Joseph W. *Impact of a small cell on the RF-EMF exposure in a train*. International Journal of Environmental Research and Public Health, 12(3):2639-2652 (2015).
- [145] Plets D, Joseph W, Aerts S, Vermeeren, G, Varsier N, Wiart J, Martens L. *Assessment of contribution of other users to own total whole-body RF absorption in train environment*. Bioelectromagnetics, 36(8):597–602 (2015).
- [146] Popović M, Koprivica M, Nikšić S, Milinković J, Nešković A. *Methodology for the comparison of cellular technologies and services with respect to EMF exposure*. 22. telekomunikacioni forum - TELFOR 2014, Beograd, 13-16 (2014).
- [147] Varsier N, Huang Y, Krayni A, Hadjem A, Wiart J, Vermeeren G, Plets D, Joseph W, Martens L, Oliveira C, Sebastião D, Ferreira M, Cardoso F, Correia L, Koprivica M, Popović M, Kocan E, Pejanovic-Djurisic M. *Deliverable D2.8: Global wireless exposure metric definition, EU FP7 Project LEXNET (Low-EMF Exposure Future Networks) (GA N°318273)*, European Commission Ref. Ares(2015)5347928-25/11/2015 (2015).
- [148] Varsier N, Plets D, Corre Y, Vermeeren G, Joseph W, Aerts S, Martens L, Wiart J. *A novel method to assess the human population exposure induced by a wireless telecommunication network*. Bioelectromagnetics, 36(6):451-463 (2015).
- [149] “[http://chemwiki.ucdavis.edu/Analytical\\_Chemistry/Quantifying\\_Nature/Significant\\_Digits/Propagation\\_of\\_Error#Derivation\\_of\\_Exact\\_Formula](http://chemwiki.ucdavis.edu/Analytical_Chemistry/Quantifying_Nature/Significant_Digits/Propagation_of_Error#Derivation_of_Exact_Formula).” (pristupljeno poslednji put 24. aprila, 2016).
- [150] You L, Qian J, Wu X, Sun X, Su M, Di B, Du Y, Mao B. *Propagation of error in ocular pharmacokinetic parameters estimate of azithromycin in rabbits*. Journal of Pharmaceutical Sciences, 102(7):2371-2379 (2013).

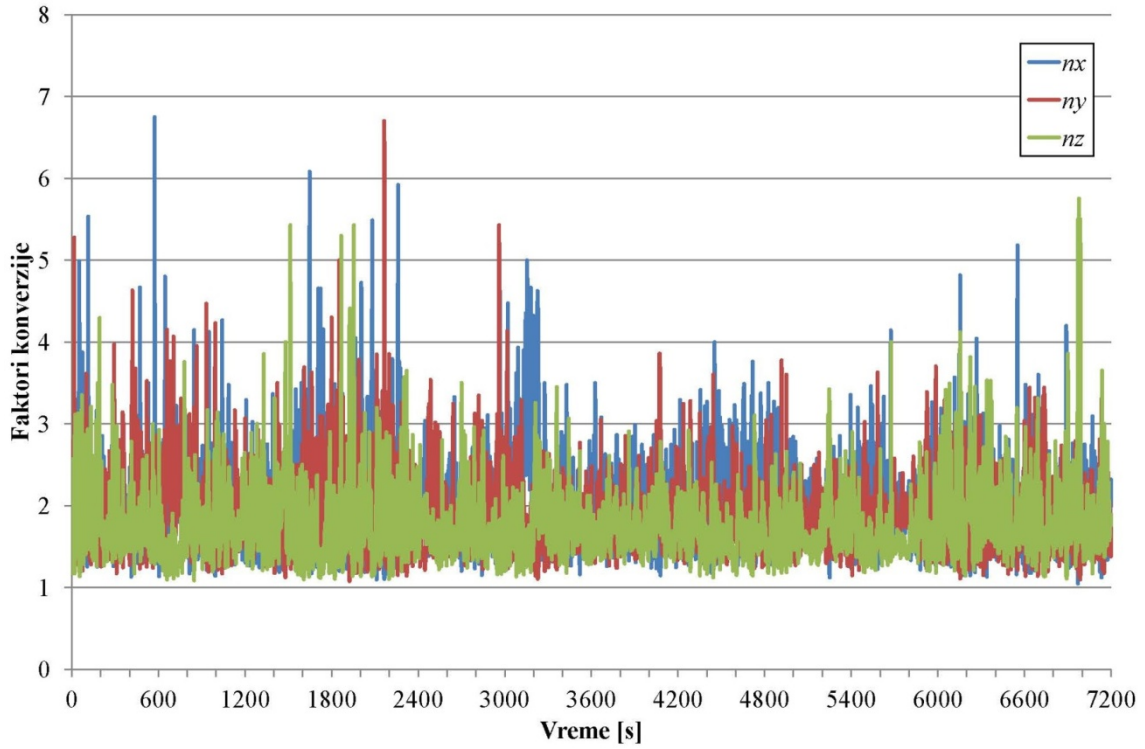
## PRILOG A

### Konverzija rezultata merenja intenziteta jedne prostorne komponente električnog polja u intenzitet koji se dobija izotropnim merenjima - Rezultati merenja za scenarije 2 do 7

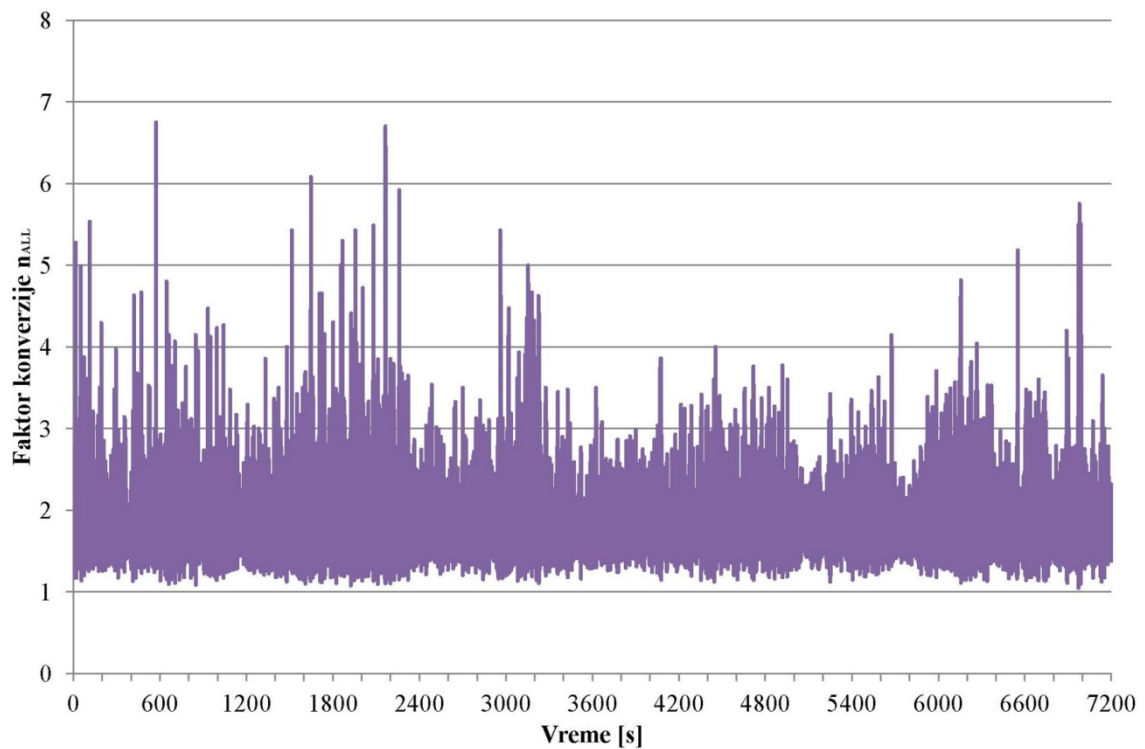
U ovom prilogu dati su rezultati merenja za scenarije 2 do 7 u okviru dela disertacije koji se odnosi na konverziju rezultata merenja intenziteta jedne prostorne komponente električnog polja u intenzitet koji se dobija izotropnim merenjima. Rezultati merenja intenziteta električnog polja za sve tri prostorne komponente  $E_x$ ,  $E_y$  i  $E_z$ , kao i ukupni intenzitet električnog polja  $E_{tot}$ , prikazani su na slikama A.1, A.5, A.9, A.13, A.17 i A.21, za scenarije 2 do 7, respektivno. Vremenska zavisnost pripadajućih faktora konverzije  $n_x$ ,  $n_y$  i  $n_z$  prikazana je na slikama A.2, A.6, A.10, A.14, A.18 i A.22, dok je vremenska zavisnost pripadajućih faktora konverzije  $n_{ALL}$  prikazana na slikama A.3, A.7, A.11, A.15, A.19 i A.23, takođe za scenarije 2 do 7, respektivno. Funkcija gustine verovatnoće faktora konverzije  $n_{ALL}$  za scenarije 2 do 7, prikazana je na slikama A.4, A.8, A.12, A.16, A.20 i A.24, respektivno.



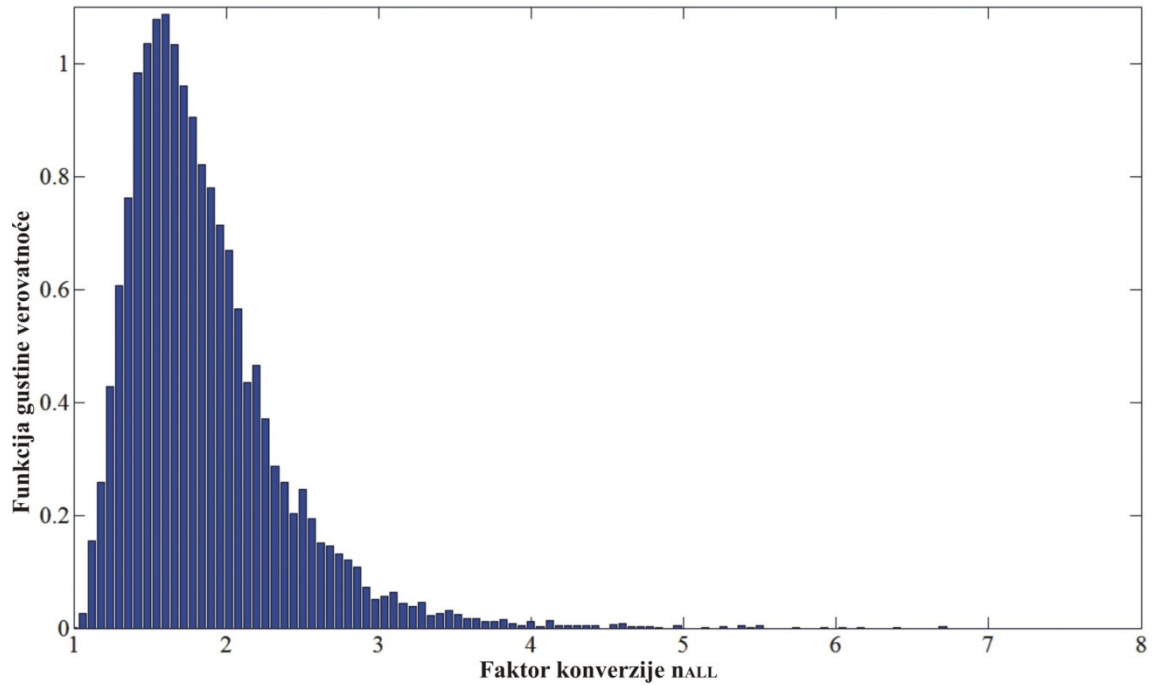
**Slika A.1** Intenzitet električnog polja u zavisnosti od vremena za scenario 2



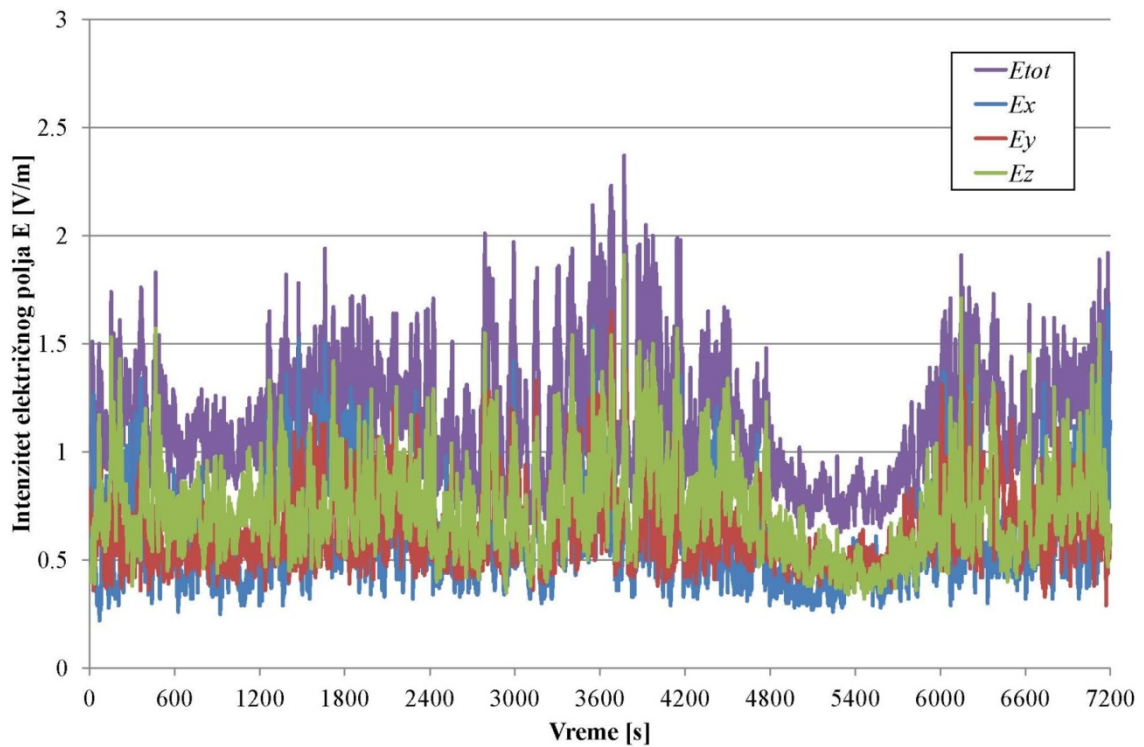
*Slika A.2 Faktori konverzije  $n_x$ ,  $n_y$  i  $n_z$  u zavisnosti od vremena za scenario 2*



*Slika A.3 Faktor konverzije  $n_{ALL}$  u zavisnosti od vremena za scenario 2*

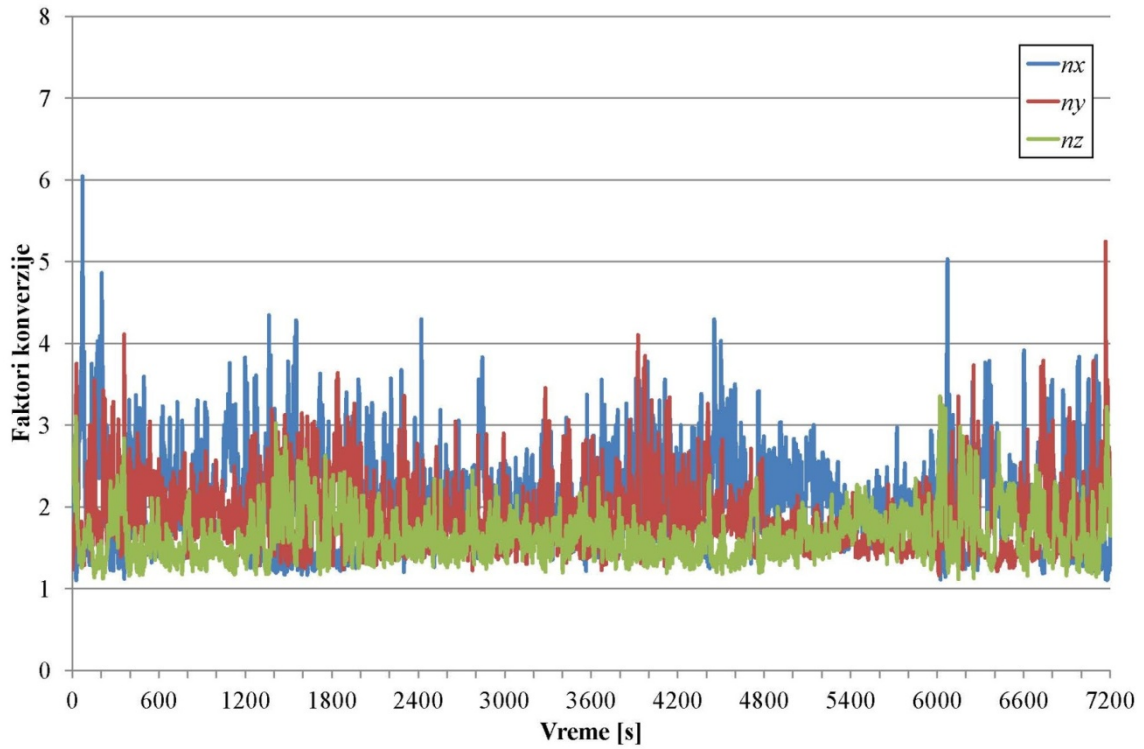


Slika A.4 Funkcija gustine verovatnoće faktora konverzije  $n_{ALL}$  za scenario 2

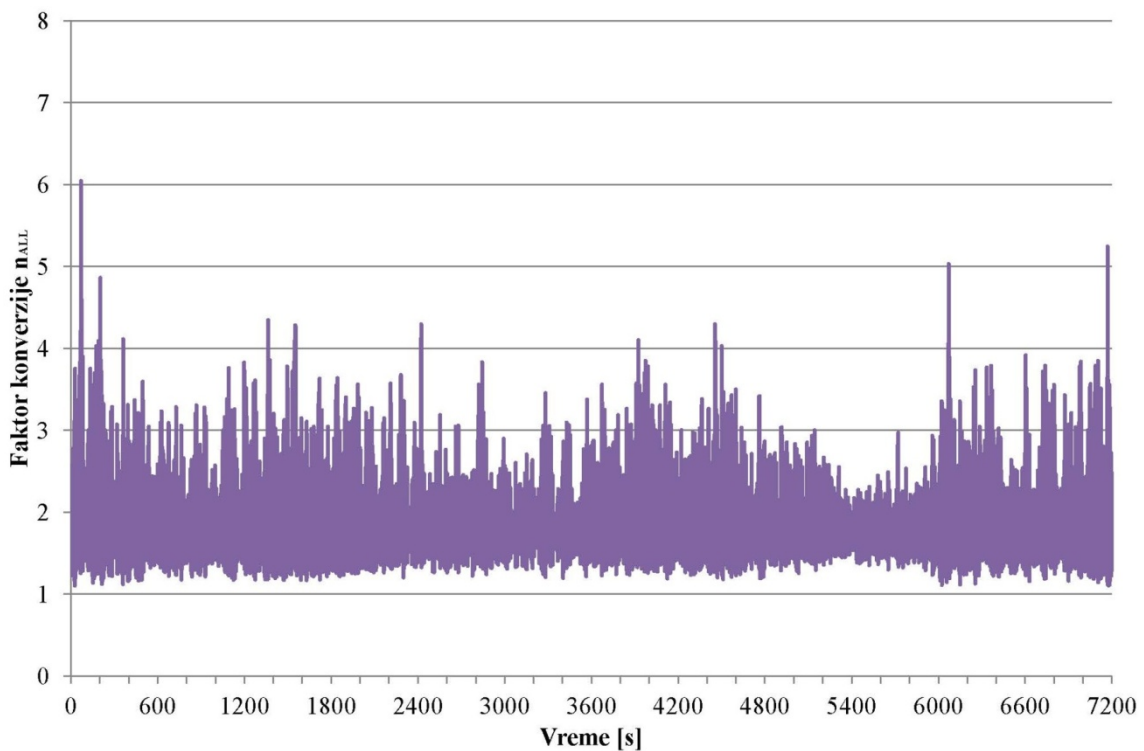


Slika A.5 Intenzitet električnog polja u zavisnosti od vremena za scenario 3

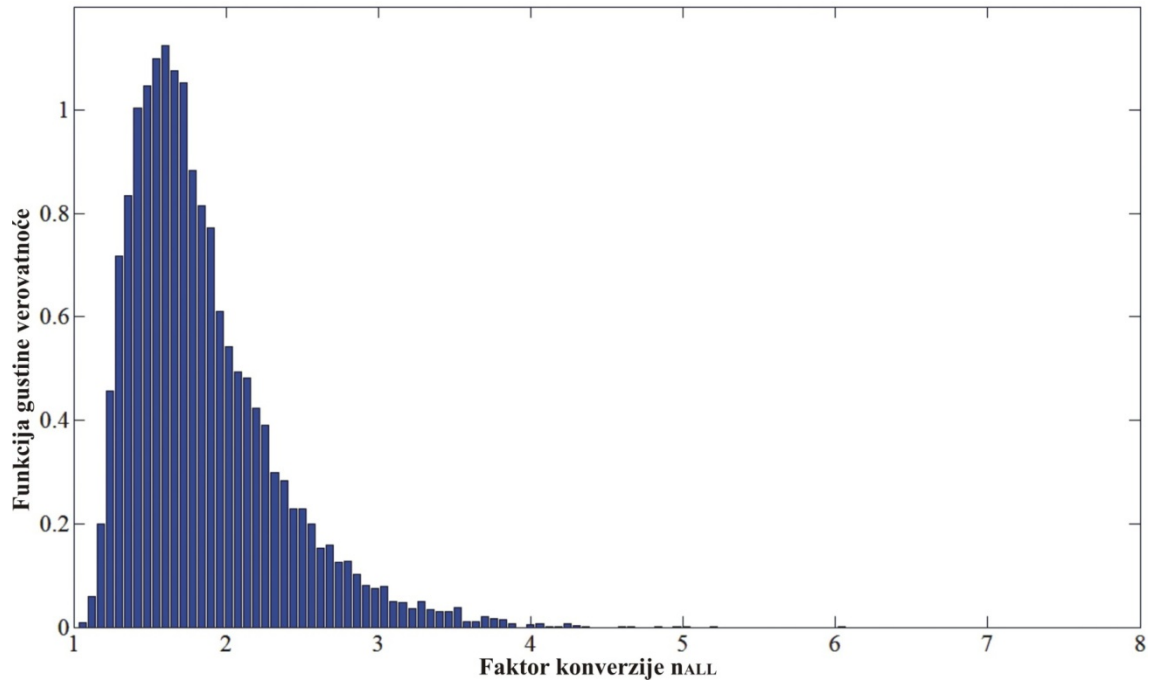




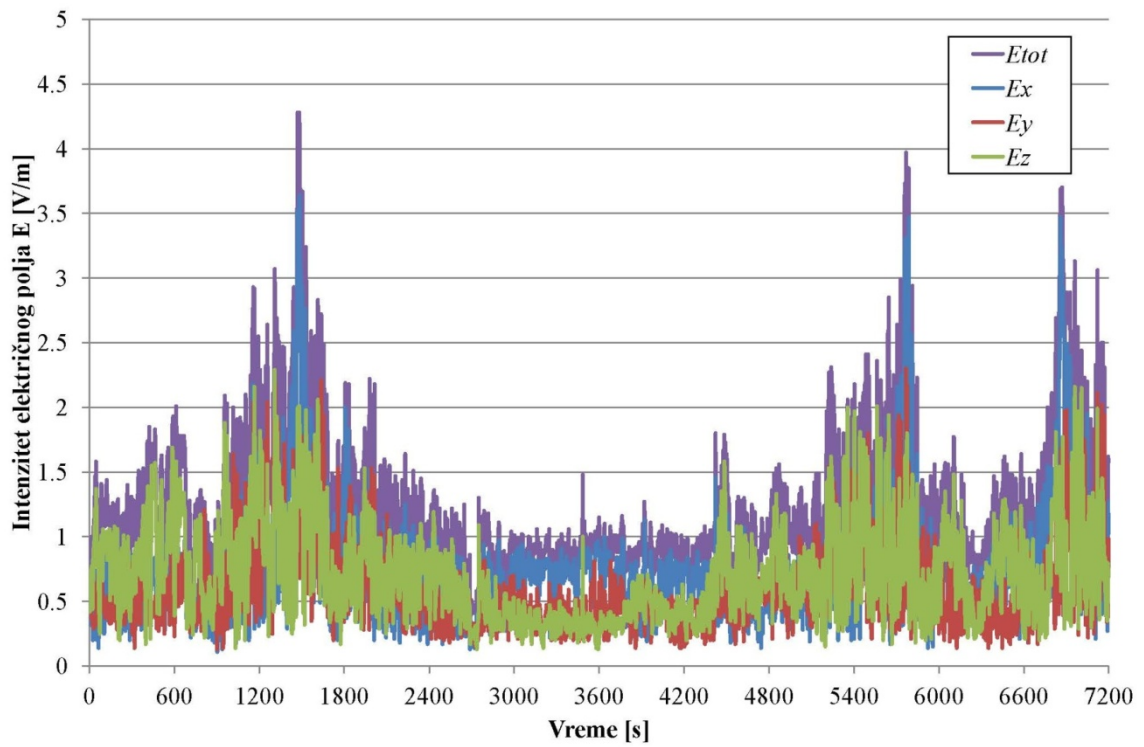
*Slika A.6 Faktori konverzije  $n_x$ ,  $n_y$  i  $n_z$  u zavisnosti od vremena za scenario 3*



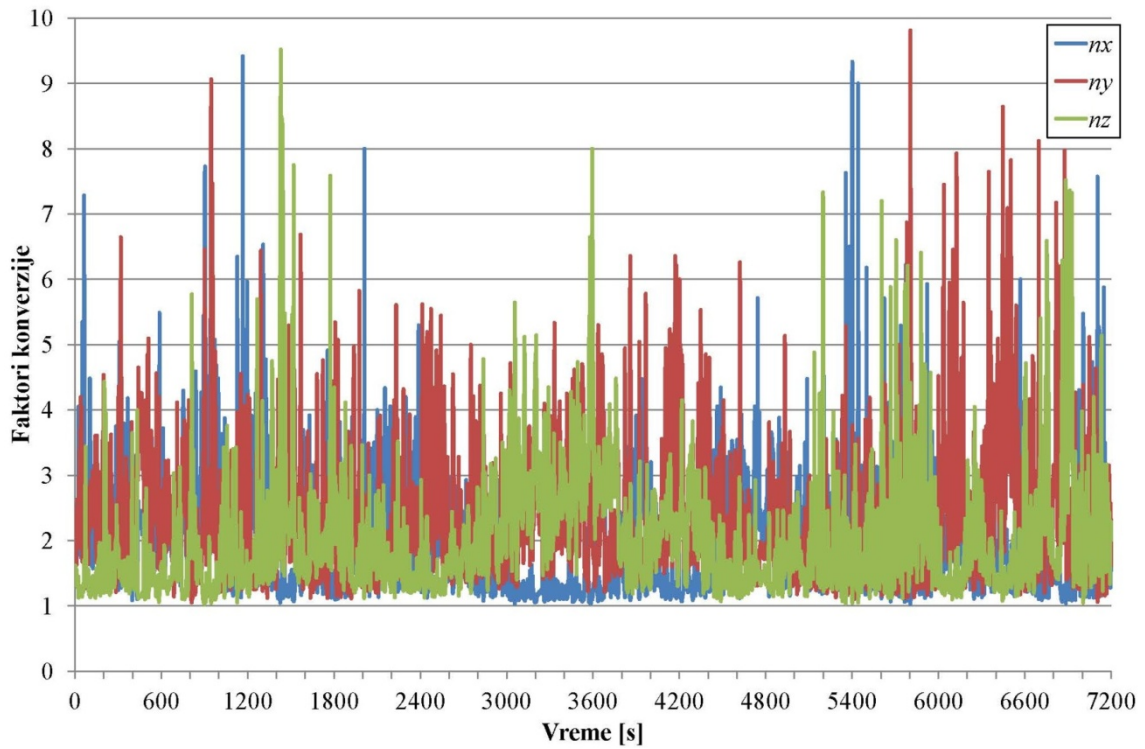
*Slika A.7 Faktor konverzije  $n_{ALL}$  u zavisnosti od vremena za scenario 3*



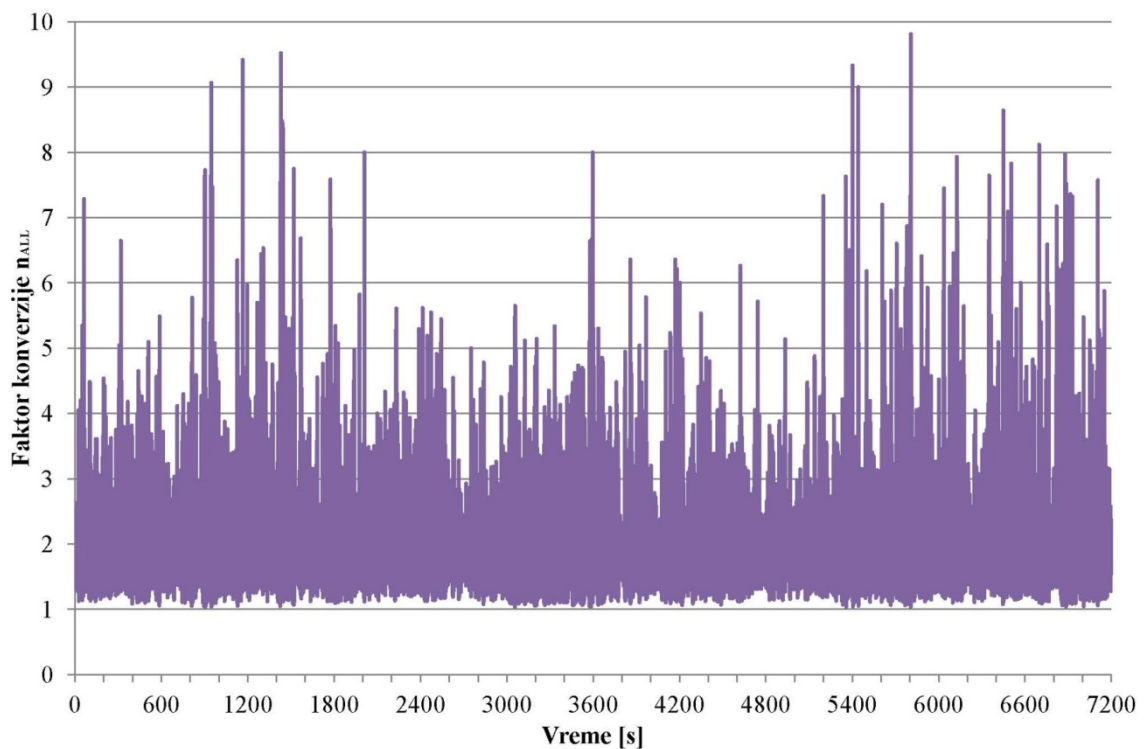
Slika A.8 Funkcija gustine verovatnoće faktora konverzije  $n_{ALL}$  za scenario 3



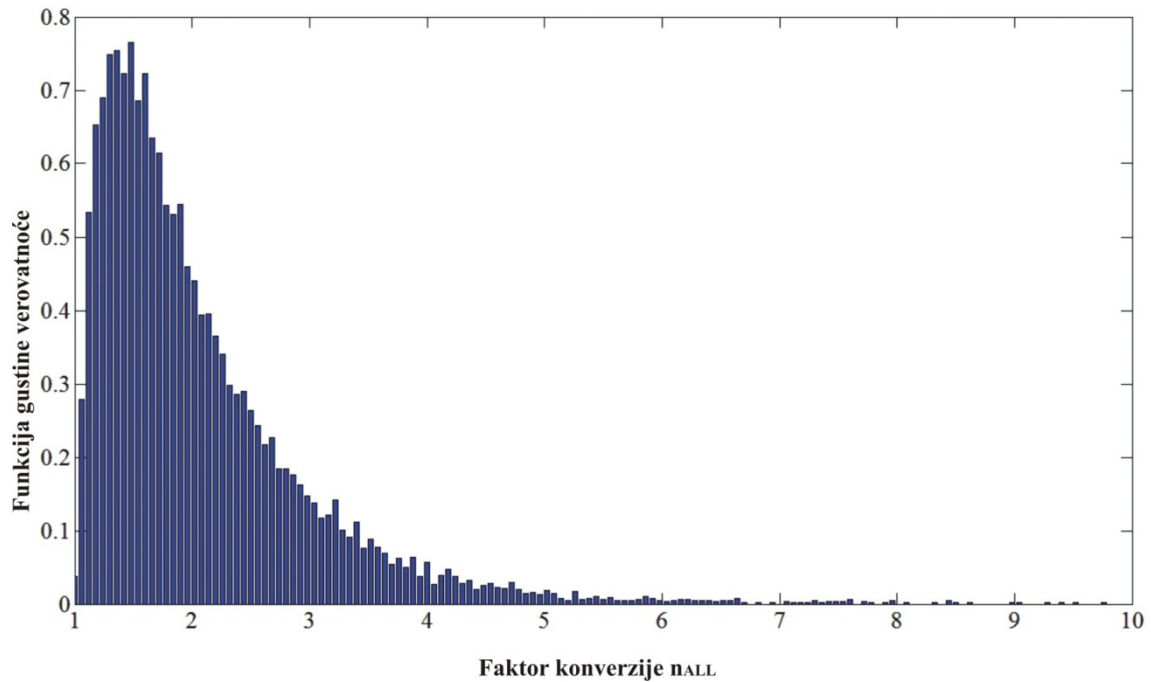
Slika A.9 Intenzitet električnog polja u zavisnosti od vremena za scenario 4



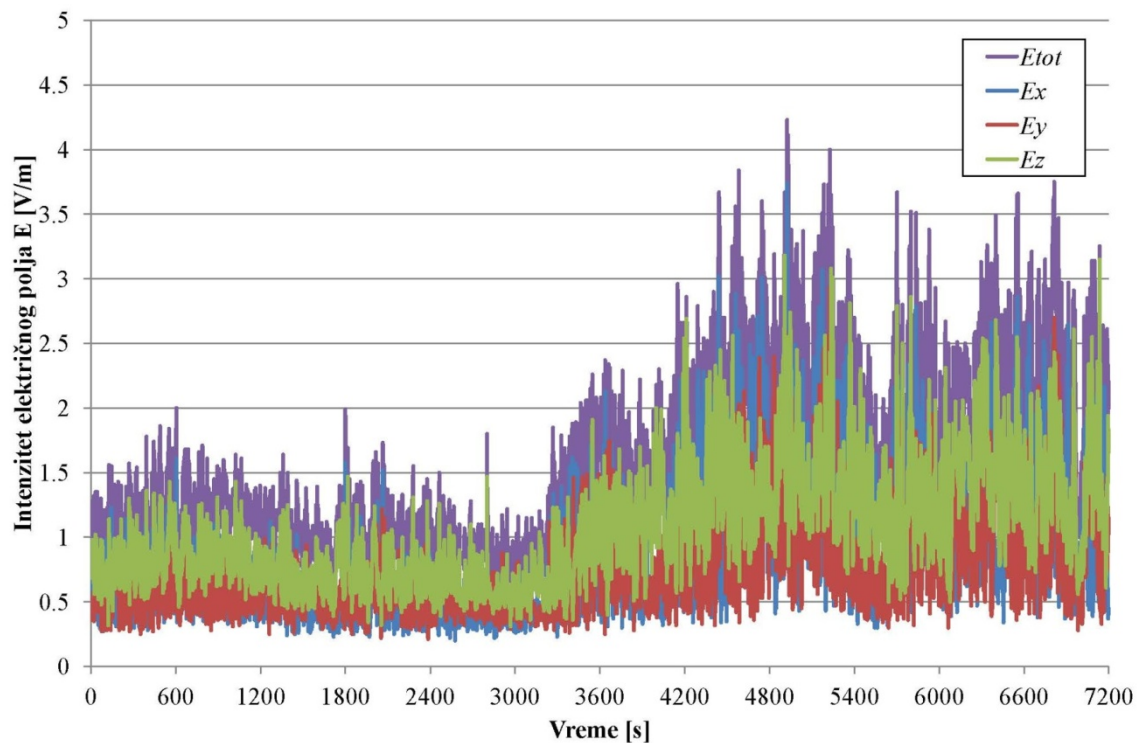
Slika A.10 Faktori konverzije  $n_x$ ,  $n_y$  i  $n_z$  u zavisnosti od vremena za scenario 4



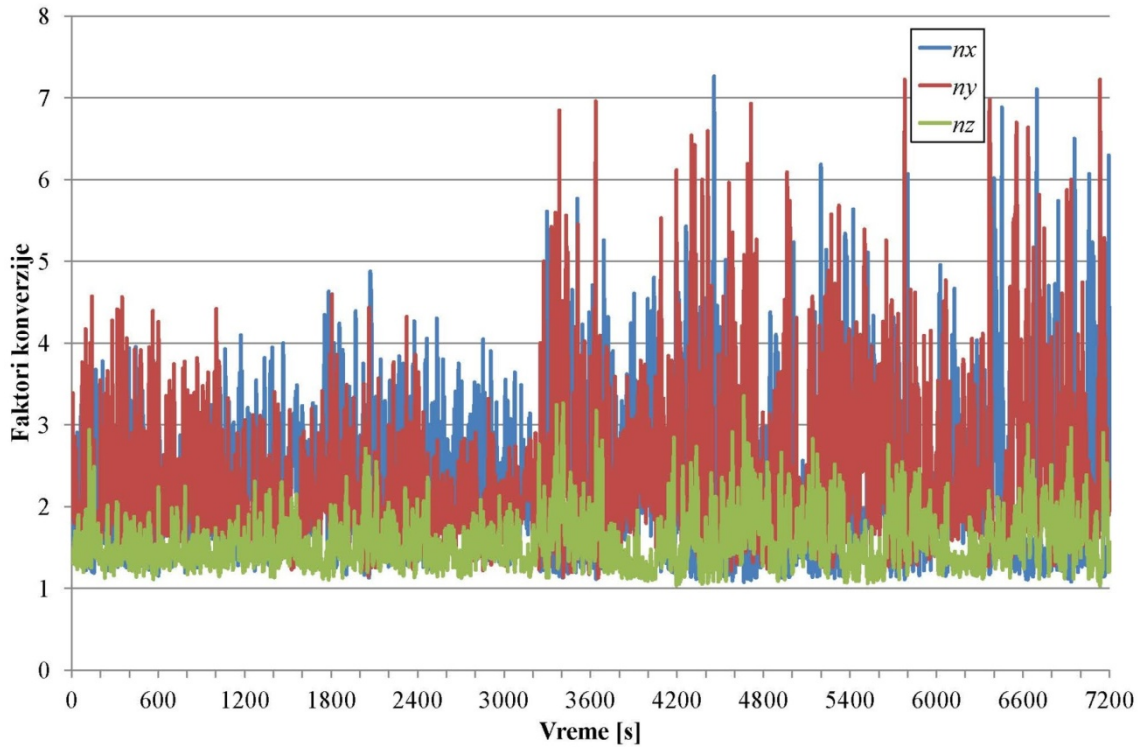
Slika A.11 Faktor konverzije  $n_{ALL}$  u zavisnosti od vremena za scenario 4



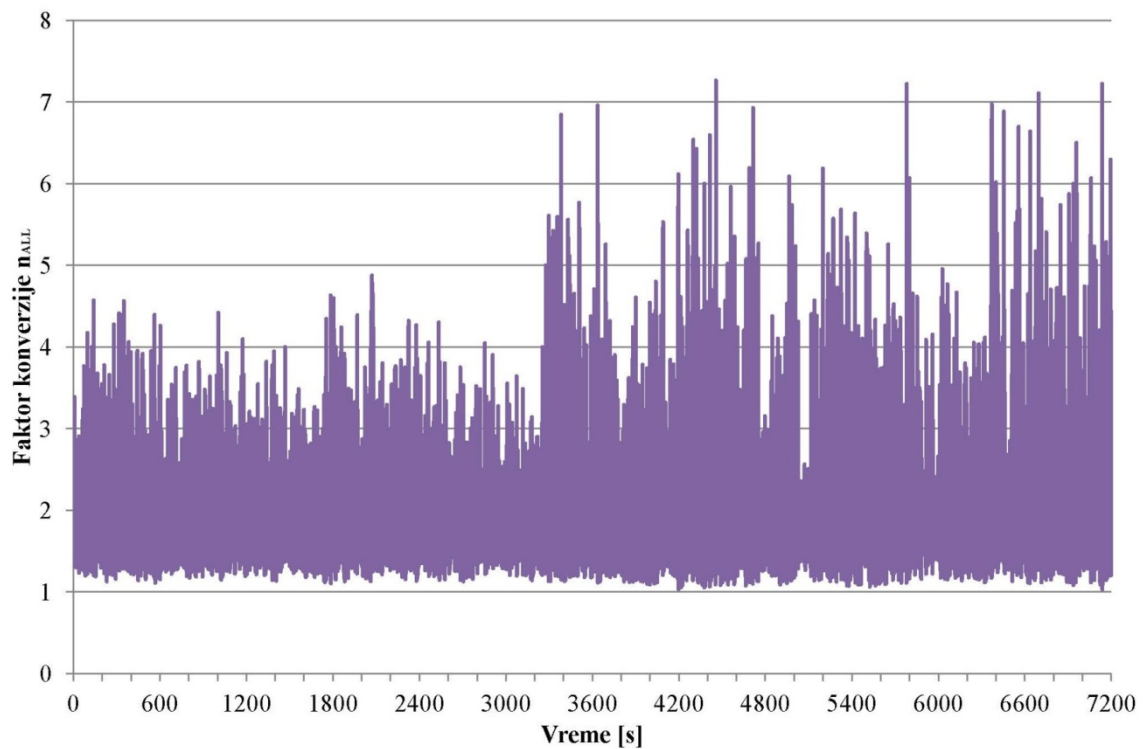
*Slika A.12* Funkcija gustine verovatnoće faktora konverzije  $n_{ALL}$  za scenario 4



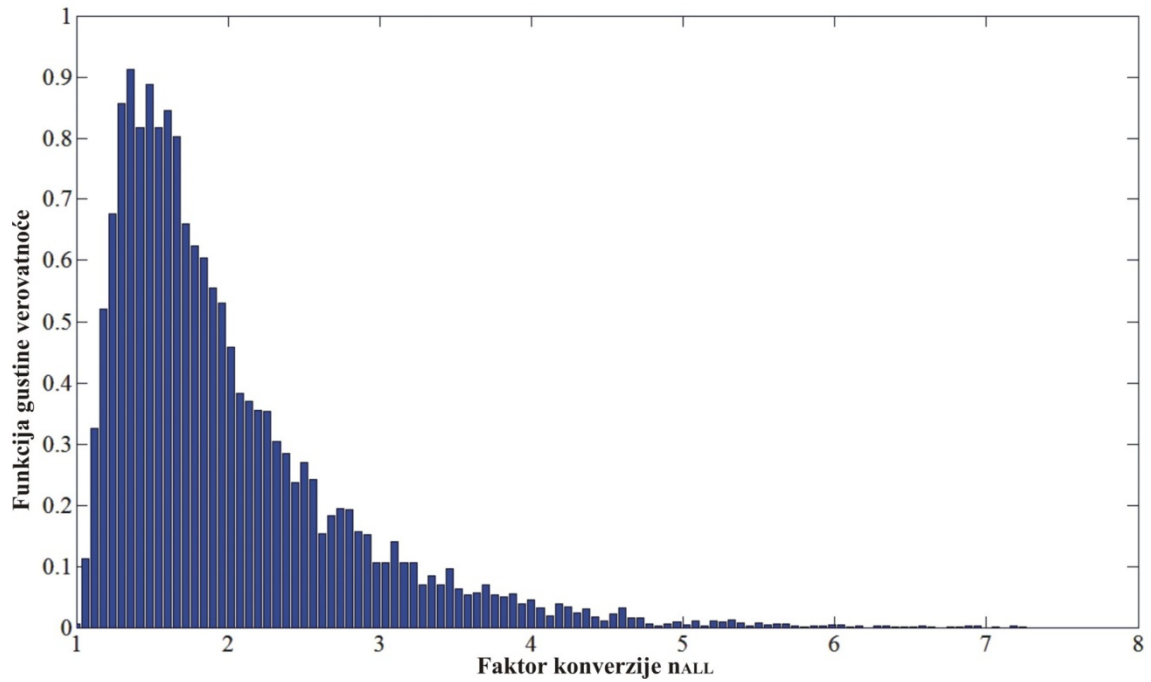
*Slika A.13* Intenzitet električnog polja u zavisnosti od vremena za scenario 5



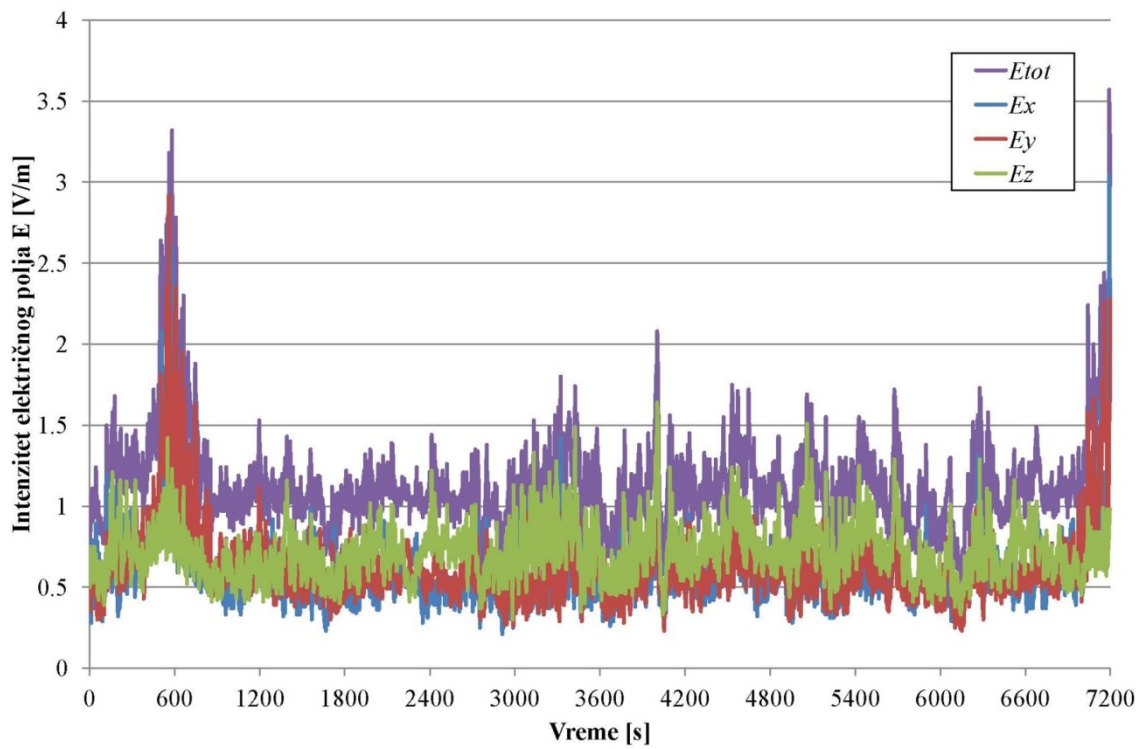
Slika A.14 Faktori konverzije  $n_x$ ,  $n_y$  i  $n_z$  u zavisnosti od vremena za scenario 5



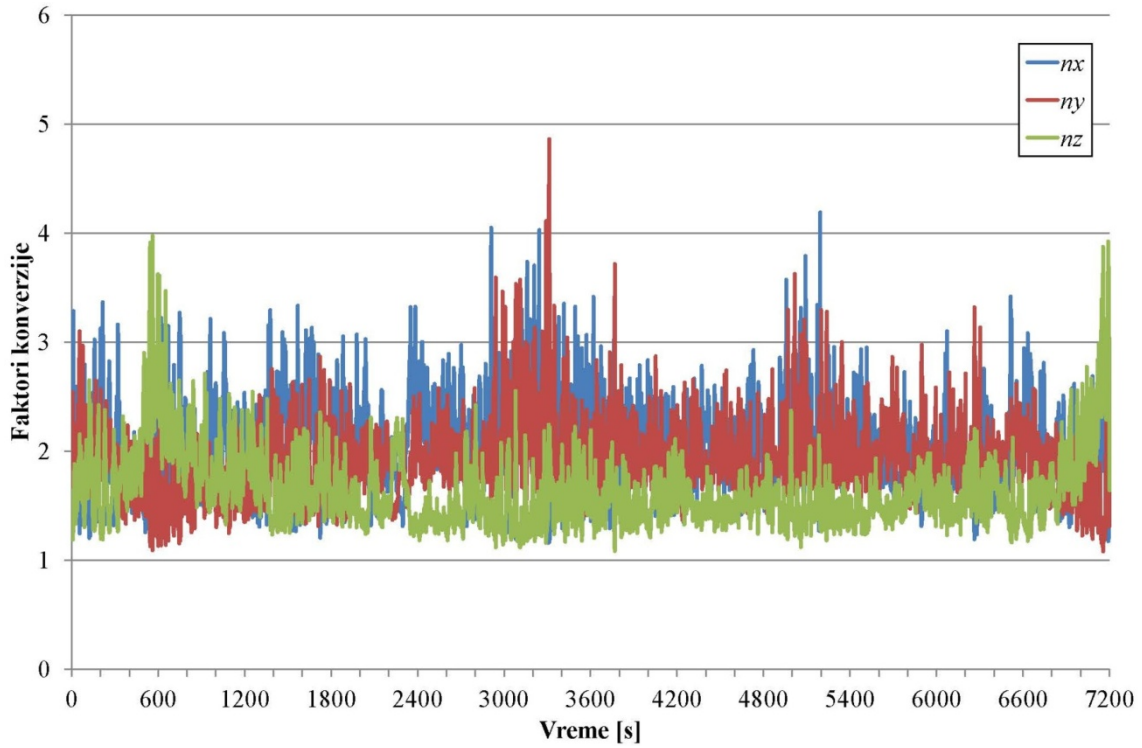
Slika A.15 Faktor konverzije  $n_{ALL}$  u zavisnosti od vremena za scenario 5



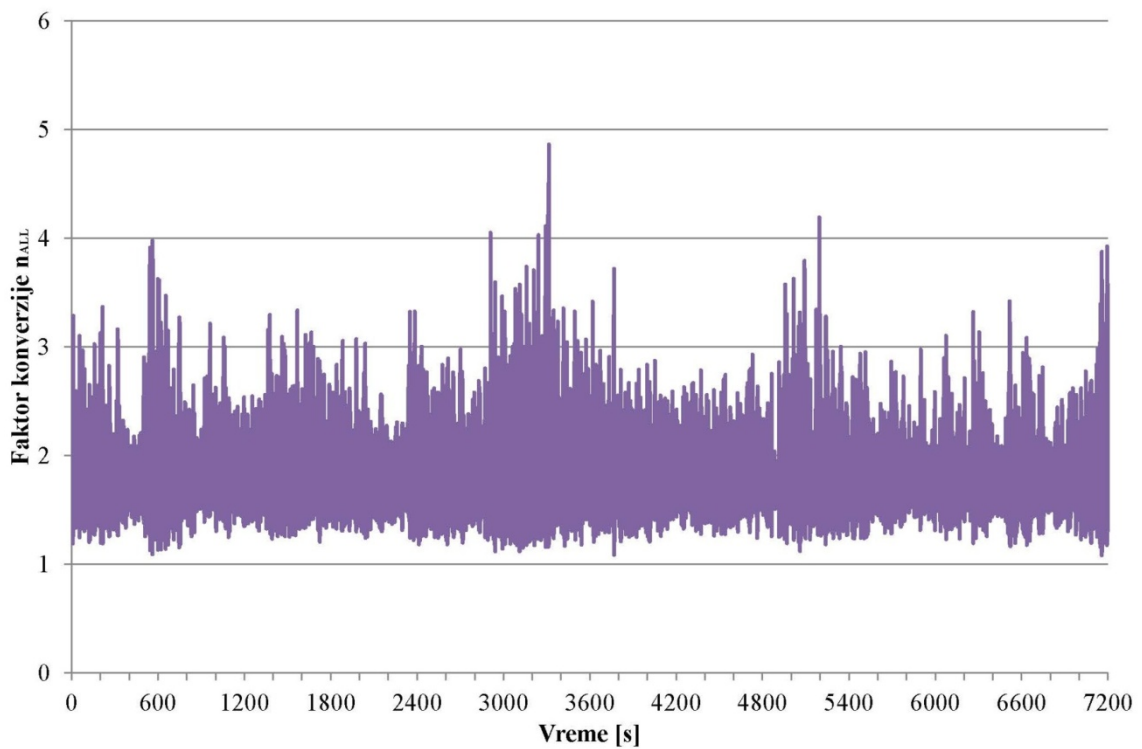
*Slika A.16* Funkcija gustine verovatnoće faktora konverzije  $n_{ALL}$  za scenario 5



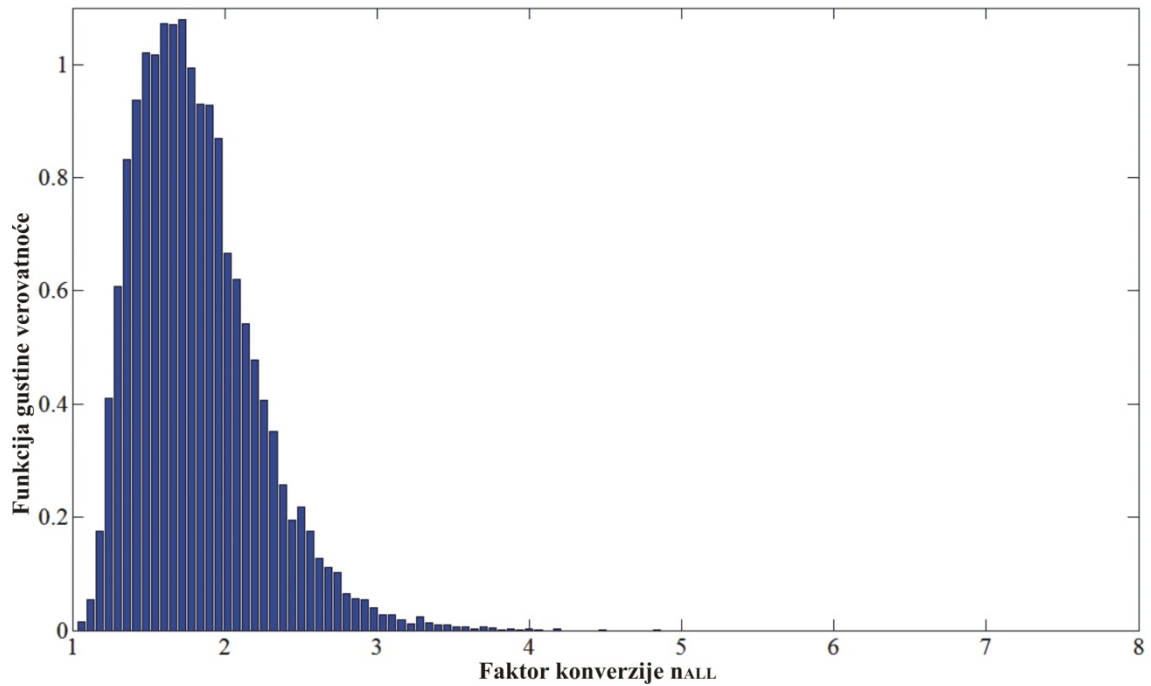
*Slika A.17* Intenzitet električnog polja u zavisnosti od vremena za scenario 6



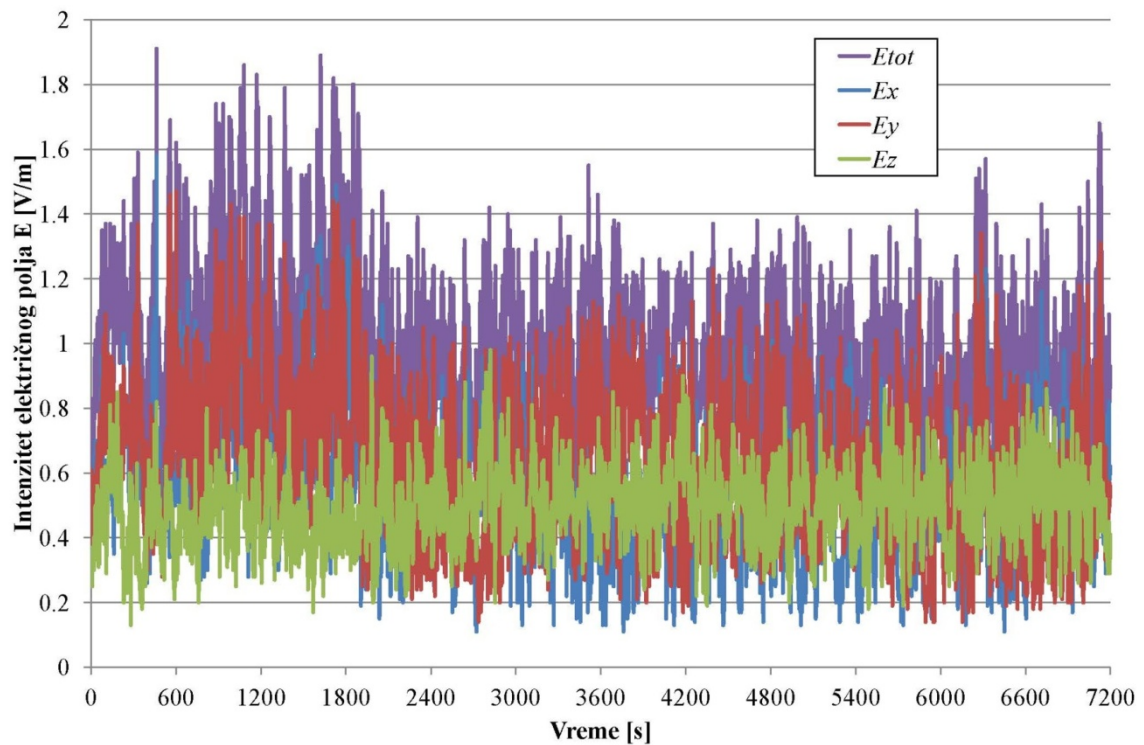
Slika A.18 Faktori konverzije  $n_x$ ,  $n_y$  i  $n_z$  u zavisnosti od vremena za scenario 6



Slika A.19 Faktor konverzije  $n_{ALL}$  u zavisnosti od vremena za scenario 6

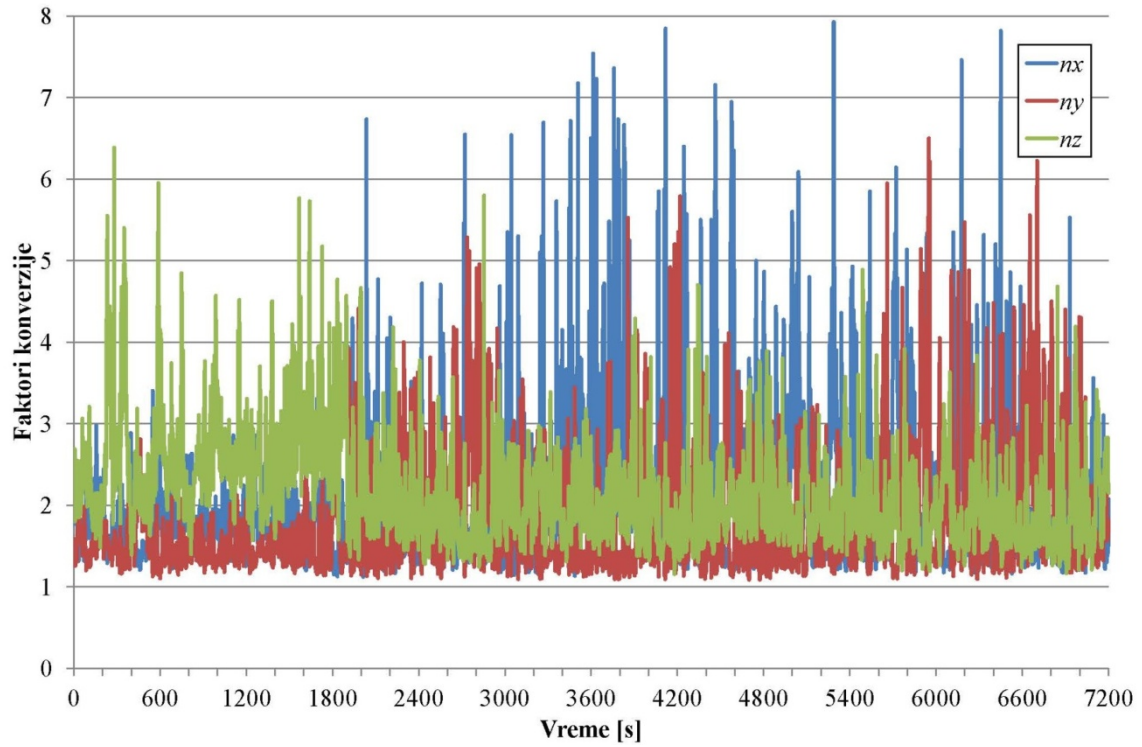


*Slika A.20 Funkcija gustine verovatnoće faktora konverzije  $n_{ALL}$  za scenario 6*

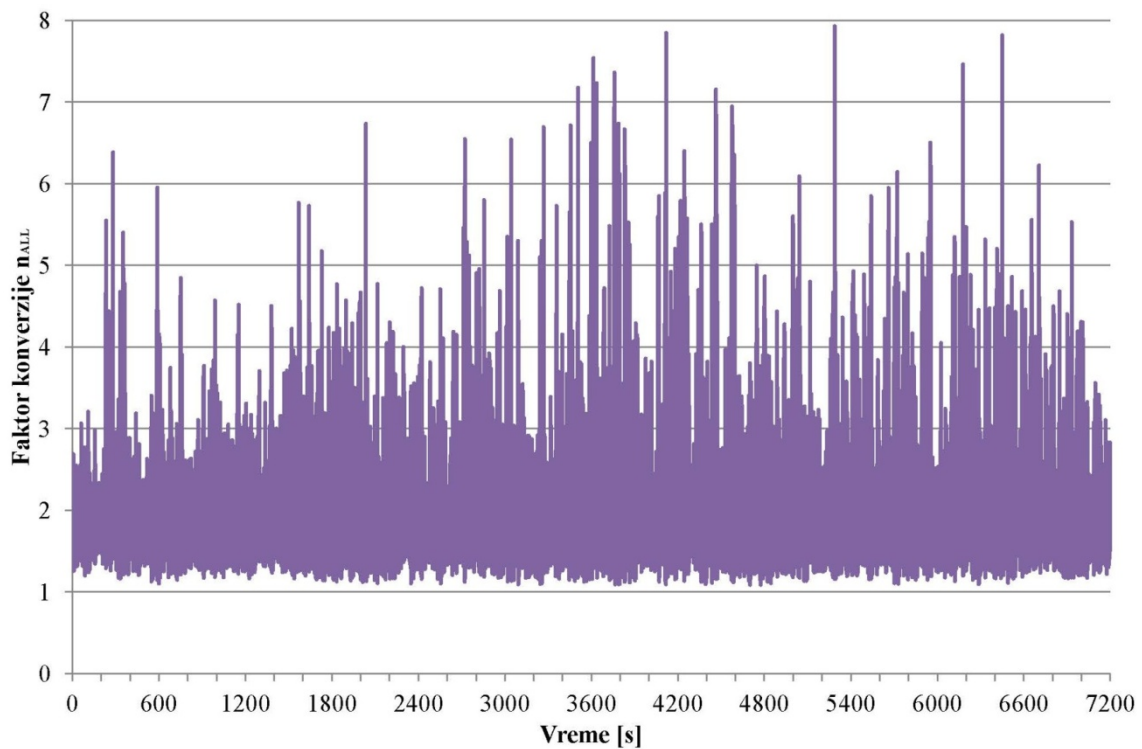


*Slika A.21 Intenzitet električnog polja u zavisnosti od vremena za scenario 7*

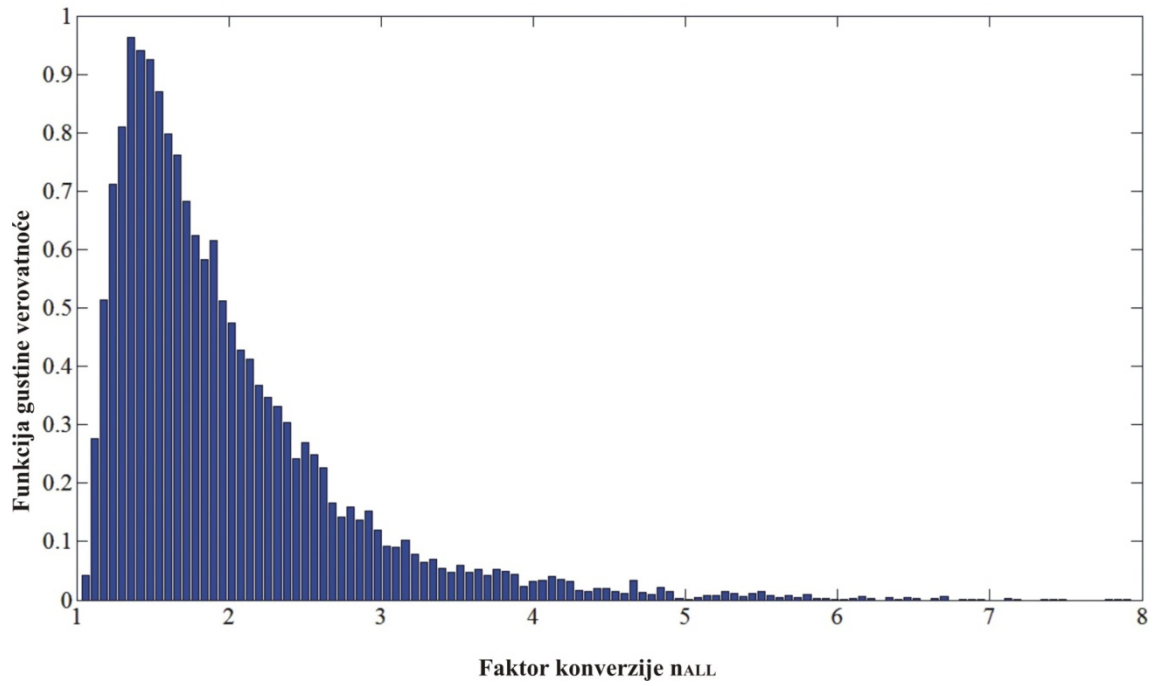




Slika A.22 Faktori konverzije  $n_x$ ,  $n_y$  i  $n_z$  u zavisnosti od vremena za scenario 7



Slika A.23 Faktor konverzije  $n_{ALL}$  u zavisnosti od vremena za scenario 7



*Slika A.24* Funkcija gustine verovatnoće faktora konverzije  $n_{ALL}$  za scenario 7

## BIOGRAFIJA

Mladen Koprivica je rođen 25.05.1975.g. u Sarajevu. Osnovnu školu "Pavle Goranin Ilija" u Sarajevu završio je 1990.g. sa maksimalnom prosečnom ocenom, kao nosilac diplome Mitar Trifunović Učo. Nakon toga, upisao je Drugu Sarajevsku gimnaziju (matematičko-fizičko-računarska škola) gde je završio prve dve godine. Zbog ratnih okolnosti u Bosni i Hercegovini 1992.g. preselio se na Sokolac gde je 1994.g. završio Srednju elektrotehničku školu sa odličnim uspehom. Redovne studije završio je na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu, smer Telekomunikacije, 2001.g. sa prosečnom ocenom 8,74. Magistarske studije završio je, takođe, na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu, smer Telekomunikacije, 2014.g. sa prosečnom ocenom 10. Zaposlen je na mestu Višeg stručnog saradnika – višeg laboratorijskog inženjera na Katedri za telekomunikacije Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu, od 2001.g. Pored toga obavlja poslove rukovodioca i instruktora na *Cisco Networking* akademiji Elektrotehničkog fakulteta. Takođe, član je Saveta Elektrotehničkog fakulteta.

Mladen Koprivica poseduje licencu odgovornog projektanta telekomunikacionih mreža i sistema i učestvovao je izradi velikog broja projekata, studija, tehničkih rešenja i merenja rađenih na Katedri za telekomunikacije. Pored toga, obavlja i poslove Zamenika rukovodioca Laboratorije za radio-komunikacije akreditovane od strane Akreditacionog tela Srbije.

Mladen Koprivica je *Senior member* IEEE udruženja i član izvršnog odbora IEEE sekcije Srbija i Crna Gora. Član je Društva za telekomunikacije, nadzornog odbora Društva za telekomunikacije i organizacionog odbora konferencije TELFOR. Takođe, član je Inženjerske komore Srbije i ispitivač za stručni deo ispita u Komisiji za elektroniku i telekomunikacije za oblast računarskih mreža.

Autor je ili koautor 34 naučna rada, od kojih je 5 radova objavljeno u međunarodnim časopisima sa SCI liste, 4 rada u domaćim časopisima, 6 radova na međunarodnim konferencijama, dok su ostali radovi publikovani na domaćim konferencijama.

Mladen Koprivica je oženjen, otac sina od 7 godina i ćerke od 1.5 godinu.

Beograd, 10.03.2016.g.

Prilog 1.

## Izjava o autorstvu

Potpisani **Mr Mladen Koprivica, dipl.ing.**

broj indeksa \_\_\_\_\_

### Izjavljujem

da je doktorska disertacija pod naslovom

**Povećanje efikasnosti metoda za merenje intenziteta električnog polja u okolini baznih stanica javnih mobilnih sistema**

- rezultat sopstvenog istraživačkog rada,
- da predložena disertacija u celini ni u delovima nije bila predložena za dobijanje bilo koje diplome prema studijskim programima drugih visokoškolskih ustanova,
- da su rezultati korektno navedeni i
- da nisam kršio autorska prava i koristio intelektualnu svojinu drugih lica.

**Potpis doktoranda**

U Beogradu, **10.03.2016.g.**

Koprivica Mladen

Prilog 2.

## Izjava o istovetnosti štampane i elektronske verzije doktorskog rada

Ime i prezime autora **Mladen Koprivica**

Broj indeksa \_\_\_\_\_

Studijski program **Telekomunikacije**

Naslov rada **Povećanje efikasnosti metoda za merenje intenziteta električnog polja u okolini baznih stanica javnih mobilnih sistema**

Mentor **Dr Aleksandar Nešković, redovni profesor**

Potpisani **Mr Mladen Koprivica, dipl.ing.**

Izjavljujem da je štampana verzija mog doktorskog rada istovetna elektronskoj verziji koju sam predao za objavljivanje na portalu **Digitalnog repozitorijuma Univerziteta u Beogradu**.

Dozvoljavam da se objave moji lični podaci vezani za dobijanje akademskog zvanja 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 doktoranda**

U Beogradu, **10.03.2016.g.**



Mladen Koprivica

Prilog 3.

## Izjava o korišćenju

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

### **Povećanje efikasnosti metoda za merenje intenziteta električnog polja u okolini baznih stanica javnih mobilnih sistema**

koja je moje autorsko delo.

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

Moju doktorsku disertaciju pohranjenu u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Beogradu mogu da koriste svi koji poštuju odredbe sadržane u odabranom tipu licence Kreativne zajednice (Creative Commons) za koju sam se odlučio.

1. Autorstvo

2. Autorstvo - nekomercijalno

3. Autorstvo – nekomercijalno – bez prerade

4. Autorstvo – nekomercijalno – deliti pod istim uslovima

5. Autorstvo – bez prerade

6. Autorstvo – deliti pod istim uslovima

(Molimo da zaokružite samo jednu od šest ponuđenih licenci, kratak opis licenci dat je na poleđini lista).

**Potpis doktoranda**

U Beogradu, 10.03.2016.g.

  
\_\_\_\_\_

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 prerade. 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 prerade. 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.