

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

**POSLIJEDIPLOMSKI DOKTORSKI STUDIJ
ELEKTROTEHNIKE I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA**

KVALIFIKACIJSKI ISPIT

**EFIKASNI POSTUPCI
ELEKTROMAGNETSKO-TOPLINSKE
DOZIMETRIJE KOD IZLOŽENOSTI LJUDI
POLJIMA BAZNIH STANICA**

Marin Galić

Split, ožujka 2022.

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

**POSLIJEDIPLOMSK DOKTORSKI I STUDIJ
ELEKTROTEHNIKE I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA**

Kvalifikacijski ispit

**EFIKASNI POSTUPCI
ELEKTROMAGNETSKO-TOPLINSKE
DOZIMETRIJE KOD IZLOŽENOSTI LJUDI
POLJIMA BAZNIH STANICA**

Marin Galić

Split, ožujka 2022.

SADRŽAJ

1. UVOD	4
2. ANTENSKI SUSTAVI RADIO-BAZNIH STANICA.....	6
3. IZLOŽENOST LJUDI EM POLJIMA I SMJERNICE ZA ZAŠTITU	10
4. PRORAČUN JAKOSTI ELEKTRIČNOG POLJA.....	18
5. MJERENJE RAZINA ELEKTRIČNOG POLJA I GUSTOĆE SNAGE	22
6. 5G TEHNOLOGIJA	25
7. ELEKTROMAGNETSKO-TOPLINSKO MODELIRANJE LJUDSKOG TIJELA	34
8. KVANTIFIKACIJA NESIGURNOSTI.....	43
9. ZAKLJUČAK	49
10. LITERATURA.....	50
11. SAŽETAK.....	59
12. POPIS OZNAKA I KRATICA	60

1. UVOD

Osnovna podjela elektromagnetskih (EM) polja u frekvencijskom spektru je na ionizirajuća i neionizirajuća. Ukoliko je energija kvanta dovoljno velika da kida veze između molekula, tada govorimo o ionizirajućem zračenju (primjerice X-zrake ili Γ -zrake). Polja u kojima energija kvanta nije dovoljna za kidanje molekularnih veza spadaju u grupu neionizirajućih polja (električna energija, mikrovalna zračenja, radio i TV polja, bazne stanice i dr.) [1]. S obzirom na valnu duljinu, odnosno frekvenciju f , neionizirajuća EM polja grubo se dijele na polja ekstremno niskih frekvencija ($f < 300$ Hz), polja srednjih frekvencija ($300 \text{ Hz} < f < 10 \text{ MHz}$) te radiofrekvencijska polja ($10 \text{ MHz} < f < 300 \text{ GHz}$). Od posebnog su interesa za ovo istraživanje tzv. mikrovalovi ($300 \text{ MHz} < f < 1 \text{ GHz}$) te milimetarski valovi (gigahertzno frekvencijsko područje).

EM polja frekvencija između 100 MHz pa sve do nekoliko GHz najčešće se koriste u bežičnoj komunikaciji. U taj dio frekvencijskog opsega spadaju tehnologije: 2G (GSM, GPRS i EDGE), 3G (UMTS, TD-SCDMA i CDMA), 4G (LTE), te kao najnovija generacija 5G [2]. Puštanjem u rad nove tehnologije zasigurno će se povećati i ukupne razine EM polja u okolišu koje stvaraju instalirane bazne stanice. Osim toga, 5G tehnologija će u uporabu donijeti veliki broj po snazi slabijih transmitera, no mnogi od njih bi mogli biti postavljeni u neposrednoj blizini ljudskog tijela [3].

Poznato je da ljudsko tijelo apsorbira EM energiju, a u frekvencijskom opsegu u kojem trenutno najčešće rade bazne stanice ($f < 3,8 \text{ GHz}$) apsorbirana energija manifestira se kroz lokalno povišenje tjelesne temperature. Pojavom novih tehnologija koje će raditi i na nekoliko desetaka GHz (tehnologija 5G) mijenja se i priroda apsorpcije EM energije. Naime, porastom frekvencije smanjuje se dubina prodiranja EM energije u tkivo čovjeka, odnosno EM energija u tom slučaju uglavnom ostaje apsorbirana u površinskim dijelovima tkiva (tj. kože). Generirana toplina se dijelom disipira u okoliš, a dijelom prenosi unutar tkiva. Kako bi se izbjegli mogući štetni učinci ovako stvorenih EM polja organizacije koje se bave problematikom štetnog utjecaja na čovjeka definiraju granične vrijednosti električnih E i magnetskih H polja. Nedavno su objavljene smjernice zaštite od EM zračenja ICNIRP-a (eng. *International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection*, [4]) i IEEE-a (eng. *The Institute of Electrical and Electronics Engineers* [5]). Države, kao i lokalne zajednice slobodne su same propisati dopuštene granične vrijednosti

EM polja. U Republici Hrvatskoj na snazi je *Pravilnik o zaštiti od elektromagnetskih polja* donesen 2014. godine s posljednjim izmjenama iz 2016. godine (u daljnjem tekstu Pravilnik [6]).

Mjerenje i proračun jakosti električnog i magnetskog polja izvode se prema Pravilniku i važećim normama [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13]. Proračun se prema tim dokumentima izvodi uz aproksimaciju slobodnog prostora koja u obzir uzima samo direktni val (incidentno polje) zanemarujući reflektirane komponente.

Svrha ovog istraživanja jest provesti analizu na koji način se uzima u obzir utjecaj podloge (tla) na jakost polja u točki proračuna, odnosno mjerenja. Posebno je od interesa razmatrati višeslojno tlo s pripadajućim električnim parametrima u smislu vodljivosti, permitivnosti i permeabilnosti. Pri tome se posebno proučava proračun reflektiranog električnog polja upotrebom koeficijenata refleksije koji proizlaze iz modificirane metode slike (*eng. Modified Image Theory, MIT*) ili Fresnelovog koeficijenta refleksije za ravne valove. Nadalje, analiziraju se jednostavni (kanonski) modeli ljudskog tijela izloženi zračenju visokih frekvencija za potrebe dozimetrije unutarnjeg polja. Uz proračun, od posebnog je interesa i mjerenje razina EM polja u 5G području. Konačno, od interesa je i mogućnost primjene stohastičkog modeliranja u svrhu ispitivanja utjecaja ulaznih parametara. Kvantifikacijom nesigurnosti, odnosno analizom osjetljivosti parametara pružit će se informacija o najizglednijem i najgorem slučaju kada je u pitanju izloženost ljudi EM poljima.

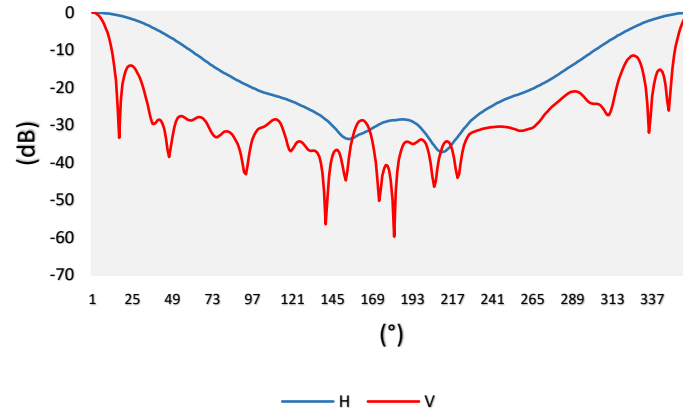
2. ANTENSKI SUSTAVI RADIO-BAZNIH STANICA

Bazna stanica u pravilu označava skup telekomunikacijske opreme nužne za bežično povezivanje telekomunikacijskih uređaja. Jedna od osnovnih komponenti bazne stanice svakako je antena. Antenu promatramo kao izvor neionizirajućeg zračenja čijem frekvencijskom spektru, između ostaloga, pripadaju električna i magnetska polja na kojima počivaju trenutne komunikacijske tehnologije (2G, 3G, 4G i 5G). Prema tome, bazne stanice odnosno odašiljačke antene mogu raditi na više frekvencijskih područja istovremeno.

Antena je prilagodni sklop pri odašiljanju signala s predajnika u prostor te preuzimanju vala iz prostora na predajnik. S obzirom na frekvencijsko područje rada, antene se dijele na rezonantne ili uskopojasne te aperiodske ili širokopojasne antene.

Zračeći EM energiju u prostor, antena električnim i magnetskim poljima pokriva određeno područje. Antene većih snaga pokrivaju veće područje te se nazivaju makročelije (područje pokrivanja promatra se u desecima kilometara). S druge strane, antene slabije snage i manjeg područja pokrivanja nazivaju se mikročelijama (pokriveno područje je unutar nekoliko kilometara). Mikro i makročelije instaliraju se na masivnim antenskim stupovima, na krovovima zgrada te sličnim objektima koji pružaju otvoreni pogled u svim smjerovima kako bi se osiguralo neometano širenje EM vala. Njihova osnovna međusobna razlika je u tome što makročelije imaju bolju pokrivenost, dok mikročelije imaju veći kapacitet [14]. Osim mikro i makročelija postoje i antene koje se nazivaju pikočelijama, odnosno femtočelijama. Njihove snage još su manje, kao i područje pokrivanja (do par stotina metara), stoga se najčešće ugrađuju unutar objekata.

S obzirom na frekvenciju i konstrukciju antene nastaju prostorni dijagrami zračenja. Dijagram zračenja antene predstavlja relativnu prostornu raspodjelu neke veličine od interesa (polja, dobitka, itd.), a najčešće se izražava u relativnim vrijednostima u odnosu na maksimalnu vrijednost (brojčano ili u decibelima). Iako se radi o prostornoj ovisnosti, trodimenzionalni dijagram zračenja izražava se preko dva dvodimenzionalna prikaza: horizontalnog i vertikalnog (slika 2.1.).



Slika 2.1. Horizontalni (H) i vertikalni (V) dijagram zračenja

Horizontalni dijagram zračenja označava raspodjelu neke veličine po horizontalnoj ravnini. Vertikalni dijagram predstavlja pak raspodjelu neke veličine po okomitoj ravnini. Horizontalni dijagram zračenja obično je širi te najčešće ima manje bočnih latica od vertikalnog.

Dijagrami zračenja u modernim telekomunikacijskim tehnologijama najčešće se ostvaruju izvedbom antenskih nizova (tzv. panel antena). Ovisno o namjeni, antena se konstruira sa vrlo širokom glavnom laticom (horizontalni dijagram zračenja) kako bi pokrila geografsko područje (primjerice radio ili tv odašiljači) ili s uskom glavnom laticom kako bi se postigao veći dobitak (npr. kod usmjerenih veza). U teoriji postoje i izvori koji u svim smjerovima zrače jednaku količinu snage. Takve antene nazivaju se izotropnim radijatorima i primjenjuju se najčešće pri matematičkom opisivanju svojstava antena.

Svojstva antena su, osim dijagramom zračenja, definirana i drugim parametrima kao što su:

- polarizacija,
- zračena snaga,
- intenzitet zračenja,
- usmjerenost,
- dobitak i dr.

Polarizacija antene (ujedno i polarizacija EM vala) označava smjer vektora električnog polja u odnosu na smjer širenja vala. Tako postoje eliptička polarizacija (vrh vektora E polja opisuje elipsu), kružna polarizacija (vrh vektora E polja opisuje kružnicu) te linearna. Kod linearne polarizacije smjer vektora E polja je konstantan, a mijenja mu se samo amplituda (veličina). Kod kružne polarizacije vektoru E polja mijenja se samo smjer, a amplituda ostaje

nepromijenjena. U slučaju pak eliptičke polarizacije, vektoru E polja mijenja se i smjer i amplituda. S obzirom na promjenu smjera vektora E polja, razlikuju se desna i lijeva polarizacija ovisno o tome da li vektor E polja rotira u smjeru ili suprotno od smjera kazaljke na satu. Važno je napomenuti kako se za određivanje smjera polarizacije vektor E polja uvijek promatra u smjeru širenja vala.

Izračena snaga antene u praksi se najčešće spominje za slučaj izotropnog radijatora kao *EIRP* (eng. *Effective Isotropic Radiated Power*), ili pak *ERP* (eng. *Effective Radiated Power*) za slučaj dipola, a iskazuje se najčešće u mjernim jedinicama dBm ili dBW. Važno je napomenuti kako se *EIRP* i *ERP* razlikuju za 2,15 dB:

$$EIRP = ERP + 2,15 \text{ dB} \quad (2.1)$$

Intenzitet zračenja U jednak je produktu gustoće snage i kvadrata udaljenosti, a za poseban slučaj izotropnog radijatora može se odrediti iz relacije:

$$U_0 = \frac{P_{rad}}{4\pi} \quad (2.2)$$

gdje je P_{rad} totalna zračena snaga.

Usmjerenost antene D jednaka je omjeru intenziteta zračenja u danom smjeru U i intenziteta zračenja usrednjenog po svim smjerovima U_0 :

$$D = \frac{4\pi \cdot U}{P_{rad}} \quad (2.3)$$

Dobitak antene G definira se kao omjer intenziteta u danom smjeru i intenziteta zračenja koji bi se dobio kada bi privedena snaga antene bila izračena izotropno:

$$G(\phi, \theta) = 4\pi \cdot \frac{U(\phi, \theta)}{P_{in}} \quad (2.4)$$

gdje je P_{in} ulazna snaga antene.

U praksi se dobici antene promatraju odvojeno po ravnini zračenja: horizontalnoj i vertikalnoj, a najčešće se iskazuju u decibelima.

Važno je istaknuti kako je prilikom mjerenja i proračuna razina EM polja u okolini bazne stanice jako važno ustanoviti nalazi li se mjerna točka u tzv. bliskom ili daljinskom polju antene. Daljinsko polje antene najčešće se aproksimira prema izrazu za udaljenost d :

$$d \geq \frac{2 \cdot D^2}{\lambda} \quad (2.5)$$

gdje D predstavlja najveću dimenziju antene (najčešće duljina ili radijus), a λ valnu duljinu. Na udaljenostima manjim od one iskazane u (2.5) vlada tzv. radijacijsko blisko polje (2.6), odnosno reaktivno blisko polje (2.7) [15]:

$$\lambda \leq d < \frac{2 \cdot D^2}{\lambda} \quad (2.6)$$

$$d < \lambda \quad (2.7)$$

U zonama bliskog polja antene električna se i magnetska polja razmatraju zasebno [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13], dok se u području daljinskog polja električno i magnetsko polje mogu povezati s impedancijom vakuuma koja iznosi 377Ω :

$$E = H \cdot 377 \quad (2.8)$$

Analogno tome, uz pomoć Poyntingovog vektora, gustoća snage u daljinskom polju antene jednaka je:

$$S = \frac{E^2}{377} \quad (2.9)$$

Prema [13] isti odnos može se upotrijebiti i u zoni radijacijskog bliskog polja.

3. IZLOŽENOST LJUDI EM POLJIMA I SMJERNICE ZA ZAŠTITU

Čovjek je oduvijek bio izložen EM poljima prirodnih izvora. No, tijekom 20. stoljeća raste razina umjetno stvorenih EM polja, a danas se takav trend nastavlja. Povećani zahtjevi za električnom energijom, internetom i bežičnom komunikacijom razlog su sve većih akumuliranih razina izloženosti umjetno stvorenim EM poljima. Utjecaj EM polja na čovjeka, između ostaloga, ovisan je o frekvenciji, a kod visokih frekvencija za zdravstveni rizik važnu ulogu ima količina apsorbirane energije. Štetni učinci za ljudsko zdravlje nerijetko su i akumulirajućeg karaktera, a usko su povezani s duljinom izloženosti zračenju kao i dozi ozračenosti [16, 17]. Iako je zasada poznato da određene razine EM polja imaju štetan učinak na čovjeka, još uvijek se istražuje utjecaj dugotrajne izloženosti razinama koje su znatno niže od graničnih vrijednosti danih u smjernicama [1, 4, 5, 18].

Električna polja niskih frekvencija utječu na distribuciju električnih naboja po površini tijela uzrokujući struje koje teku kroz tijelo prema zemlji. Izloženost magnetskim poljima niskih frekvencija uzrokuje pak pojavu vrtložnih struja unutar tijela. EM polja većeg intenziteta mogu tako uzrokovati silu sposobnu stimulirati mišićni i živčani sustav ili dovesti do promjena u dielektričnosti staničnih membrana [1].

Na višim frekvencijama ($f > 100$ kHz) komponenta EM vala koja najviše utječe na ljudski organizam je električno polje. Utjecaj EM polja viših frekvencija najviše se ogleda u zagrijavanju tkiva tj. u povišenju tjelesne temperature (tablica 3.1.).

Tablica 3.1. Međudjelovanje EM polja i ljudskog tijela [16]

Frekvencijsko područje	Biomehanizam	Dozimetrijska veličina
Polja niskih frekvencija (3 – 100 kHz)	Neuromišićne stimulacije	Gustoća struje u pobuđenom tkivu $J/A/m^2$
Radiovalovi (100 kHz – 3 GHz)	Zagrijavanje tkiva	Specifična razina apsorpcije $SAR/W/kg$
Mikrovalno i milimetarsko zračenje (3 – 300 GHz)	Površinsko zagrijavanje	Gustoća snage $S/W/m^2$

Štoviše, jedini utvrđeni štetni učinak takvih radiofrekvencijskih izvora jest stvaranje topline u, odnosno na površini tkiva. Naime, energija koju nosi val prenosi se na molekule unutar tkiva.

Molekule koje prime takvu energiju počinju se rotirati, odnosno naboj koji se počinje gibati međusobno se sudara te se njihova kinetička energija pretvara u toplinsku. Na istom principu se primjerice hrana zagrijava u mikrovalnoj pećnici.

Kada se govori o utjecaju EM polja na čovjeka u vidu povišenja tjelesne temperature onda [1] razlikuje dva slučaja: povišenje temperature tijela i lokalno povišenje temperature. Temperatura tijela označava temperaturu u dubini ljudskog tijela (abdomen ili mozak) te ona u prosjeku iznosi 37 °C. Ako se tjelesna temperatura povisi za više od 1 °C, negativni učinci na ljudsko zdravlje su mogući, a povišenje iznad 40 °C može dovesti do toplinskog šoka, odnosno smrti. Korisno je istaknuti kako se, prema [19], najviša temperatura postigne unutar 1 min, odnosno 2 min izloženosti, a povećanjem trajanja izloženosti toplina prodire dublje u tkivo.

Prema [20] za povećanje temperature krvotoka odrasle ženske osobe za 1 °C potrebno je biti izložen *SAR*-u (eng. *Specific Absorption Rate*) u iznosu od 6 W/kg tijekom 1 sata pod normalnim uvjetima (temperatura okoline 28 °C, bez odjeće i u stanju mirovanja). Viša razina izloženosti za isto povišenje temperature tijela potrebna je kod djece, budući da ona imaju efikasniji sustav regulacije temperature. Kod njih je porast tjelesne temperature manji za oko 35 % u odnosu na model odrasle ženske osobe pri izloženosti istom *SAR*-u [4]. Naime, omjer mase i površine manji je za tijela manjih dimenzija stoga je potreban veći *SAR* cijelog tijela (eng. *Whole Body SAR*, SAR_{WB}) za jednako povišenje tjelesne temperature.

Osim zagrijavanja cijelog tijela postoji i lokalno povišenje temperature, a odnosi se na lokalno zagrijavanje tkiva koje može uzrokovati bol i opekline. Prema nekim istraživanjima [21] temperatura od 42 °C neće uzrokovati bol niti oštećenja na stanicama. No, također postoje i istraživanja koja navode kako temperature između 41 °C i 43 °C mogu uzrokovati oštećenje tkiva [22, 23]. Smjernice iz IEEE standarda stoga smatraju štetnim lokalno povišenje temperature iznad 41 °C.

Brojne organizacije istražuju posljedice izloženosti EM poljima, a neke od najpoznatijih istraživanja dali su Svjetska zdravstvena organizacija (eng. *WHO*), inicijativa Europske komisije SCENIHR i švedska organizacija za zaštitu od zračenja (*Swedish Radiation Safety Authority* - SSM). Istraživanja su se najčešće odnosila na utjecaj EM polja na mozak, poremećaje na slušni i očni sustav, neuroendokrini sustav, kardiovaskularni sustav, imunološki

sustav, sposobnost razmnožavanja i dr. Iako za neke studije postoje izvješća o štetnim učincima na ljudsko zdravlje, za to ipak nema izravnih i dosljednih dokaza [4].

Utvrđeno je pak kako izloženost EM poljima može uzrokovati stimulaciju živčanog sustava, promjene u staničnim membranama te izazvati povišenje tjelesne temperature. No, ICNIRP ističe kako nema relevantnih dokaza o štetnom utjecaju pri izloženosti EM poljima čije su jakosti unutar propisanih graničnih razina [4]. U istraživanju [24] navodi se kako se većina izloženosti događa u tzv. daljinskom polju antene te stoga ne postoji opasnost za ljudsko zdravlje gledajući sa stajališta termalnih učinaka. U prilog tome, u [25] prikazani su rezultati ispitivanja korelacije između incidentnog električnog polja i vrijednosti SAR-a pri poljima frekvencije jednake 900 MHz. Osim mogućih štetnih učinaka izloženosti zračenju bazne stanice, posebnu pozornost treba obratiti i utjecaju novih, modernih uređaja koji se uglavnom koriste u neposrednoj blizini ljudskog tijela [26].

Kada se spomene štetni utjecaj EM polja na čovjeka, vjerojatno kod većine ljudi prva pomisao bude na tumor ili karcinom. Postoji jako puno istraživanja na tu temu, a neka od njih upućuju na kancerogenost EM polja. Međutim rezultati tih istraživanja smatraju se nedosljednim. U konačnici, još uvijek nema relevantnih dokaza da EM polja mogu uzrokovati tumore [27].

Iako su već spomenute, valja ponoviti kako su dvije istaknute organizacije u svijetu koje se bave pitanjem izloženosti ljudi EM poljima: *International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP)* i *The Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)*. ICNIRP predstavlja organizaciju zaduženu za zaštitu ljudi od EM polja u frekvencijskom opsegu između 100 kHz i 300 GHz te od 1998. godine izdaje smjernice za izloženost ljudi EM poljima. Nove smjernice objavljene su 2020. godine, a odnose se na ograničavanje izloženosti ljudi EM poljima u svrhu zaštite zdravlja. Smjernice se odnose na izloženost kratkotrajnim i dugotrajnim, odnosno kontinuiranim i diskretnim EM poljima. Istu tematiku sa vrlo sličnim zaključcima obradio je i IEEE 2019. godine [5].

Iako to može biti i drugačije definirano, općenito govoreći, razlikuju se dvije vrste propisanih graničnih razina: referentne granične razine za izloženost (eng. *Exposure Reference Limits*, ERL) i granične razine za dozimetriju (eng. *Dosimetric Reference Limits*, DRL). DRL se uglavnom odnosi na specifičnu razinu apsorpcije te epitelnu gustoću snage. ERL se odnosi pak na vanjsko električno i magnetsko polje, incidentnu gustoću snage, inducirane i kontaktne struje

te kontaktne napone. U pravilu nije lako odrediti dozimetrijske veličine unutarnjeg polja kao što su *SAR*, specifična apsorbirana energija *SA* ili apsorbirana gustoća energije U_{ab} . Kako bi se olakšala analiza razine izloženosti EM poljima, uvedene su referentne vrijednosti kao što su upadno (incidentno) električno i magnetsko polje, incidentna gustoća snage i dr.

S obzirom na valnu duljinu, odnosno frekvenciju, u telekomunikacijskom frekvencijskom području razlikuju se tri osnovne skupine EM valova:

- EM valovi frekvencije $f < 100$ kHz,
- EM valovi frekvencije $100 \text{ kHz} \leq f < 6$ GHz te
- EM valovi frekvencije $6 \text{ GHz} \leq f < 300$ GHz.

Izloženost EM poljima frekvencija nižih od 100 kHz i impulsnim EM poljima frekvencije do 5 MHz ili 10 MHz mogu uzrokovati bolne posljedice povezane s elektrostimulacijom živčanog sustava. Ovakav učinak EM polja ovisan je o frekvenciji te njenim porastom dominantni učinak postaje stvaranje topline. No, važno je izdvojiti kako izloženost gornjoj graničnoj vrijednosti EM polja u ovom frekvencijskom opsegu nema trajni štetni učinak na čovjeka [4].

U frekvencijskom području iznad 100 kHz učinci EM polja s elektrostimulacije živčanog sustava prelaze u toplinske. Tako se frekvencija od 100 kHz smatra svojevrsnom graničnom frekvencijom ispod koje dominantni utjecaj na čovjeka ima elektrostimulacija živčanog sustava, odnosno iznad koje dominantni utjecaj preuzima zagrijavanje tkiva. Unutar tkiva nastala toplina tjelesnim mehanizmima (npr. krvotok) prenosi se kroz cijelo tijelo. Pri promatranju zagrijavanja tkiva u obzir se uzima i vrijeme usrednjavanja koje je različito za različito područje izloženosti.

Poznato je da frekvencija EM vala uvelike utječe na dubinu prodiranja apsorbirane energije u tkivo. Naime, pri frekvencijama nižim od 6 GHz apsorbirana energija prodire dublje u tkivo. Prema [28] dubina prodiranja EM vala pri frekvenciji od 6 GHz iznosi 4 mm. Povišenjem frekvencije EM polja iznad 6 GHz rezultirajuće zagrijavanje tijela postaje više površinsko. Prema nekim istraživanjima dubina penetracije vala pri frekvenciji od 6 GHz jednaka je 6 mm [29], a pri frekvenciji $f > 30$ GHz dubina prodiranja energije manja je od 1 mm [30]. Smatra se da je približno 86% snage apsorbirano na dubini između 8 mm i 0,2 mm pri frekvenciji od 6 GHz do 300 GHz [5]. U tablici 3.2. prikazana je dubina penetracije za nekoliko različitih frekvencija [31].

Tablica 3.2. Dubina prodiranja EM energije u ovisnosti o frekvenciji [31]

f/GHz	dubina/cm
0,1	5,2
0,3	3,1
1	1,9
3	0,9
10	0,19

S obzirom na dubinu penetracije EM energije u tkivo napravljena je podjela EM polja na ona frekvencija između 100 kHz i 6 GHz, odnosno na polja između 6 GHz i 300 GHz. Zbog činjenice da EM polja frekvencija iznad 100 kHz utječu na zagrijavanje tkiva, dugo se polemiziralo o tome koja veličina je prikladnija za opisivanje razine povišenja tjelesne temperature s obzirom na frekvenciju: *SAR* ili gustoća snage (ponekad nazivana i gustoćom toka, S_{ab}). Iako su neka ranija istraživanja ukazivala na to da je *SAR* prikladnija veličina u frekvencijskom rasponu od 1 GHz do 10 GHz, novija istraživanja dokazuju kako je *SAR* ipak prikladniji za EM polja frekvencija između 1 GHz i 6 GHz, a gustoća snage za frekvencije iznad 6 GHz [32, 33].

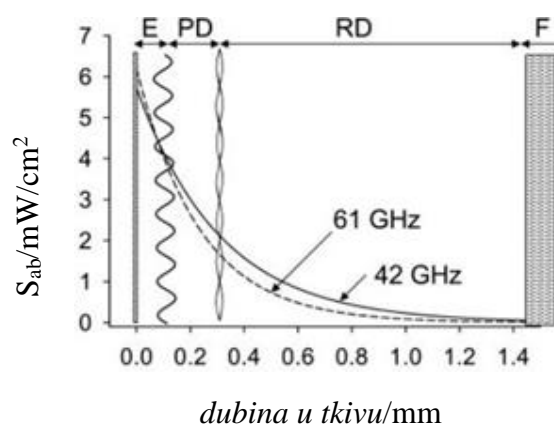
Smjernice [4, 5] za kratkotrajne izloženosti EM poljima frekvencija između 100 kHz i 6 GHz preporučuju razmatranje gustoće snage ili incidentne gustoće energije. Za dugoročne pak izloženosti najčešće se izračunava *SAR* koji se označava i kao *SAR* cijelog tijela, odnosno SAR_{WB} . Važno je napomenuti kako se analiza izloženosti ljudi poljima visokih frekvencija odnosi na čitavo tijelo samo ako se čovjek nalazi dovoljno daleko od izvora zračenja, tj. u daljinskom polju. Sa druge strane, u situaciji kad se čovjek nalazi u bliskom polju izvora zračenja, primjerice u polju mobilnog telefona, analizira se dio tijela koji je neposredno izložen zračenju (glava, mozak, oko i sl.) [16]. Vrijednost *SAR*-a često se usrednjava po volumenu mase. Istraživanje kao što je [28] usrednjavanje po masi od 1 g smatra neprikladnim, odnosno lošim indikatorom povećanja tjelesne temperature. Danas se pak masa od 10 g (kocka volumena $2,15 \text{ cm}^3$) najčešće uzima pri usrednjavanju, a oznaka za takvu veličinu je *10-g-SAR* ili SAR_{10g} .

Mnogi znanstvenici danas rade na ispitivanju razina zračenja koje bi mogle imati štetne učinke na čovjeka. Štetnim učinkom smatra se povišenje tjelesne temperature za $1 \text{ }^\circ\text{C}$ [5]. Novija istraživanja navedena u [4] pokazuju da izloženost *SAR*-u od 6 W/kg unutar 1 sata u

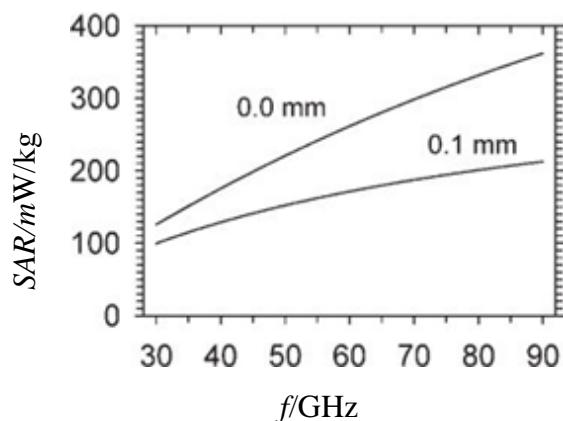
frekvencijskom opsegu između 100 kHz i 6 GHz može uzrokovati porast tjelesne temperature za 1 °C, a izloženost SAR-u od 4,5 W/kg tijekom 60 min potrebna je da bi se tjelesna temperatura povisila za 1 °C kod osoba sa smanjenim intenzitetom znojenja. ICNIRP, a i IEEE, stoga uzimaju razinu od 4 W/kg uprosječenu unutar 30-minutnog intervala izloženosti potrebnu da se tijelu temperatura povisi za 1 °C. Prema istraživanju [34] najgori slučaj pri izračunu SAR-a cijelog tijela postiže se odabirom najgoreg slučaja omjera presjeka tkiva i mase tijela (eng. *cross section/model mass*).

Dominantan učinak EM polja frekvencija viših od 6 GHz na čovjeka također je stvaranje topline, ali u ovom slučaju radi se o površinskim toplinskim učincima koji mogu uzrokovati osjećaj peckanja ili čak dovesti do opekline. Kada EM val visoke frekvencije pada na površinu tkiva dijelom se reflektira, a dijelom prodire unutar tkiva. U usporedbi s razvijenom toplinom unutar tijela, toplina u površinskim dijelovima lakše se disipira u okoliš. U frekvencijskom području iznad 6 GHz razina izloženosti najčešće se iskazuje kroz apsorbiranu gustoću snage S_{ab} (nekad označenu i kao SA) uprosječenu po površini od 4 cm². Pri višim frekvencijama ($f > 28$ GHz) bolju korelaciju s porastom temperature tkiva pokazuju vrijednosti S_{ab} usrednjene po 1 cm² [35]. Stoga je postavljen dodatni uvjet za frekvencije više od 30 GHz gdje se S_{ab} usrednjava po površini od 1 cm².

Iako je pri višim frekvencijama dubina penetracije manja (slika 3.1.), vrijednost SAR-a značajno se povećava u usporedbi s mikrovalovima za jednake vrijednosti gustoće snage (slika 3.2.) [36].



Slika 3.1. Raspodjela gustoće snage unutar tkiva pri frekvencijama od 42 GHz i 61 GHz (oznake: E – epidermis, PD – papilarni dermis, RD – retikularni dermis, F – sloj masti) [36]



Slika 3.2. Vrijednosti SAR-a pri različitim frekvencijama na dubini tkiva od 0,0 mm i 0,1 mm [36]

Granične vrijednosti izloženosti EM poljima donose se na osnovu istraživanja nad fantomima. Na razinama pri kojima se uoče utjecaji EM polja koji mogu rezultirati štetnim posljedicama primjenjuju se tzv. sigurnosni faktori koji obično iznose 2, 5, 10, odnosno 50, ovisno o tome radi li se o izloženosti cijelog tijela ili lokalnoj izloženosti. Također, zbog činjenice da u području javne i povećane izloženosti pojedinac nije u mogućnosti kontrolirati razinu izloženosti EM polju, primijenjena su stroža ograničenja u odnosu na područje profesionalne izloženosti [4, 6]. Primjerice, u [37] navodi se razina od 4 W/kg koja tjelesnu temperaturu kod vrste majmuna *Macaca mulatta* koji je sličan modelu čovjeka podigne za 1 °C. Na tu vrijednost stoga se primijeni sigurnosni faktor 10 pa se granična vrijednost SAR-a cijelog tijela postavlja na vrijednost od 0,4 W/kg tijekom 30-minutnog intervala. Prema tome, vrijednost SAR-a može biti i veća od 0,4 W/kg tijekom kraćeg vremena izloženosti.

Osim zagrijavanja cijelog tijela, bitno je promatrati i lokalno zagrijavanje tkiva. Izloženost lokalnom zagrijavanju tkiva može dovesti do osjećaja boli odnosno opekline. Već je spomenuto kako smjernice u [4] smatraju štetnim izloženost razinama EM polja koje mogu dovesti do povišenja lokalne temperature iznad 41 °C. No, pri tom razmatranju potrebno je razlikovati vrstu tkiva. Naime, razlikuju se tkiva *tipa 1* u koja spadaju čelo, iris oka, sloj epidermisa, dermisa i masnog tkiva, područje nadlaktice i podlaktice, šake, noge, stopala i sl. U tkivo *tipa 2* spadaju pak tkiva unutar glave, oka, abdomena, leđa i dr. S obzirom na tip tkiva, razlikuju se i granične vrijednosti lokalnog porasta temperature označene kao potencijalno opasne. Stoga, razine izloženosti ograničene su na način da se pod njihovim utjecajem lokalna temperatura tkiva ne poveća iznad 5 °C za tkiva *tipa 1*, odnosno 2 °C za tkiva *tipa 2*. U tu svrhu u frekvencijskom opsegu između 100 kHz i 6 GHz navode se razine SAR-a uprosječenog po

prostornoj (kubnoj) masi od 10 g unutar intervala od 6 min za koje se smatra da neće dovesti do lokalnog povišenja temperature iznad navedenih vrijednosti. Te razine iznose 20 W/kg za područje glave i torza, odnosno 40 W/kg za ekstremitete, a na njih se dodatno primjenjuju sigurnosni faktori [5]. U frekvencijskom području između 6 GHz i 300 GHz mogu se još primijeniti i ograničenja vezana uz lokalno apsorbiranu gustoću energije $U_{ab}/\text{kJ/m}^2$. Spomenute veličine spadaju u tzv. DRL vrijednosti. No, zbog jednostavnosti u praksi, preporuča se raditi s ERL vrijednostima koje uključuju efektivne vrijednosti jakosti električnog E i magnetskog polja H te gustoće snage S , a čije granične vrijednosti su izvedene kao funkcije frekvencije [4, 5]. U tablici 3.3. prikazane su granične vrijednosti fizikalnih veličina E , H i S propisane Pravilnikom za područje povećane osjetljivosti.

Tablica 3.3. Granične razine za E i H između 10 MHz i 10 GHz za područje povećane osjetljivosti propisane Pravilnikom [6]

f/MHz	$E/\text{V/m}$	$H/\text{A/m}$
10 – 400	11,20	0,0292
400 – 2000	$0,55 \cdot \sqrt{f}$	$1,48 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{f}$
2000 – 10 000	24,40	0,064

U slučaju više izvora različitih frekvencija (između 1 MHz i 300 GHz) pristupa se zbrajanju normiranih vrijednosti izloženosti pojedinim izvorima. Kako bi razina izloženosti bila manja od dozvoljene, navedeni zbroj mora biti manji od 1. U Hrvatskoj je Pravilnikom za električno polje to definirano na sljedeći način [6]:

$$\sum_{>1\text{MHz}}^{300\text{GHz}} \left(\frac{E_{i,f}}{E_{g,f}} \right)^2 \leq 1 \quad (3.1)$$

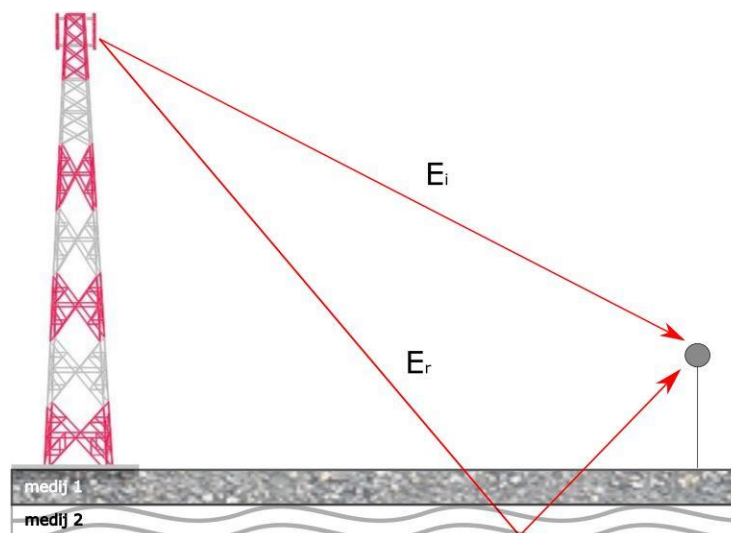
gdje je $E_{i,f}$ efektivna vrijednost jakosti električnog polja na frekvenciji f , a $E_{g,f}$ efektivna vrijednost jakosti granične razine električnog polja na frekvenciji f .

Osim međunarodnih organizacija, u pravilu svaka država ima svoje zakone i pravilnike koji govore o zaštiti od EM polja. U Republici Hrvatskoj aktualan je *Pravilnik o zaštiti od elektromagnetskih polja* [6], odnosno *Pravilnik o izmjenama i dopunama pravilnika o zaštiti od elektromagnetskih polja* [38].

4. PRORAČUN JAKOSTI ELEKTRIČNOG POLJA

Pri projektiranju bazne stanice potrebno je izraditi procjenu jakosti električnih polja izvora u njenoj okolini. Tu su od posebne važnosti područja koja su Pravilnikom svrstana u tzv. povećanu osjetljivost (dječji vrtići, škole, obiteljske kuće, stambene zgrade, poslovni objekti i dr.).

Više je različitih pristupa proračunu jakosti EM polja, ovisno o primijenjenim aproksimacijama kao što su model slobodnog prostora kod kojeg se u obzir uzima isključivo direktni snop zračenja E_i , te različiti modeli kod kojih se u obzir uzima i val reflektiran od podloge E_r [39, 40, 41, 42, 43], (slika 4.1.), odnosno okolnih objekata.



Slika 4.1. Direktni i reflektirani snop zračenja

Naime, objekti i podloga koji uzrokuju refleksiju EM vala mogu uvelike utjecati na razine EM polja [44].

Da bi se uzeo u obzir reflektirani val od podloge potrebno je koristiti rigorozni pristup koji uključuje rješavanje složenih Sommerfeldovih integrala [45] ili široko rasprostranjeni aproksimativni pristup preko odgovarajućih koeficijenata refleksije. Neke efikasne tehnike za proračun reflektiranog polja temelje se na primjeni koeficijenta refleksije koji proizlaze iz modificirane metode slike (MIT) te primjeni Fresnelovog koeficijenta refleksije za ravni val [39, 40, 41, 42, 43, 46, 47].

Prema [6, 38] i normama [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13] u Republici Hrvatskoj za proračun razina električnih polja visokih frekvencija u daljinskom polju antene koristi se model slobodnog prostora uz moguću primjenu jedinstvenog faktora refleksije u iznosu od 1,6 [12]. Prema aproksimaciji slobodnog prostora izraz za jakost električnog polja izvora izvodi se iz Poyntingovog vektora (gustoće snage) te je oblika [12]:

$$E_i = \frac{\sqrt{30 \cdot N \cdot EIRP \cdot 10^{\frac{G_i}{10}}}}{r_i} \quad (4.1)$$

gdje $EIRP$ predstavlja efektivnu izračenu snagu izotropnog izvora, N ukupan broj nosioca (aktivnih kanala), G ukupan dobitak antene po horizontalnom i vertikalnom dijagramu zračenja te r udaljenost od izvora.

U daljinskom polju antene ukupna jakost električnog polja može se dobiti zbrajanjem incidentne E_i i reflektirane komponente polja E_r [42]:

$$E = \sqrt{E_i^2 + E_r^2} \quad (4.2)$$

gdje je:

$$E_r = \Gamma_r \cdot \frac{\sqrt{30 \cdot N \cdot EIRP \cdot 10^{\frac{G_r}{10}}}}{r_r} \quad (4.3)$$

Pri tome je Fresnelov koeficijent refleksije oblika [47]:

$$\Gamma_r = \frac{Z_m \cdot \cos(\theta_i) - Z_n \cdot \cos(\theta_t)}{Z_m \cdot \cos(\theta_i) + Z_n \cdot \cos(\theta_t)} \quad (4.4)$$

gdje je $Z_{m,n}$ impedancija sredine m , odnosno n , θ_i kut incidencije, a θ_t kut transmisije.

Općenito se impedancija Z određuje iz:

$$Z = \sqrt{\frac{j\mu\omega}{\sigma + j\omega\varepsilon}} \quad (4.5)$$

Za višeslojnu podlogu koeficijent refleksije proizlazi iz:

$$\Gamma_r = \frac{\Gamma_{02} + \Gamma_{12} \cdot c}{1 + \Gamma_{02} \cdot \Gamma_{12} \cdot c} \quad (4.6)$$

gdje je $c = e^{-2\gamma l \cdot \cos(\beta_{01})}$, γ konstanta propagacije, a l debljina prvog sloja podloge. Kutevi incidencije i transmisije lako se određuju iz Senllovog zakona [48].

Kod MIT pristupa koeficijent refleksije podloge proizlazi iz [42, 43]:

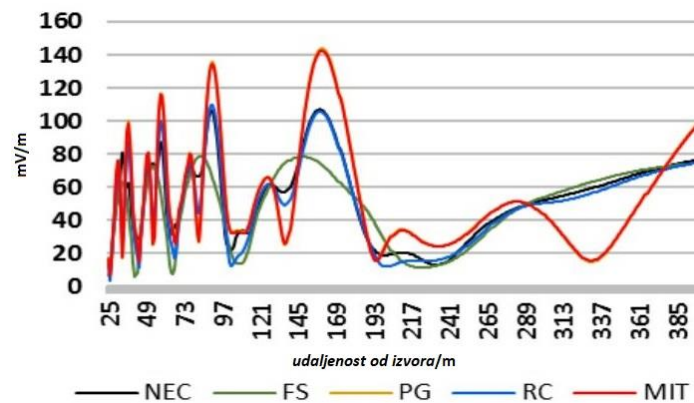
$$\Gamma_r = \frac{\varepsilon_{eff,m} - \varepsilon_{eff,n}}{\varepsilon_{eff,m} + \varepsilon_{eff,n}} \quad (4.7)$$

gdje je:

$$\varepsilon_{eff,m/n} = \varepsilon_{m/n} \cdot \varepsilon_0 + \frac{\sigma_{m/n}}{\omega i} \quad (4.8)$$

Ukupni koeficijent refleksije od višeslojne podloge proizlazi iz relacije (4.6) gdje je $c = e^{-2\gamma l}$.

U [42] uspoređene su vrijednosti električnog polja dobivene determinističkim modelima (model slobodnog prostora, modificirani model slike, model idealno vodljive podloge te model Fresnelovog koeficijenta refleksije) sa numeričkim rezultatima izvedenim u programskom alatu *Numerical Electromagnetics Code* (NEC) u kojoj je modelirana antena postavljena iznad dvoslojne, poluvodljive podloge na visinu od 40 m iznad tla (slika 4.2.).



Slika 4.2. Usporedba jakosti električnog polja dobivenog iz više determinističkih modela proračuna i numeričkom analizom u NEC-u (FS – model slobodnog prostora, PG – model idealno vodljive podloge, RC – model Fresnelovog koeficijenta refleksije, MIT – modificirani model slike) [42]

U bliskom polju antene za proračun jakosti električnog polja, odnosno gustoće snage, mogu se primijeniti algebarski izrazi navedeni u [12, 49].

Osim klasičnih proračuna razina EM polja, zanimljivo je razmotriti i tzv. "zasićenje" baznih stanica. Naime, prema [50] bazna stanica smatra se zasićenom ako se simulacijom utvrde razine polja koje su više ili jednake unaprijed definiranim vrijednostima koje ovise o graničnim razinama. Često se u izračunu zasićenja bazne stanice koristi i faktor α_{24} :

$$\alpha_{24} = \frac{1}{24} \cdot \sum \frac{P_{Tx}}{P_{MAX}} \quad (4.9)$$

gdje je P_{Tx} stvarna snaga odašiljanja tijekom 24 h, a P_{MAX} najveća moguća snaga odašiljanja.

Osim izbora metode proračuna, jedan od velikih izazova u procjeni razina EM polja jest njihova varijabilnost u vremenu [51]. Naime, prema [52] statističkom je analizom procijenjeno kako u 95 %, odnosno 99 % slučajeva bazna stanica odašilje sa 26 %, odnosno 32 % od ukupne snage.

5. MJERENJE RAZINA ELEKTRIČNOG POLJA I GUSTOĆE SNAGE

Da bi mjerenje razina EM polja bilo moguće, za to je potrebno imati odgovarajuću mjernu opremu koja udovoljava standardima [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13]. Osnovni dio mjerne opreme čine analizator frekvencijskog spektra, mjerna antena, optički kabeli te nevodljivi tronožac (slika 5.1.).



Slika 5.1. Osnovni dijelovi mjerne opreme

Korisno je istaknuti kako se jakost električnog polja obično mjeri uz pomoć prikladnih dipola, dok se jakost magnetskog polja mjeri korištenjem petlji [53]. Radi lakšeg praćenja mjerenja i upravljanja instrumentom poželjno je, u skladu s mogućnostima, analizator frekvencijskog spektra spojiti s računalom.

Prije svakog ispitivanja razina EM polja u okolini bazne stanice potrebno je proučiti dokumentaciju koja detaljno opisuje izvor polja. Neki od osnovnih podataka nužnih za kvalitetno izvođenje mjerenja i proračuna su:

- frekvencijsko područje izvora,
- smjer glavnog snopa zračenja,
- broj aktivnih kanala (nosioca),
- izračena snaga,
- mehanički nagib antene (mehanički tilt),
- električki nagib antene (električni tilt),
- tip antene,
- polarizacija vala i dr.

Iz dostavljenih podataka i zatečenog stanja na terenu određuje se lokacija antenskog stupa kao i visina antene iznad tla. Uz pomoć satelitskih snimki (*Google Earth, Geoportal* i sl.) istražuje se okolina bazne stanice (slika 5.2.) kako bi se pronašla područja u kojima se očekuje najviša razina EM polja.

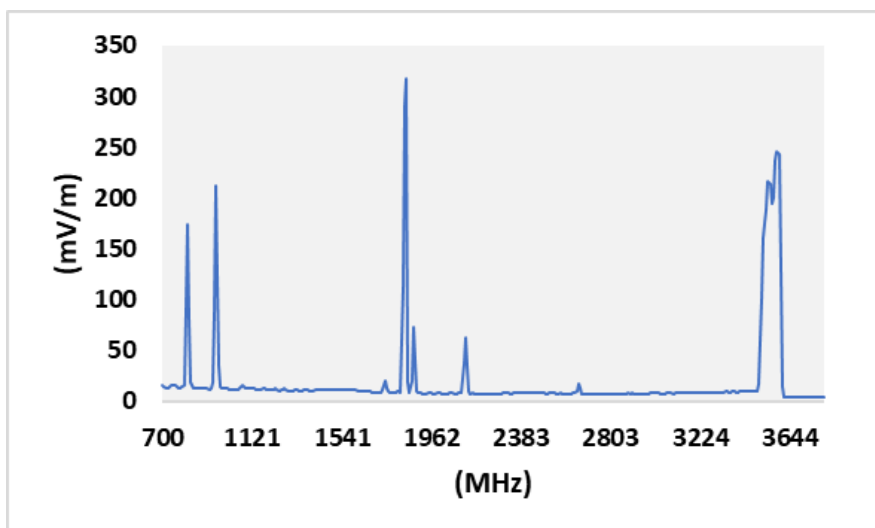


Slika 5.2. Položaj bazne stanice i smjerovi glavnih snopova zračenja (izvor: Google Earth)

Naime, s obzirom na situaciju na terenu (naselje, urbana sredina, krajolik, optičku vidljivost, udaljenost od izvora i dr.) te tehničke podatke izvora, mjeritelj odabire najmanje 6 točaka u kojima očekuje najviše razine polja. Za svaku mjernu točku potrebno je utvrditi nalazi li se u bliskom ili daljinskom polju izvora. U točkama koje se nalaze u bliskom polju izvora komponente električnog i magnetskog polja mjere se zasebno.

Rezultati mjerenja najčešće se prikazuju u apsolutnom iznosu, ali i kao usporedba sa dozvoljenim graničnim razinama. U slučaju više aktivnih kanala različitih frekvencija prikazuje se i kumulativni doprinos koji mora udovoljavati uvjetima propisanim u [6, 38]. Važno je naglasiti kako se rezultati mjerenja iskazuju uz unaprijed definiranu mjernu nesigurnost.

U pravilu se prethodno preglednim mjerenjem utvrđuje prisutnost aktivnih izvora unutar mjerenog frekvencijskog spektra (slika 5.3.).



Slika 5.3. Širokopojasno mjerenje u frekvencijskom opsegu između 30 MHz i 3 GHz

Detaljnim pregledom širokopojasnog frekvencijskog spektra utvrđuju se aktivni izvori čija se snaga zasebno mjeri.

6. 5G TEHNOLOGIJA

5G tehnologija nova je generacija mobilne mreže. Karakterizira ju veća pouzdanost, mogućnost povezivanja i upravljanja "pametnim" strojevima, objektima i različitim uređajima te velika brzina prijenosa podataka (slika 6.1.).



Slika 6.1. Mjerenje razina električnog polja 5G tehnologije – zabilježena brzina prijenosa podataka od približno 1,1 Gbps

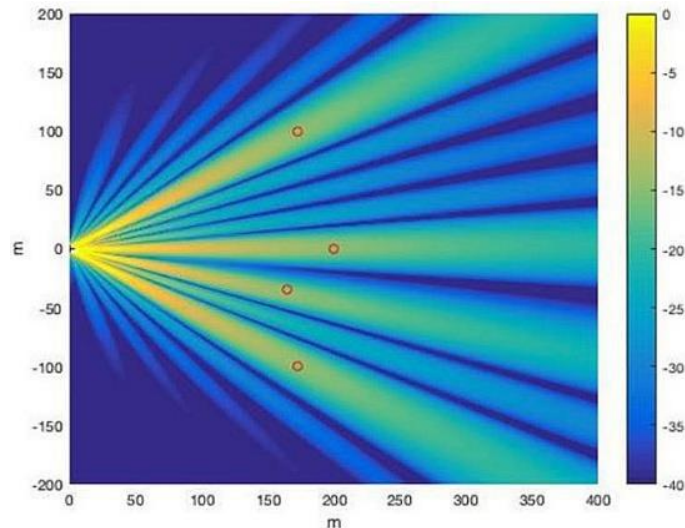
Primjena 5G tehnologije biti će široka: u industriji, poljoprivredi, medicini, prometu i dr. granama. 5G tehnologija još uvijek se razvija i postupno uvodi u uporabu, a za pretpostaviti je da će, osim na frekvencijama od približno 700 MHz, 2,1 GHz te 3,6 GHz, biti prisutna i na frekvencijskom opsegu između 24 GHz i 28 GHz [54, 55].

Obično se frekvencijsko područje za novu 5G tehnologiju dijeli u dvije skupine:

1. područje ispod 6 GHz i
2. područje iznad 6 GHz i ispod 50 GHz.

Zasada je najveća širina 5G signala u području ispod 6 GHz jednaka 100 MHz, a prema [56] širine signala u području iznad 6 GHz biti će i do 400 MHz.

Često se spominje kako 5G tehnologija počiva na MIMO sustavu (eng. *Multiple Input Multiple Output*), odnosno formiranju snopova zračenja (eng. *beamforming*) kako bi se povećala njena učinkovitost. Naime, MIMO tehnologija omogućit će visoku propusnost podataka, a osim što pojačava performanse bazne stanice, MIMO sustav omogućava usmjeravanje energije u oštre snopove (slika 6.2.) prema korisniku [18, 52].

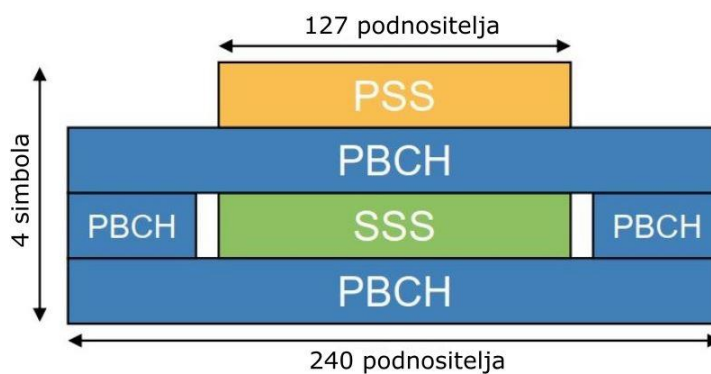


Slika 6.2. Primjer raspodjele polja u MIMO sustavu (eng. beamforming) [51]

Za spomenuti je kako se ovakvim uskim snopovima povećava dobitak antene. Primjerice, klasične antene imaju dobitak od približno 17 dBi, dok antene s mMIMO sustavom imaju dobitak od približno 24 dBi [57].

Kada se govori o strukturi 5G signala, važno je spomenuti da je najmanja fizička jedinica u 5G tehnologiji predstavljena 1 podnositeljem i 1 OFDM simbolom što zajedno čini 1 izvorišni element (eng. *Resource Element*, RE). 12 takvih elemenata čini jedan blok (eng. *Resource Block*, RB) [51].

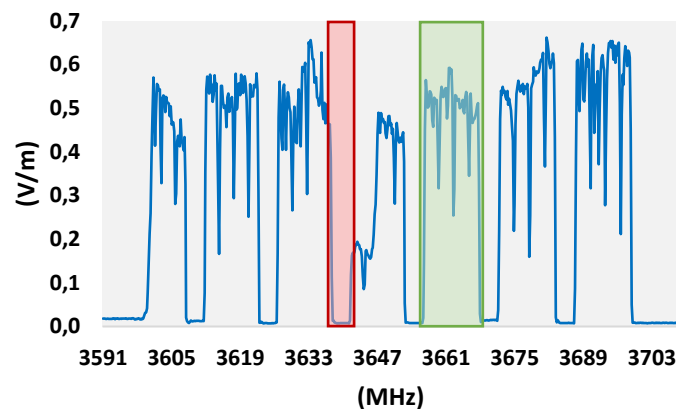
Jedan od osnovnih blokova 5G signala svakako je sinkronizacijski blok (SSB). SSB se sastoji od 240 podnositelja u frekvencijskoj domeni, odnosno 4 OFDM simbola u vremenskoj domeni [51], a sadrži tzv. PSS, SSS, PBCH i PBCH DM-RS signale (slika 6.3.). Značajka SSB-a je da se uvijek emitira periodički pri konstantnoj snazi [51, 58].



Slika 6.3. Struktura SSB-a u vremenskoj i frekvencijskoj domeni [59]

PSS označava primarni sinkronizacijski signal i sastavljen je od 127 elemenata. SSS označava sekundarni sinkronizacijski signal koji također zauzima 127 elemenata. PSS i SSS služe za vremensku i frekvencijsku sinkronizaciju uređaja s baznom stanicom. Većinu pak sinkronizacijskog bloka zauzimaju tzv. PBCH DM-RS signali nužni za demoduliranje PBCH kanala.

Većina implementiranih 5G sustava radiće u tzv. TDD (eng. *Time Division Duplexing*) načinu rada. TDD označava izmjenu silaznih (eng. *downlink*) i uzlaznih (eng. *uplink*) slotova na jednakim frekvencijama u određenim vremenskim odmacima [53, 60]. Prema [56] približno 74 % ukupne širine 5G signala rezervirano je za silaznu vezu (eng. *downlink*, slika 6.4.).



Slika 6.4. Prikaz silazne (*downlink* – zeleni kvadrat) i uzlazne (*uplink* – crveni kvadrat) veze u frekvencijskom području 5G tehnologije

Osim u TDD, moguća je implementacija sustava i u FDD (eng. *Frequency Division Duplexing*) načinu rada. Osnovna razlika je što se u TDD načinu rada izmjenjuju uzlazna i silazna veza, dok je u FDD načinu rada prijenos na frekvenciji nositelja kontinuiran [56].

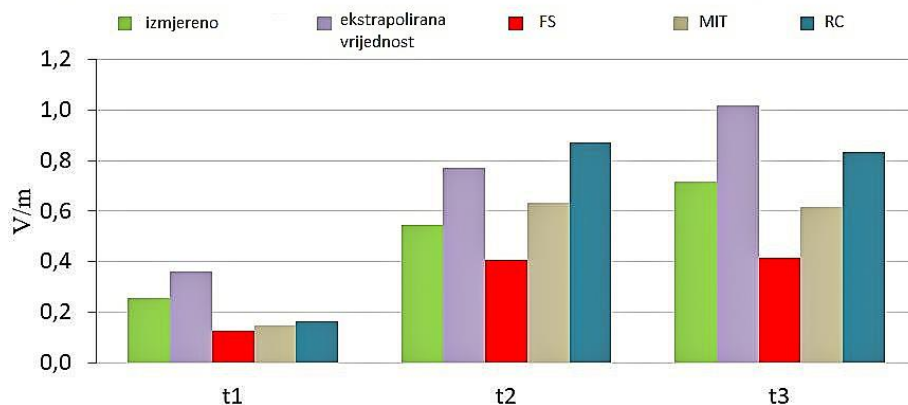
6.1. Mjerne metode 5G tehnologije – State of the art

U Republici Hrvatskoj izdane su upute za mjerenje razina elektromagnetskih polja [61] gdje su detaljno opisani postupci mjerenja različitih radiokomunikacijskih tehnologija (FM radio, DVB-T2 odašiljači, tehnologije 2G, 3G i 4G itd.). 5G tehnologija relativno je nova, kako u Hrvatskoj tako i u svijetu. Zbog svoje kompleksnosti i drugačije operativnosti, do pisanja ovog rada nije izdana posebna uputa za mjerenje razina polja proizvedenih 5G tehnologijom. Iako su neke države usvojile strategiju mjerenja (primjerice [62]), još uvijek nema općeprihvaćenog

načina za mjerenje razina polja 5G tehnologije. Ipak, brojna istraživanja se u posljednje vrijeme bave upravo tom problematikom [44, 52, 56, 58, 62, 63, 64].

Izračena snaga 5G bazne stanice uvelike ovisi o količini podatkovnog prometa, baš kao što je to slučaj s GSM, UMTS ili LTE tehnologijama. Zbog toga se često može dogoditi da izmjerene razine električnog polja, odnosno gustoće snage budu daleko niže od najvećih mogućih vrijednosti. Stoga se preporučuje mjerenje bazirati na signalima čije emitiranje ne ovisi o prometu, a onda primijeniti ekstrapolaciju na izmjerene vrijednosti [64, 65]. U dosadašnjim tehnologijama ekstrapolaciju nije bilo teško primijeniti. Naime, na izmjerenu snagu nosioca (eng. *Pilot Signal*) primijenio bi se određeni faktor (npr. ukupan broj nosioca) [12, 39, 56].

U [39] dana je usporedba rezultata mjerenja jakosti električnog polja uz primjenu ekstrapolacije i različitih modela proračuna za tehnologiju GSM (slika 6.5.).



Slika 6.5. Usporedba rezultata mjerenja i proračuna jakosti električnog polja GSM tehnologije u mjernim točkama t1, t2 i t3 [39] (FS – model slobodnog prostora, RC – model Fresnelovog koeficijenta refleksije, MIT – modificirani model slike) [39]

Kod 5G tehnologije proces je pak složeniji zbog problematike određivanja referentnog mjerenog signala, aktivnih antena (antena koje mijenjaju dijagram zračenja) i dr.

U novijim istraživanjima [56] spominje se više faktora uključenih u ekstrapolaciju rezultata mjerenja kao što su dobitak snage zbog prometa u odnosu na snagu sinkronizacijskog bloka, ukupan broj podnositelja, vrijeme trajanja radnog ciklusa signala, omjer prosječne i najveće snage SSB-ova i dr.

Jedna od najznačajnijih razlika između 4G i 5G tehnologije je u položaju sinkronizacijskih signala (eng. *Synchronization Signals, SS*): primarnog (eng. *Primary Synchronization Signal, PSS*) i sekundarnog (eng. *Secondary Synchronization Signal, SSS*) sinkronizacijskog signala. Sinkronizacijski signali prvi su oblik informacije između mobilnog uređaja i bazne stanice [66]. Sinkronizacijski signali kod LTE (4G) tehnologije uvijek su na sredini kanala što ih čini jednostavnima za pronaći. Kod 5G tehnologije sinkronizacijski signali dio su tzv. SS/PBCH bloka (SSB) kojeg čini još i tzv. PBCH (eng. *Physical Broadcast Channel*) i demodulacijski signal (PBCH-DMRS), a koji može biti smješten bilo gdje unutar kanala (nosioca).

Mjerna metoda određuje se tako da bude što više praktična, uz uvjet da pruža što točniju vrijednost razine EM polja izbjegavajući njeno pod-, odnosno predimenzioniranje te izvediva u obje domene: frekvencijskoj i vremenskoj [62]. U literaturama [44, 52, 56, 58, 62, 63, 64] opisane su metode mjerenja: kodno-selektivno mjerenje (eng. *Code-Selective Method, CSM*) i spektralna metoda (eng. *Frequency Selective Method, FSM*), kao i mogućnosti ekstrapolacije izmjerenih rezultata. Dvije su osnovne metode ekstrapolacije opisane u [65]:

- frekvencijska selektivna ekstrapolacija i
- ekstrapolacija zasnovana na SS demodulaciji.

6.2. Kodno selektivno mjerenje

Procedura izvođenja kodno selektivnog mjerenja (CSM) može biti nešto drugačija od slučaja do slučaja [51, 62]. Ova metoda općenito se zasniva na otkrivanju signala koji su uvijek aktivni i emitirani konstantnom snagom. Kod GSM tehnologije to je tzv. *Broadcast Control Channel* (BCCH), kod UMTS tehnologije *Primary-Common Pilot Channel* (P-CPICH), a kod LTE tehnologije *Cell-Specific Reference Signal* (CRS) sadržan unutar tzv. *Physical Downlink Shared Channel* (PDSCH) [56].

Kod 5G tehnologije nužno je pak prepoznati tzv. sekundarni sinkronizacijski signal (SSS). U pravilu, 5G tehnologija može koristiti dvije vrste snopova zračenja: tzv. snop odašiljanja signala (eng. *broadcast beam*) i snop pri podatkovnom prometu (eng. *traffic beam*) koji se javlja po potrebi. Snop odašiljanja signala širi je od snopa pri podatkovnom prometu, ali i manje usmjeren. Njegova uloga je slanje osnovnih informacija (eng. *Information of Interest*). Kontrolni signali mogu biti transmitirani ili u jednoj ili u drugoj vrsti snopa, ovisno o njegovoj

krajnjoj upotrebi, no SS/PBCH signal uglavnom je transmitiran u snopu odašiljanja signala [63].

Dakle, SSS je smješten unutar sinkronizacijskog bloka, tzv. SS/PBCH (SSB), koji zauzima širinu spektra između 3,6 MHz i 7,2 MHz, a sastoji se od 4 OFDM (eng. *Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*) simbola te sadrži tzv. demodulacijski signal (eng. *Demodulation Reference Signal, DM-RS*) koji nosi identifikacijski broj ćelije. SSS se sastoji od 127 elemenata, a zauzima širinu spektra između 1,905 MHz i 3,810 MHz [62].

Prema [62] prilikom mjerenja CSM metodom determiniraju se svi SS/PBCH blokovi (indeksa 'i'), odnosno DM-RS signali (indexa 'j'). Za svaki PBCH blok indeksa 'i' mjeri se jakost električnog polja elementa SSS-a, $E_{i,j}^{SSS(RE)}$. Dobivena vrijednost ekstrapolira se poznavajući potrebne ekstrapolacijske faktore.

U [51, 63] navodi se nešto drugačiji postupak. Naime, ukupna razina polja određuje se iz jakosti polja jednog izvorišnog elementa (*Resource Element*) uz pomoć radnog ciklusa F_{TDC} (eng. *duty cycle*, nekad označen i kao F_{TDD}) i broja podnositelja N_{sc} :

$$E_{5G}^{max} = \sqrt{N_{sc} \cdot F_{TDC}} \cdot E_{RE}^{max} \quad (6.2.1)$$

Vrijednost E_{RE}^{max} zapravo predstavlja snagu na konektoru mjerne opreme P_{RE}^{max} kojoj se pridodaje faktor antene AF , karakteristična impedancija Z_{in} te prigušenje kabela G_c :

$$E_{RE}^{max} = \sqrt{\frac{P_{RE}^{max} \cdot Z_{in}}{G_c}} \cdot AF \quad (6.2.2)$$

CSM mjerenje u prednosti je iz razloga što rezultira točnijim rezultatom kako mjerenja, tako i ekstrapolacije izmjerenih vrijednosti na najgori mogući slučaj (najveće opterećenje bazne stanice). Kako je već opisano u izrazu (6.2.1) pri TDD modu rada u ekstrapolaciju rezultata potrebnu je uključiti i korektivni faktor zbog radnog ciklusa, tzv. F_{TDC} [44, 56, 67].

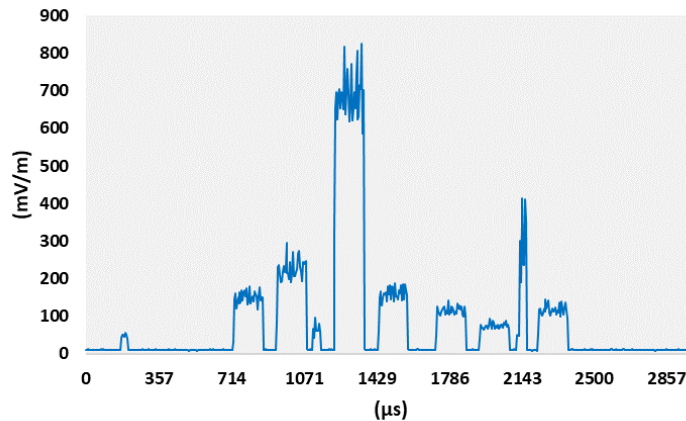
6.3. Spektralna metoda mjerenja

Spektralna metoda mjerenja (FSM) provodi se u vremenskoj domeni (*eng. zero-span mode*), a također je bazirana na mjerenju SSS signala uz prikladno odabrane mjerne opcije (*maximum-hold, RMS-detector, sweep time, i dr.*).

Najviša vrijednost $E_{i,max}^{SSS(RE)}$ računa se iz:

$$E_{i,max}^{SSS(RE)} = E_{i,max}^{measured} \cdot \sqrt{\frac{1}{127} \cdot K_i^{FSM} \cdot \max(K_i(\varphi_i, \theta_i))} \quad (6.3.1)$$

gdje $E_{i,max}^{measured}$ predstavlja najvišu izmjerenu jakost električnog polja SSS signala (slika 6.6.), K_i^{FSM} faktor koji može iznositi $\sqrt{2}$ u slučaju pojave više od jednog snopa po sektoru (ćeliji), odnosno 1 u slučaju da pojedini sektor sadrži samo po jedan snop, a $K_i(\varphi_i, \theta_i)$ ekstrapolacijski faktor ovisan o azimutu φ_i , odnosno elevaciji θ_i [62].



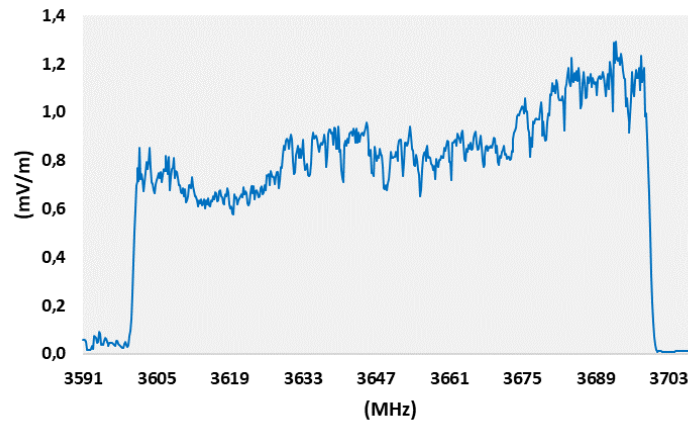
Slika 6.6. Prikaz SS blokova u vremenskoj domeni

Nešto drugačiji pristup mjerenju u vremenskoj domeni dan je u [51]. Prema tom istraživanju prvotno se izmjeri najviša jakost električnog polja izvorišnog elementa E_{RE}^{max} koja se množi s korijenom ukupnog broja podnositelja i korijenom faktora F_{TDD} za koji se često uzima vrijednost od 0,75. Jakost polja izvorišnog elementa dobije se iz jakosti PBCH-DMRS signala $E_{RE,max}^{PBCH-DMRS}$ pomnoženog s korijenom faktora F_{beam} koji je pak jednak omjeru razine polja podatkovnog prometa i razine polja razine polja signalnog prometa. Stoga se ukupna jakost polja može zapisati kao:

$$E_{5G}^{max} = \sqrt{N_{SC} \cdot F_{TDD} \cdot F_{beam}} \cdot E_{RE,max}^{PBCH-DMRS} \quad (6.3.2)$$

6.4. Channel Power mjerenje

Za svaki aktivni kanal vrši se tzv. kanalno ili uskopojasno mjerenje u skladu sa pravilno postavljenim mjernim postavkama (iz uputa proizvođača mjernog uređaja. Pri tome bitno je poznavati centralnu frekvenciju aktivnog kanala i njegovu širinu. Prema [58, 61] preporuka postavki instrumenta jest mjerenje s uključenom "max-hold" opcijom uz prikladni RBW (eng. *Resolution Bandwidth*) uz dovoljno dugo vrijeme prebrisa (eng. *sweep time*, slika 6.7.).



Slika 6.7. Kanalno mjerenje aktivnog signala 5G tehnologije na centralnoj frekvenciji od 3,65 GHz

Trajanje mjerenja preporučeno je na 6 min, ali u pravilu mjerenje se izvodi dovoljno dugo dok se ovojnica aktivnog kanala ustabili. U istraživanju [56] napravljena je usporedba mjernih rezultata 5G tehnologije dobivenih CSM metodom mjerenja i tzv. *Channel Power* metodom kakva je za pojedinu tehnologiju opisana u [61]. Uspoređeni rezultati pokazuju vrlo dobru podudarnost.

6.5. Mjerenje 5G tehnologije u Republici Hrvatskoj

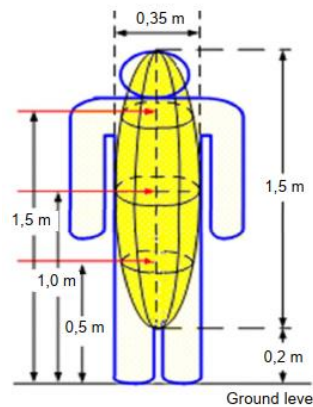
Ovisno o prirodi signala, odnosno tehnologije, mjerenje se vrši u frekvencijskoj ili vremenskoj domeni. Jednostavnosti radi, sve komunikacijske tehnologije (2G – 5G) u pravilu se mjere u frekvencijskoj domeni. U Republici Hrvatskoj još nije prihvaćena metodologija mjerenja polja 5G tehnologije. Mjerenje razina EM polja provodi se prema [6, 38], normama [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13] te uputama Hrvatske regulatorne agencije za mrežne djelatnosti [61].

Prema uputama iz [61] u svakoj mjernoj točki provodi se mjerenje razina EM polja na visini od 1,5 m iznad tla, a prema potrebi, radi uprosječenja razina, na tri visine: 1,1 m, 1,5 m i 1,7 m iznad tla. Mjerna antena mora biti postavljena na nevodljivi nosač (npr. drveni tronožac), a u njenom radijusu od 1,5 m nije poželjno prisustvo ljudi i objekata. Važno je istaknuti kako se sva mjerenja u frekvencijskom opsegu 87 MHz – 2500 MHz provode u frekvencijskoj domeni u trajanju od 6 minuta po aktivnom kanalu.

7. ELEKTROMAGNETSKO-TOPLINSKO MODELIRANJE LJUDSKOG TIJELA

Danas se u komunikacijskoj tehnologiji najčešće koristi frekvencijski spektar između 100 MHz i 3,8 GHz. Budući da je jedini poznati štetni učinak takvih radiofrekvencijskih (RF) izvora povišenje temperature u odnosu na površini tkiva, u istraživanjima se pribjegava stvaranju termalnih modela tkiva za široki frekvencijski spektar [68].

Kako bi se mogao odrediti utjecaj EM polja na ljudski organizam, potrebno je na zadovoljavajući način modelirati tijelo, odnosno tkivo čovjeka. U tu svrhu mogu se rabiti pojednostavnjeni modeli ljudskog tijela poput kvadra ili cilindra kakav je opisan primjerice u [69, 70] (slika 7.1.).



Slika 7.1. Model ljudskog tijela [11]

Također, potrebno je definirati i dielektrična svojstva tkiva ovisna o frekvenciji. To je naročito bitno u modeliranju površinskog tkiva budući da pri višim frekvencijama, a posebno pri frekvencijama iznad 6 GHz, koža apsorbira najveći dio EM energije.

Za modeliranje tkiva često se u milimetarskom području upotrebljava tzv. 1D model. Prikladan je zbog činjenice da se difuzija topline odvija do svega nekoliko centimetara ispod površine kože [71]. 1D model predstavljen je poluvodljivom površinom izloženom upadnom ravnom valu. Može se, ovisno o zahtjevima istraživanja, modelirati kao jednoslojna ili višeslojna sredina. U istraživanju [71] dokazano je da je temperaturna elevacija u slučaju troslojnog 1D modela veća za oko 1,3 – 2,8 puta u odnosu na jednoslojni model. Stoga se može zaključiti kako porast temperature na površini tkiva uvelike ovisi o modelu potkožnog tkiva.

Da bi se moglo govoriti o refleksiji, transmisiji i apsorpciji EM energije milimetarskih valova u tkivu, nužno je poznavati dielektrična svojstva kože. Osim o dielektričnim svojstvima,

refleksija, odnosno transmisija energije ovise i o polarizaciji električnog vala, kao i o kutu upada.

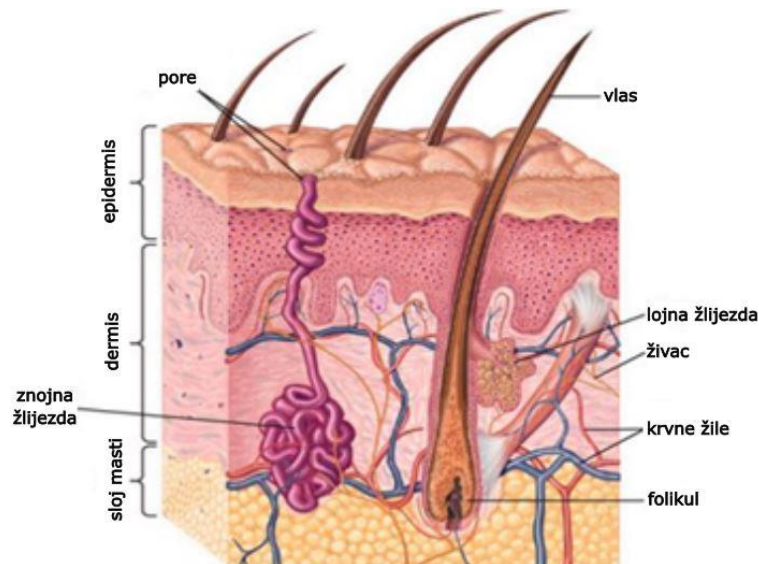
Koža se sastoji od dva osnovna dijela: epidermisa i dermisa. Negdje se može pronaći i poseban opis masnog tkiva koji leži ispod dermisa, a naziva se hipodermis [72].

Kroz epidermis ne protječe krv, a sastoji se od 5 slojeva:

- rožnati sloj (*stratum corneum*),
- svijetli sloj (*stratum lucidum*),
- zrnati sloj (*stratum granulosum*),
- trnasti sloj (*stratum spinosum*) i
- bazalni sloj (*stratum basale*).

Kroz dermis se provlače krvne žile, ali i živčani sustav koji prenosi osjećaj boli i iritacije. Sastoji se od dva sloja: papilarni i retikularni sloj [30]. Hipodermis je smješten ispod dermisa, a sastoji se od masnog i vezivnog tkiva. Budući da se masno tkivo ponaša kao toplinski izolator, ovaj sloj kože predstavlja svojevrsnu temperaturnu barijeru [30].

Detaljnija struktura kože, odnosno potkožnog tkiva vidljiva je na slici 7.2. [73].



Slika 7.2. Prikaz strukture kože čovjeka [73]

Debljina kože je različita i ovisna o regiji tijela koja se promatra. Prema [30] prosječna debljina epidermisa kod muškarca iznosi 0,141 mm, a kod žene 0,124 mm. Neki izvještaji pak govore o debljini epidermisa između 0,1 mm i 0,7 mm, ovisno o dijelu tkiva [72]. Slično tome, prosječna debljina dermisa kod muškarca iznosi 1,065 mm, a kod žene 0,917 mm dok ukupna prosječna

debljina kože kod muškarca iznosi 1,21 mm, a kod žene 1.04 mm. Prosječna debljina kože kod muškarca veća je dakle za oko 16% u odnosu na ženu [30]. Druga istraživanja [37] navode debljinu epidermisa između 0,06 i 0,1 mm, a dermisa između 1,2 i 2,8 mm. U [72] navodi se debljina dermisa između 1,0 mm i 2,0 mm, a debljina rožnatog sloja u iznosu od 0,012 mm do 0,018 mm.

Apsorpcija EM energije ovisi o sadržaju vode pojedinog sloja tkiva. Epidermis i dermis imaju približno jednak sadržaj vode pa se često mogu modelirati kao jedan sloj (jedan medij). Prema [72] ukupni sadržaj vode unutar dermisa i epidermisa iznosi između 65 % i 70 %, dok hipodermis sadrži jako malo vode. Važno je napomenuti kako sadržaj vode u masnom tkivu može varirati, odnosno ovisi od osobe do osobe (životna dob, fiziološka kondicija i dr.) [30].

Iako dielektrična svojstva tkiva nisu dovoljno istražena, mnogi se pozivaju na istraživanja nekoliko istaknutih znanstvenika na tu temu: Fostera, Ziskina, Gabriele i Sasakiya. Rezultati njihovih istraživanja dali su jako slične vrijednosti relativne permitivnosti tkiva. No, valja napomenuti kako su u ovim istraživanjima mjerenja provođena do nekoliko desetaka GHz, a za više frekvencije (do 100 GHz) izvedena je ekstrapolacija rezultata izmjerenih na nižim frekvencijama.

Različita istraživanja nude različite metode izračuna kompleksne relativne permitivnosti tkiva [37, 74, 75]. Jedan od poznatijih modela svakako je Debyeova jednadžba [76]:

$$\varepsilon^* = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_0}{1 + j\omega\tau} \quad (7.1)$$

gdje je $\omega = 2\pi f$, f frekvencija EM vala, τ vrijeme relaksacije, j imaginarna jedinica, ε_s permitivnost pri $\omega\tau \ll 1$, ε_∞ optička permitivnost te ε_0 permitivnost vakuuma.

Uz nešto drugačiju formulaciju permitivnost kože može se izračunati i iz izraza [30, 70, 72, 77]:

$$\varepsilon_i^* = \varepsilon_{\infty i} + \frac{\Delta\varepsilon_i}{1 + j\omega\tau} + \frac{\sigma_i}{j\omega\varepsilon_0} \quad (7.2)$$

gdje je $\Delta\varepsilon_i = \varepsilon_{si} - \varepsilon_{\infty i}$ magnituda disperzije frakcije slobodne vode u sloju tkiva i , ε_s statička relativna permitivnost pri $\omega\tau \ll 1$, ε_∞ relativna permitivnost pri $\omega\tau \gg 1$, σ_i specifična vodljivost sloja i , a τ vrijeme relaksacije (često je pretpostavljeno da iznosi $6,9 \cdot 10^{-12}$ s) [30].

Prema [37, 78] dielektrična svojstva kože proizlaze iz relativne permitivnosti koja se može odrediti iz:

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (7.3)$$

gdje je ε' relativna permitivnost, a ε'' jednaka je:

$$\varepsilon'' = \frac{\sigma}{2\pi f \varepsilon_0} \quad (7.4)$$

Neke od mogućih vrijednosti varijabli iz jednadžbi (7.1 – 7.4.) prikazani su u tablici ispod [30]:

Tablica 7.1. Parametri tkiva prema [30] (SC – Stratum Corneum, E – epidermis, D - dermis) [30]

Parametar	troslojni model			četveroslojni model			
	SC	E+D	masti	SC	E+D	masti	mišići
ε_∞	2,96	4,0	2,5	2,96	4,0	2,5	4,0
$\Delta\varepsilon$	1,5	32,4	3,0	1,5	32,4	3,0	50,0
d/m	0,015	1,45	∞	0,015	1,45	1 - 6	∞
$\sigma/S/m$	0	1,4	0,01	0	1,4	0,01	0,1
$\tau \cdot 10^{12}/s$	6,9	6,9	7,96	6,9	6,9	7,96	7,23

Prema [37] relativna permitivnost kože opada porastom frekvencije. Sa druge pak strane, vodljivost kože raste povećanjem frekvencije. Rezultati istraživanja relativne permitivnosti kože pri izloženosti poljima od 60 GHz razlikuju se, a neke vrijednosti prikazane su u tablici 7.2. [72].

Tablica 7.2. Relativna permitivnost kože pri izloženosti poljima od 60 GHz [72]

Istraživanje br.	ε^*	$T/^\circ$	metoda	uzorak
1	7,98 - j10,90	37	ekstrapolacija	<i>in vivo</i>
2	8,89 - j13,15	37	ekstrapolacija	<i>in vitro</i>
3	8,05 - j4,13	24 – 26	mjerenje	<i>in vivo</i>
4	9,90 - j9,00	23	mjerenje	<i>in vitro</i>
5	13,20 - j10,30	37	ekstrapolacija	<i>in vitro</i>
6	8,12 - j11,14	20 – 22	mjerenje	<i>in vivo</i>
7	9,38 - j12,49	30	pretpostavka	-

Slični rezultati objavljeni su i u istraživanju [79], tablica 7.3.

Tablica 7.3. Relativna permitivnost kože pri izloženosti poljima različitih frekvencija [79]

f/GHz	Izmjerena permitivnost pri temperaturi $T/^\circ$		permitivnost ekstrapolirana za temperaturu $T = 37^\circ\text{C}$
57 – 63	9,9 - j9,1	23	13,2 - j10,4
60	9,9 - j9,0	23	13,2 - j10,3
76 – 78	10,4 - j3,3	30	12,1 - j3,5
77	10,4 - j3,2	30	12,1 - j3,4
84	9,5 - j3,5	30	11,1 - j3,8
90 – 100	7,9 - j3,0	30	9,2 - j3,2
90	7,9 - j3,0	30	9,2 - j3,2
94	7,5 - j2,9	30	8,7 - j3,1

Iako se pri izračunu promjene temperature tkiva uslijed izloženosti EM valu mnoge veličine aproksimiraju ili uzimaju s određenim rasponom, varijabilnost dielektrične konstante prema [71] može se zanemariti.

Površina kože aproksimira se kao poluvodljiva ravna površina. Val koji upada na površinu kože može biti paralelno polariziran (E komponenta polja paralelna je površini kože, TM) ili okomito polariziran (E komponenta okomita je na upadnu površinu, TE) Sukladno tome, zasebno se određuju koeficijenti refleksije [37].

Prema [73] refleksija uvelike ovisi o sadržaju vode. Naime, koža s manjom količinom vode u svom sastavu ujedno ima i smanjenu refleksiju upadne energije. Prema istom istraživanju srednja vrijednost refleksije pri upadu EM vala frekvencije između 80 GHz i 100 GHz na različita područja ruke iznosi između 0,55 i 0,70.

Valja istaknuti kako gotovo sva snaga biva apsorbirana pri upadnom kutu između 65° i 80° (Brewsterov kut) pri frekvenciji EM vala od 60 GHz [37].

Koeficijent refleksije po sloju tkiva može se odrediti uz Fresnelov model uz koji je blisko povezana i dubina prodiranja u tkivo [72].

$$R = \left| \frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1} \right|^2 \quad (7.5)$$

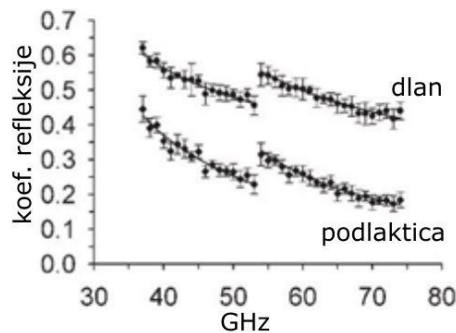
gdje je $n_0 = 1$ za zrak, a $n_i = \sqrt{\varepsilon_i}$, s tim da za kožu vrijedi $n_i = n_i' - jn_i'' = \sqrt{\varepsilon_i' - j\varepsilon_i''}$ gdje je $i = 1, 2, 3, \dots, n$ sloj kože.

Dubina prodiranja ili debljina sloja kože jednaka je:

$$\delta = \frac{c}{\omega} \cdot n'' \quad (7.6)$$

gdje c predstavlja brzinu svjetlosti, a $\omega = 2\pi f$.

U [72] navodi se kako koeficijent refleksije opada porastom frekvencije.



Slika 7.3 Koeficijent refleksije u ovisnosti o frekvenciji za dijelove podlaktice i dlana [72]

U ovisnosti o paralelnoj odnosno okomitoj polarizaciji upadnog vala definiraju se i posebni koeficijenti refleksije. Prema [37] između 34 % i 42 % incidentne snage reflektira se od površine kože pri frekvenciji od 60 Hz. Istraživanja [24, 25] navode da 40 % do 60 % incidentne energije na frekvenciji od 60 GHz prodre preko epidermisa do dermisa, a između 0,1 % i 10 % energije do masnog tkiva. Prema tome, modeliranje tkiva uz ograničavanje na sloj epidermisa i dermisa postaje zadovoljavajuće u svrhu promatranja EM dozimetrije na frekvenciji od 60 GHz i više. Valja napomenuti kako odjeća na koži može povećati ili smanjiti količinu transmitirane energije u tkivo, u ovisnosti o debljini tkanine, vrsti tkanine te razmaku između kože i odjeće.

Kako je već spomenuto, pri milimetarskim valovima dubina penetracije energije iznosi svega nekoliko milimetara, ili čak i manje od 1 mm, što dovodi do lokalnog zagrijavanja tkiva. Glavni apsorber energije u tkivu je voda koja ujedno i definira njegova dielektrična svojstva. Stoga je u model kože osim njene debljine, jako bitno definirati i sadržaj vode. S obzirom na sadržaj vode različiti slojevi mogu se aproksimirati u jedan zajednički sloj.

Prema [52] moguće je za milimetarske valove definirati troslojno tkivo koje se sastoji od rožnatog sloja (*stratum corneum*), zajedničkog sloja epidermisa i dermisa te masnog sloja tkiva. U istraživanju [77] troslojno je pak tkivo modelirano od sloja kože, masti i mišića. Na nešto nižim frekvencijama ($f < 30$ GHz) poželjno je tkivo modelirati s 4 sloja: dva različita sloja kože (rožnati sloj te sloj epidermisa i dermisa), sloj masti te sloj mišića (slika 7.4.).



Slika 7.4. Troslojni i četveroslojni model tkiva prema gdje je 1- rožnati sloj (*Stratum Corneum*), 2- epidermis i dermis [52]

U [80] provedena je međusobna usporedba rezultata proračuna gustoće snage na površini tkiva uslijed izloženosti zračenju različitih antena, odnosno povišenja tjelesne temperature u ovisnosti o:

- modelu antene,
- radnoj frekvenciji,
- modelu ljudskog tkiva te
- udaljenosti antene od tkiva.

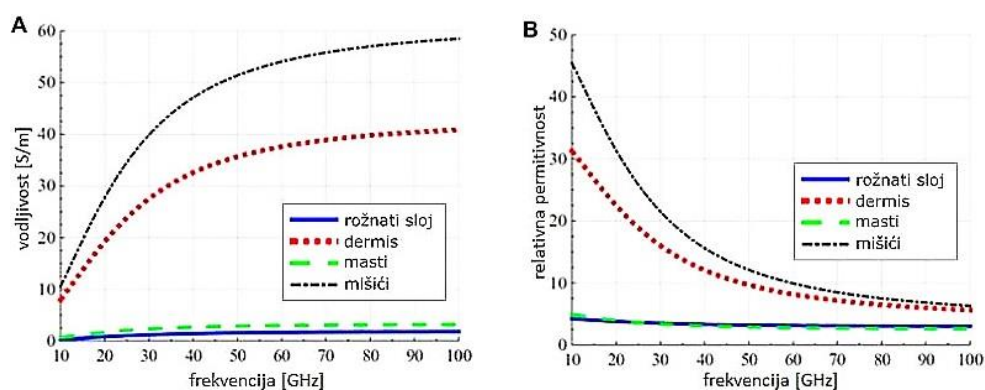
Model tkiva sastojao se od jednog, tri, odnosno četiri sloja. Parametri korištenog troslojnog modela tkiva prikazani su u tablici 7.4.

Tablica 7.4. Svojstva modeliranog troslojnog tkiva (k – toplinska vodljivost, B – volumni protok krvi i ρ – gustoća) [80]

Sloj	debljina/mm	$k/W/(m \cdot ^\circ C)$	$B/W/(m^3 \cdot ^\circ C)$	$\rho/kg/m^3$
koža	1,2 – 2	0,37 – 0,42	7,441 – 9,100	1,109 – 1,125
masti	3,8 – 12	0,21 – 0,25	1,700 – 1,903	911 – 916
mišići	14,5 – 16	0,49 -0,5	2,230 – 2,700	1,047 – 1,090

Slični parametri mogu se pronaći i u [35, 37, 77, 81, 82, 83].

Važno je pak napomenuti kako dielektrična svojstva tkiva ovise o frekvenciji EM vala. Tako je primjerice u [84] prikazana ovisnost specifične vodljivosti (slika 7.5.A), odnosno relativne permitivnosti tkiva o frekvenciji (slika 7.5.B).



Slika 7.5. Dielektrična svojstva tkiva u ovisnosti o frekvenciji EM polja [84]

Prema [77] varijacije u dielektričnoj permitivnosti u području milimetarskih valova sežu do 35 %. U [85] grafički je pak prikazana ovisnost relativne permitivnosti odnosno specifične vodljivosti različitih organa i dijelova tkiva od čega su najvažniji rezultati vezani uz masno tkivo, mišiće te kožu.

Pod toplinskim učincima EM polja podrazumijeva se apsorpcija energije u iznosu višem od onog kojeg se može kompenzirati termoregulacijskim kapacitetima organizma. Toplinski procesi stoga se najčešće opisuju jednadžbom prijenosa topline poznatom pod nazivom Pennesova jednadžba prijenosa topline (eng. *Penne's Bio-Heat Transfer Equation*, BHTE) [69] koja je oblika:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k\nabla T) + w_b c_b (T_a - T) + q_m \quad (7.7)$$

gdje je $T = T_t - T_b$ temperature lokalnog tkiva, T_b temperatura arterijske krvi, $\lambda = BF \cdot \rho \cdot C_b / k$ uz BF volumni protok, ρ gustoća, odnosno C_b specifični toplinski kapacitet krvi, k toplinska vodljivost sloja tkiva, a q_m gustoća toplinskih izvora uslijed metaboličkih procesa [30].

Za izračun porasta temperature u pojedinom sloju tkiva, uz određene aproksimacije može se primijeniti i pojednostavljena jednodimenzionalna jednadžba prijenosa topline u stacionarnom stanju danom izrazom:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \lambda T - \frac{Q(z)}{k} \quad (7.8)$$

Nešto drugačija formulacija dana je u istraživanju [77]:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\kappa_n \cdot \frac{\partial T_n(z)}{\partial z} \right) + \sigma_n \cdot |E(z)|^2 - b_n \cdot \{T_n(z) - T_b\} + A_n = 0 \quad (7.9)$$

gdje je $E(z)$ efektivna vrijednost električnog polja, σ_n električna vodljivost, κ_n toplinska vodljivost, b_n perfuzija krvi (prokrvljenost), A_n gustoća toplinskih izvora uslijed metaboličkih procesa, T_b temperatura krvi, a $T_n(z)$ distribucija topline u sloju tkiva n .

Osim prijenosa topline unutar tkiva, u obzir se mogu uzeti i "toplinski gubici" od kojih je najznačajniji onaj uzrokovan konvekcijskim hlađenjem zrakom na površini kože. Često se takav gubitak topline modelira izrazom [54]:

$$-k \frac{dT_{koža}}{dz} = h(T_{koža} - T_{zrak}) \quad (7.10)$$

gdje je z normala na površinu, h konvekcijski toplinski koeficijent, k toplinska vodljivost tkiva.

U frekvencijskom rasponu do nekoliko desetaka GHz može se razmatrati adijabatski granični uvjet ($h = 0$). Na porast odnosno promjenu tjelesne temperature utjecaj svakako ima i termoregulacija. U dosadašnjim poznatim modelima procesi termoregulacije nisu uključeni te ovo područje tek treba biti istraženo.

Promjena temperature na površini kože ovisi dakle o više parametara kao što su prokrvljenost, toplinska vodljivost te koeficijent prijenosa (prolaska) topline. U nekim istraživanjima [80] navodi se pojačani efekt hlađenja zagrijane površine tkiva u slučaju veće prokrvljenosti, veće vodljivosti topline prema unutrašnjosti tkiva, odnosno veće razine prijenosa topline u okolni zrak. Sukladno tome, najveći porast temperature događa se u slučajevima najnižih razina prokrvljenosti, toplinske vodljivosti i najnižeg koeficijenta prijenosa topline.

Jednom kada toplina generirana u nekom sustavu postane jednaka disipiranoj toplini, kažemo da je nastupilo stacionarno stanje porasta temperature (eng. *steady state temperature rise*), odnosno svojevrsna toplinska ravnoteža. Kada tu definiciju primijenimo na porast tjelesne temperature, možemo reći da ustaljeno stanje nastupa u trenutku kada toplinski tok i distribucija temperature postanu neovisni o vremenu [86].

8. KVANTIFIKACIJA NESIGURNOSTI

Za izračun fizikalnih veličina (E , SAR , Γ i sl.) često se koristi više međusobno neovisnih parametara. No, vrlo često je nužno u obzir uzeti i nesigurnost, odnosno moguće odstupanje pojedine varijable od neke deklarirane vrijednosti.

Dakle, osim rezultata proračuna i mjerenja jako je važno napraviti i stohastičku analizu kako bi se dao uvid u pouzdanost i odstupanje dobivenih rezultata. Prvi korak u postupku stohastičke analize svakako predstavlja definiranje ulaznih varijabli γ koje su zapravo elementi funkcije čiji se izračun traži:

$$\gamma = [\gamma^1, \gamma^2, \dots, \gamma^n] \quad (8.1)$$

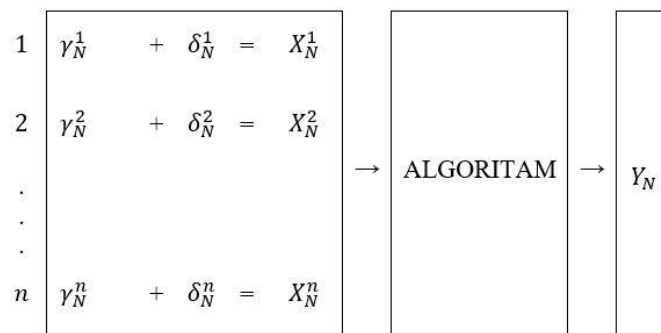
gdje n predstavlja ukupan broj ulaznih varijabli (parametara).

Odstupanje pojedine varijable od definirane vrijednosti jednako je δ pa u konačnici ulazna varijabla X postaje zbroj definirane varijable γ i odstupanja δ :

$$X_N^n = \gamma_N^n + \delta_N^n \quad (8.2)$$

gdje N predstavlja ukupan broj setova ulaznih varijabli.

Pretpostavka je da su ulazne varijable međusobno neovisne. Za svaki set ulaznih varijabli N izvodi se proračun kojim se generira po jedna izlazna varijabla. Ukupan broj izlaznih varijabli jednak je, dakle, broju setova ulaznih varijabli (slika 8.1.).



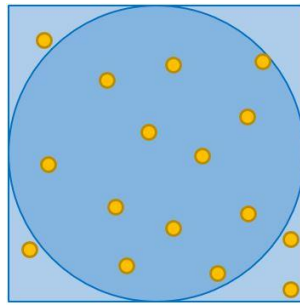
Slika 8.1. Dijagram izvođenja proračuna jakosti električnog polja u ovisnosti o ulaznim varijablama

Takav proces kvantifikacije nesigurnosti može se odrediti uz pomoć dvije stohastičke metode: Monte Carlo (MC) i stohastička kolokacija (SC).

8.1. Monte Carlo

Jedna od metoda stohastičke analize izlazne varijable u ovisnosti o ulaznim parametrima jest Monte Carlo (MC). Iako je Enrico Fermi prvi istraživao Monte Carlo metodu proučavajući neutronske difuzije 30-ih godina 20. stoljeća, utemeljiteljem MC metode smatra se Stanislav Ulam koji je ovu metodu koristio radeći na nuklearnom oružju 40-ih godina prošlog stoljeća. MC metoda prilično je jednostavna, a temelji se na velikom broju ponavljanja procesa kojim se dobiva izlazna varijabla.

Monte Carlo metoda služi za rješavanje različitih problema. Predstavlja skup algoritama i matematičkih modela koji sadržavaju slučajne brojeve s ciljem pronalaska najvjerojatnijeg rješenja. Zasniva se na velikom broju simulacija, a može se najjednostavnije objasniti kroz izračun broja π [87]. Naime, ako unutar kvadrata duljine stranica $2r$ umetnemo krug promjera $2r$, dobit ćemo dva geometrijska lika kao na slici.



Slika 8.2. Primjer aproksimacije broja π Monte Carlo metodom

Površina kvadrata jednaka je $A = 4r^2$, a površina kruga $A = r^2\pi$ gdje je r polovina duljine stranice kvadrata, odnosno polumjer kružnice. Ako nasumično stavimo točku unutar kvadrata, vjerojatnost da će se ona naći unutar kruga jednaka je $\frac{\pi}{4}$.

Dakle, omjer $\frac{\pi}{4}$ približno je jednak omjeru broja točaka koje su upale unutar kruga i ukupnog broja postavljenih točaka:

$$\frac{\pi}{4} = \frac{\text{broj točaka unutar kruga}}{\text{ukupan broj točaka}} \quad (8.1.1)$$

S dovoljnim brojem točaka mogli bismo približno odrediti broj π :

$$\pi = 4 \cdot \frac{\text{broj točaka unutar kruga}}{\text{ukupan broj točaka}} \quad (8.1.2)$$

MC metoda najčešće se primjenjuje u različitim matematičkim, fizikalnim i kemijskim područjima kao i financijama te poslovnim projektima.

Srednja vrijednost i varijanca dobivenih izlaznih vrijednosti računaju se izrazima [88]:

$$\mu(Y) \approx \frac{1}{N_{MC}} \sum_{i=1}^{N_{MC}} Y_i \quad (8.1.3)$$

$$V(Y) \approx \frac{1}{N_{MC} - 1} \sum_{i=1}^{N_{MC}} (Y_i - \hat{\mu})^2 \quad (8.1.4)$$

gdje je Y_i i -ta vrijednost N_{MC} determinističkog slučaja. U pravilu N_{MC} vrijednost treba biti relativno velika (10.000 i više).

MC metoda dosta se često primjenjuje u analizi nesigurnosti. Primjerice, u [83] istražen je utjecaj elektromagnetskih polja na djecu i odrasle osobe u pogledu povišenja tjelesne temperature pri izloženosti EM poljima. Pri tome je ispitan utjecaj pojedinih parametara na ukupni rezultat, odnosno doprinos standardnih nesigurnosti parametara (u_i) na ukupnu (kombiniranu) standardnu nesigurnost (u_c). Iako se može pretpostaviti neovisnost rezultata o pojedinim parametrima, korelacija parametara itekako može utjecati na procjenu nesigurnosti. Stoga se može pristupiti evaluaciji korelacija kako bi se dobila tzv. nesigurnost Monte Carlo (u_{MC}). Pri tome se algoritam (simulacija) ponavlja dovoljan broj puta kako bi se dobio 95 %-tni interval pouzdanosti.

8.2. Stohastička kolokacija

Druga metoda stohastičke analize koja je pogodna za primjenu svakako je stohastička kolokacija (SC). Karakterizira ju jednostavnost implementacije, a zasniva se na metodi uzorkovanja, odnosno ponavljanju simulacijskog algoritma određeni broj puta s promijenjenim vrijednostima ulaznih parametara [89]. SC metoda počiva na polinomnoj aproksimaciji izlazne varijable za N ulaznih parametara pri čemu se unaprijed definira broj tzv. kolokacijskih točaka [88].

Izlazna varijabla definirana je pomoću relacije [88]:

$$\hat{Y}(\mathbf{X}) = \sum_{i=1}^{N_{sc}} L_i(\mathbf{X}) \cdot Y^{(i)} \quad (8.2.1)$$

gdje je $L_i(\mathbf{X})$ temeljna funkcija, a $Y^{(i)}$ izlazna realizacija i -te ulazne varijable $X^{(i)}$.

Srednja vrijednost, odnosno varijanca izlazne varijable određuju se iz relacija [88]:

$$\mu(Y) \approx \sum_i^n Y_i \cdot \omega_i \quad (8.2.2)$$

$$V(Y) \approx \sum_i^n (Y_i)^2 \cdot \omega_i - \mu^2(Y) \quad (8.2.3)$$

gdje ω_i određuje "težinu" i -te multidimenzionalne simulacije određene iz jednažbe:

$$\omega_i = \int_{\mathbf{X}} L_i(\mathbf{X}) \cdot pdf(\mathbf{X}) d\mathbf{X} \quad (8.2.4)$$

gdje $pdf(\mathbf{X})$ označava funkciju gustoće vjerojatnosti.

Za SC metodu često se kaže da je zapravo "pametna MC metoda" jer optimizira broj ponavljanja, odnosno izvođenja proračuna.

8.3. Standardna devijacija i interval pouzdanosti

Standardna devijacija izlaznih vrijednosti jednaka je drugom korijenu varijance, neovisno o statističkoj metodi:

$$\sigma_Y = \sqrt{V(Y)} \quad (8.3.1)$$

Standardna devijacija prijeko je potrebna u određivanju intervala pouzdanosti, a posebno su bitne dvostruka i trostruka standardna devijacija kako bi se dobio interval pouzdanosti od 95 %, odnosno 99%:

$$CI = \mu(Y) \pm 2\sigma_Y \quad (8.3.2)$$

$$CI = \mu(Y) \pm 3\sigma_Y \quad (8.3.3)$$

Ispitivanjem varijanci, odnosno standardnih devijacija izlaznih vrijednosti donosi se zaključak o konvergenciji pojedine stohastičke metode. Time se zapravo dobiva informacija o pouzdanosti pojedine metode ovisno o broju kolokacijskih točaka, odnosno setova ulaznih varijabli.

8.4. Analiza osjetljivosti

U istraživanjima se često provodi i tzv. analiza osjetljivosti pojedinih parametara kako bi se detaljnije opisao njihov pojedinačni, ali i združeni utjecaj na izlazne veličine (E , S , SAR , S_{inc} i dr.).

Jedan od jednostavnih pristupa svakako je tzv. "One-at-a-time" (OAT) (jedna po jedna) kojim se proučavaju varijance zadanog jednodimenzionalnog problema. Prednost OAT pristupa svakako je omogućavanje brzog rangiranja parametara s obzirom na iznos varijanci, odnosno standardnih devijacija. Nedostatak OAT pristupa je u nemogućnosti prepoznavanja skupnog utjecaja više parametara na iznos varijanci, odnosno standardnih devijacija. Stoga se uz OAT često koristi i analiza varijance (eng. *Analysis of Variance*, ANOVA) zasnovana na izračunu Sobolovog indeksa [88].

Indeks prvog reda $S_1(X_k)$ pokazuje utjecaj ulazne varijable k [88]:

$$S_1(X_k) = \frac{V_{X_k}[\mu_{X \sim k}(Y|X_k)]}{V[Y|(X_1, X_2, \dots, X_d)]} \quad (8.4.1)$$

Indeks drugog reda $S_2(X_i, X_j)$ pokazuje zbirni utjecaj ulaznih varijabli i i j :

$$S_2(X_i, X_j) = \frac{V_{X_i X_j}[\mu_{X \sim i, j}(Y|X_i, X_j)] - V_{X_i}[\mu_{X \sim i}(Y|X_i)] - V_{X_j}[\mu_{X \sim j}(Y|X_j)]}{V[Y|(X_1, X_2, \dots, X_d)]} \quad (8.4.2)$$

$$i = 1, 2, \dots, d, j = 1, 2, \dots, d, i \neq j$$

U konačnici, moguće je izračunati i ukupni indeks osjetljivosti $S_T(X_k)$ varijable k u interakciji sa svim ostalim varijablama [88]:

$$S_1(X_k) = \frac{V_{X_k}[\mu_{X \sim k}(Y|X_k)]}{V[Y|(X_1, X_2, \dots, X_d)]} \quad (8.4.3)$$

$$k = 1, 2, \dots, d$$

Za potrebe analize osjetljivosti može se koristiti poseban alat, primjerice GSAT (eng. *Global Sensitivity Analysis Toolbox*) pomoću kojeg se računaju indeksi osjetljivosti pojedinog parametra, ali također i ukupni indeksi osjetljivosti. GSAT model također omogućava i promatranje razine utjecaja za slučaj skupnog djelovanja više izdvojenih parametara [90].

9. ZAKLJUČAK

Uvođenjem novih telekomunikacijskih tehnologija raste i zabrinutost za njihov mogući štetni utjecaj na zdravlje. Stoga se brojna znanstvena istraživanja provode u svrhu zaštite od EM polja kako radnika koji rade s izvorima, tako i opće populacije. U ovom radu iznesen je pregled istraživanja na temu utjecaja EM polja na tkivo čovjeka te neke od najčešćih smjernica u zaštiti od EM zračenja baznih stanica.

Uz postojeće telekomunikacijske tehnologije: 2G, 3G i 4G, na velika vrata upravo dolazi i 5G tehnologija. Kako bi svaki izvor (tj. bazna stanica) zadovoljio uvjete o dopuštenim razinama izračenog EM polja provode se proračuni i mjerenja jakosti električnog i magnetskog polja te gustoće snage. Iako je, može se reći, model izvora izoliranog u slobodnom prostoru opće prihvaćen u proračunu razina EM polja, često i utjecaj reflektiranih komponenti polja nije zanemariv pa ga je nužno uzeti u obzir. Premda se proračuni polja najčešće odnose na detekciju najgoreg mogućeg slučaja, sve je više istraživanja u kojima se uključuju realističniji scenariji za izračene vrijednosti. Ovakav pristup proračunu, ali i mjerenju razina EM polja bit će od velike važnosti za novu 5G tehnologiju s obzirom na očekivani znatni porast broja antenskih sustava koji je nužan za funkcioniranje ove tehnologije.

Shodno tome, u ovom radu razmatraju se metode proračuna jakosti EM polja kod kojih se, osim upadne komponente polja uzima u obzir i reflektirana komponenta EM vala. Osim proračuna, opisane su i metode za mjerenje razina EM polja. Posebnu pozornost iziskuje mjerenje razina polja nove 5G tehnologije koja zahtjeva metodologiju koja se razlikuje od dosadašnjih, poprilično konzervativnih metoda.

Utjecaj EM polja na čovjeka najčešće se promatra kroz simulacije provedene na modelu tkiva. Tkivo se, ovisno o svrsi istraživanja, najčešće modelira kao dvoslojno, troslojno ili pak četveroslojno. Svaki sloj definiran je određenim varijablama kao što su debljina, relativna permitivnost, specifična vodljivost, gustoća, volumni protok krvi, toplinska vodljivost i dr. U ovom radu iznesen je pregled istraživanja na temu opisa tkiva, apsorpcije upadne EM energije te penetracije energije u dubinu tkiva, kao i učinka EM polja na povišenje tjelesne temperature.

Na kraju, u radu su prikazane i osnovne metode kvantifikacije nesigurnosti, kao i metode ispitivanja analize osjetljivosti pogodne za postupke stohastičko-determinističke dozimetrije.

10. LITERATURA

- [1] »World Health Organization,« [Mrežno]. Available: <https://www.who.int/peh-emf/about/WhatisEMF/en/>. [Pokušaj pristupa rujan 2020].
- [2] »Portal "Hoću",« [Mrežno]. Available: <https://www.hocu.ba/index.php/hocu.info/2g-3g-4g-5g-u-cemu-je-razlika>. [Pokušaj pristupa siječanj 2022].
- [3] K. Foster, M. Ziskin i Q. Balzano, »Thermal Response of Human Skin to Microwave Energy: A Critical Review,« *Health Physics*, 2016.
- [4] »ICNIRP Guidelines, "Guidelines for Limiting Exposure to Electromagnetic Fields (100 kHz to 300 GHz)",« 2020.
- [5] The Institute of Electrical and Electronics Engineers, "IEEE Standard for safety levels with respect to human exposure to electric, magnetic, and elektromagnetic fields, 0 Hz to 300 GHz", IEEE International Committee on Electromagnetic Safety, veljača 2019.
- [6] »Ministarstvo zdravlja,« 2014. [Mrežno]. Available: https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2014_12_146_2740.html. [Pokušaj pristupa siječanj 2022].
- [7] »Hrvatska norma HRN EN 61786,« *Mjerenje niskofrekvencijskih magnetskih i električnih polja s obzirom na izloženost ljudi – Posebni zahtjevi za instrumente i upute za mjerenja*, 2001.
- [8] »Hrvatska norma HRN EN 50383,« *"Osnovna norma za proračun i mjerenje jakosti elektromagnetskog polja i gustoće apsorbirane snage koja se odnosi na izloženost ljudi radijskim baznim postajama i nepokretnim krajnjim postajama u bežičnim telekomunikacijskim sustavima (110 MHz - 40 GHz)*, 2012.
- [9] »Hrvatska norma HRN EN 50413,« *Osnovna norma za postupke mjerenja i proračuna izloženosti ljudi električnim, magnetskim i elektromagnetskim poljima (0 Hz – 300 GHz)*, 2012.
- [10] »Hrvatska norma HRN EN 50492,« *Osnovna norma za in-situ mjerenja jakosti elektromagnetskog polja s obzirom na izloženost ljudi u blizini baznih postaja*, 2012.
- [11] »Hrvatska norma HRN EN 62110,« *Razine električkih i magnetskih polja koja generiraju energetske sustavi izmjenične struje – Postupci mjerenja s obzirom na izloženost opće populacije*, 2012.

- [12] »Hrvatska norma HRN EN 62232,« *Determination of RF field strength; power density and SAR in the vicinity of radiocommunication base stations for the purpose of evaluating human exposure (IEC 62232:2017; EN 62232:2017)*, 2018.
- [13] »Hrvatska norma HRN EN 61566,« *"Mjerenje izlaganja radiofrekvencijskim elektromagnetskim poljima – Jakost polja u frekvencijskom opsegu 100 kHz do 1 GHz"*, 1997.
- [14] »Iwireless Solutions, "Macrocell vs Microcell",« [Mrežno]. Available: <https://www.iwireless-solutions.com/macrococell-vs-microcell/>. [Pokušaj pristupa srpanj 2020].
- [15] K. R. Foster, S. Kodera i A. Hirata, »5G Communications Systems and Radiofrequency Exposure Limits,« *IEEE Future Networks*, rujan 2019.
- [16] D. Poljak, »Izloženost ljudi zračenju antenskih sustava baznih postaja – dozimetrija upadnog polja,« *Sigurnost*, veljača 2012.
- [17] S. Kodera, J. Gomez-Tames i A. Hirata, »Temperature elevation in the human brain and skin with thermoregulation during exposure to RF energy,« *Bio-Medical Engineering OnLine*, siječanj 2018.
- [18] »Advanced Antenna Systems for 5G Networks,« *Ericsson white paper*, studeni 2018.
- [19] M. Cavagnaro i J. C. Lin, »Importance of Exposure Duration and Metrics on Correlation Between RF Energy Absorption and Temperature Increase in a Human Model,« *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, pp. Vol. 66, No. 8, kolovoz 2019..
- [20] A. Hirata, T. Asano i O. Fujiwara, »FDTD analysis of body-core temperature elevation in children and adults for whole-body exposure,« *Physics in Medicine and Biology*, listopad 2008.
- [21] R. Defrin, M. Shachal-Shiffer, M. Hadgadg i C. Peretz, »Quantitative Somatosensory Testing of Warm and Heat-Pain Thresholds: The Effect of Body Region and Testing Method,« *Clinical Journal of Pain*, veljača 2006.
- [22] M. W. Dewhirst, B. L. Viglianti, M. Lora-Michiels, M. Hanson i P. J. Hoopes, »Basic Principles Of Thermal Dosimetry and Thermal Thresholds for Tissue Damage from Hyperthermia,« *International Journal of Hyperthermia*, srpanj 2009.
- [23] G. C. Van Rhoon, T. Samaras, P. S. Yarmolenko, M. W. Dewhirst, E. Neufeld i N. Kuster, »CEM43°C Thermal Dose Thresholds: A Potential Guide for Magnetic Resonance Radiofrequency Exposure Levels,« *European Society of Radiology*, travanj 2013.

- [24] P. Bernardi, M. Cavagnaro, S. Pisa i E. Piuzzi, »Human Exposure to Radio Base-Station Antennas in Urban Environment,« *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, pp. Vol. 48, No. 11, studeni 2000.
- [25] P. Bernardi, M. Cavagnaro, S. Pisa i E. Piuzzi, »Human exposure in the vicinity of radio base station antennas,« *Proc. of Europ Symp. On Electromagnetic Compatibility*, rujanj 2000.
- [26] B. Thors, D. Colombi, Z. Ying, T. Bolin i C. Toernevik, »Exposure to RF EMF from Array Antennas in 5G Mobile Communication Equipment,« *IEEE*, siječanj 2016.
- [27] J. E. Moulder, L. S. Erdreich, R. S. Malyapa, J. Merrit, W. F. Pickarde i Vijayalaxmi, »Cell Phones and Cancer: What Is the Evidence for a Connection?,« *Radiation Research*, lipanj 1999.
- [28] A. Hirata i O. Fujiwara, »The correlation between mass-averaged SAR and temperature elevation in the human head model exposed to RF near-fields from 1 to 6 GHz,« *Physics in Medicine and Biology*, prosinac 2009.
- [29] A. Hirata, I. Laakso, T. Oizumi, R. Hanatani, K. H. Chan i J. Wiart, »The Relationship Between Specific Absorption Rate and Temperature Elevation in Anatomically Based Human Body Models for Plane Wave Exposure from 30 Mhz to 6 Gh,« *Physics in Medicine and Biology*, January 2013.
- [30] M. C. Ziskin, S. I. Aleksev, K. R. Foster i Q. Balzano, »Tissue Models for RF Exposure Evaluation at Frequencies above 6 GHz,« *Bioelectromagnetics*, veljača 2018.
- [31] K. Foster, M. C. Ziskin, Q. Balzano i G. Bit-Babik, »Modeling Tissue Heating from Exposure to Radiofrequency Energy and Relevance of Tissue Heating to Exposure Limits: Heating Factor,« *Health Physics*, kolovoz 2018.
- [32] R. L. McIntosh i V. Anderson, »SAR Versus Sinc: What Is the Appropriate RF Exposure Metric in the Range 1-10 GHz? Part II: Using Complex Human Body Models,« *Bioelectromagnetics*, 2010.
- [33] V. Anderson, R. Croft i R. L. McIntosh, »SAR Versus Sinc: What Is the Appropriate RF Exposure Metric in the Range 1-10 GHz? Part I: Using Planar Body Models,« *Bioelectromagnetics*, pp. 31:454-466, 2010.
- [34] M. C. Gosselin, A. Christ, S. Kuhn i N. Kuster, »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*, svibanj 2009.

- [35] W. He, B. Xu, M. Gustafsson, Z. Ying i S. He, »RF Compliance Study of Temperature Elevation in Human Head Model Around 28 GHz for 5G User Equipment Application: Simulation Analysis,« *IEEE Access - special section on recent advances on radio access and security methods in 5G networks*, veljača 2018.
- [36] M. Zhabodov, N. Chahat, R. Sauleau, C. Le Quement i Y. Le Drean, »Millimeter-wave Interactions with the Human Body: State of Knowledge and Recent Advances,« *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, siječanj 2011.
- [37] T. Wu, T. S. Rappaport i C. M. Collins, »The human body and millimeter-wave wireless communication systems: Interactions and implications,« *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2015.
- [38] »Ministarstvo zdravlja,« Pravilnik o izmjenama i dopunama pravilnika o zaštiti od elektromagnetskih polja, 2019. [Mrežno]. Available: https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2019_03_31_627.html. [Pokušaj pristupa siječanj 2022].
- [39] M. Galic i D. Poljak, »Theoretical and Experimental Incident Field Dosimetry for GSM Base Stations,« *2019 URSI International Symposium on Electromagnetic Theory (EMTS)*, 2019.
- [40] M. Galic, D. Poljak i V. Doric, »A Simplified Method for the Assessment of the Electric Field above a Multilayer Radiated by a Base Station Antenna,« *018 3rd International Conference on Smart and Sustainable Technologies (SpliTech)*, pp. 1 - 4, 2018.
- [41] M. Galic, D. Poljak i V. Doric, »Comparison of free space, perfect ground and fresnel's equation models to determine electric field radiated by a base station antenna,« *2017 25th International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM)*, pp. 1 - 6, 2017.
- [42] M. Galic, D. Poljak i V. Doric, »Simple analytical models for the calculation of the electric field radiated by the base station antenna,« *International Journal for Engineering Modelling*, pp. 31(1-2):31-42, rujan 2018.
- [43] M. Galic, D. Poljak i V. Dorić, »Analytical Technique to Determine the Electric Field Above a Two-Layered Medium,« *2018 2nd URSI Atlantic Radio Science Meeting (AT-RASC)*, pp. 1-4, 2018.
- [44] Y. S. Lee, S. B. Jeon, A. K. Lee, K. Kim, J. K. Pack i H. D. Choi, »Study on the Appropriate Measurement Spacing for EMF Installation Compliance Assessments of a 3.5 GHz 5G Base Station,« *IEEE Access*, pp. 88167-88176, 2021.

- [45] D. Poljak i K. E. K. Driss, »Computational Methods in Electromagnetic Compatibility, Antenna Theory Approach versus Transmission Line Models,« *New York: John Wiley and Sons*, 2018.
- [46] D. Poljak, V. Dorić, M. Birkić, K. El Khamlichi Drissi, S. Lallachere i L. Pajewski, »A Simple Analysis of Dipole Antenna Radiation Above a Multilayered Medium,« *9th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR)*, lipanj 2017.
- [47] D. Poljak, *Teorija elektromagnetskih polja s primjenama u inženjerstvu*, Zagreb: Školska knjiga, 2014.
- [48] V. Labinac i B. Milotić, »Waves and Optics,« University of Rijeka, Rijeka, 2015.
- [49] A. Faraone, G. Bit-Babik i R. Zaridze, »Assessment of Human Exposure to Realistic Radio-Frequency Sources by Means of Analytical and Computational Methodologies,« *EUCAP*, listopad 2006.
- [50] S. Persia, C. Carciofi, M. Barbioli, C. Volta, D. Bontempelli i G. Anania, »Radio Frequency Electromagnetic Field Exposure Assessment for future 5G networks,« *29th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, rujan 2018.
- [51] S. Adda, T. Aureli, S. D'Elia, D. Franci, E. Grillo, M. D. Migliore, S. Pavoncello, F. Schettino i R. Suman, »A Theoretical and Experimental Investigation on the Measurement of the Electromagnetic Field Level Radiated by 5G Base Stations,« *IEEE Access*, pp. 101448-101463, 2020.
- [52] P. Baracca, A. Weber, T. Wild i C. Grangeat, »A Statistical Approach for RF Exposure Compliance Boundary Assessment in Massive MIMO Systems,« *22nd International ITG Workshop on Smart Antennas*, pp. 1-6, siječanj 2018.
- [53] B. Xu, »Power Density Measurements at 15 GHz for RF EMF Compliance Assessments of 5G User Equipment,« *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, pp. 6584-6595, prosinac 2017.
- [54] A. Hirata, S. Kodera, K. Sasaki, J. Gomez-Tames, I. Laakso, A. Wood, S. Watanabe i K. R. Foster, »Human Exposure to Radiofrequency Energy above 6 GHz: Review of Computational Dosimetry Studies,« *researchgate.net*, studeni 2020.
- [55] »5G deployment below 6 GHz - Ubiquitous coverage for critical communication and massive IoT,« *NOKIA white paper*, 2017.

- [56] D. Franci, S. Coltellacci, E. Grillo, S. Pavoncello, T. Aureli, R. Cintoli i M. D. Migliore, »Experimental Procedure for Fifth Generation (5G) Electromagnetic Field (EMF) Measurement and Maximum Power Extrapolation for Human Exposure Assessment,« *Environments*, 2020.
- [57] R. Werner, P. Knipe i S. Iskra, »A Comparison Between Measured and Computed Assessments of the RF Exposure Compliance Boundary of an In-Situ Radio Base Station Massive MIMO Antenna,« *IEEE Access*, 2019.
- [58] S. Aerts, L. Verloock, M. Van Den Bossche, D. Colombi, L. Martnes, C. Toernevik i W. Joseph, »In-situ Measurement Methodology for the Assessment of 5G NR Massive MIMO Base Station Exposure at Sub-6 GHz Frequencies,« *IEEE Access*, p. 7:184658 – 184667, prosinac 2019.
- [59] C. Bornkessel i dr., »Determination of Instantaneous and Maximal Human Exposure to 5G Massive-MIMO Base Stations,« *2021 15th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, pp. 1 - 5, 2021.
- [60] »Assessment of the Exposure of the General Public to 5G Electromagnetic Waves - Part 2: first measurement results on 5G pilots in the 3,400-3,800 MHz band,« Agence Nationale Des Fréquences, travanj 2020. [Mrežno].
- [61] HAKOM, »Upute za mjerenje razine elektromagnetskog polja,« [Mrežno]. Available: https://www.hakom.hr/UserDocsImages/2015/kontrola_spektra/VL-KS-UP-INTS-Uputa%20za%20mjerenje%20EMP%20za%20web-20150310.pdf?vel=3053282. [Pokušaj pristupa studeni 2021].
- [62] »Federal Institute of Metrology METAS,« *Technical Report: Measurement Methods for 5G NR Base Stations up to 6 GHz*, 2020.
- [63] M. D. Migliore, »A New Paradigm in 5G Maximum Power Extrapolation for Human Exposure Assessment: Forcing gNB Traffic Toward the Measurement Equipment,« *IEEE Access*, pp. 101946-101958, 2021.
- [64] R. Pawlak, P. Kraiwec i J. Zurek, »On Measuring Electromagnetic Fields in 5G Technology,« *IEEE Access*, veljača 2019.
- [65] H. Keller, »On the Assessment of Human Exposure to Electromagnetic Fields Transmitted by 5G NR Base Stations,« *Health Physics*, travanj 2019.
- [66] A. Sibila, »5G NR Networks are here, Let's Test,« *White paper, Rohde&Schwarz*, srpanj 2020.

- [67] HAKOM, »Uputa za procjenu izloženosti elektromagnetskim poljima za bazne postase s adaptivnim antenskim sustavima u pokretnim komunikacijskim mrežama u frekvencijskom području do 6 GHz,« 2022.
- [68] F. Satche, C. Werner, K. Meyer-Werden i O. Dossel, »Development of a Human Body Model for Numerical Calculation of Electrical Fields,« *Computerized Medical Imaging and Graphics*, 2000.
- [69] D. Poljak i N. Kovač, »A Simplified Electromagnetic-thermal Analysis of Human Exposure to Radiation from Base Station Antennas,« *Automatika: časopis za automatiku, mjerenje, elektroniku, računarstvo i komunikacije*, pp. Vol. 45. No. 1-2, 2004.
- [70] B. Kibert, D. T. H. Lai i A. Teshome, »Human Body as Antenna and Its Effect on Human Body Communications,« *Progress in Electromagnetics Research*, p. 193–207, 2014.
- [71] A. Kanezaki, A. Hirata, S. Watanabe i H. Shirai, »Parameter Variation Effects On Temperature Elevation In A Steady State, One-Dimensional Thermal Model For Millimeter Wave Exposure Of One- And Thre-Layer Human Tissue,« *Physics in Medicine and Biology*, lipanj 2010.
- [72] S. I. Aleksev i M. C. Ziskin, »Human Skin Permittivity Determined by Millimeter Wave Reflection Measurements,« *Bioelectromagnetics*, pp. 28:331-339, 2007.
- [73] A. Y. Owda, N. Salmon, A. J. Casson i M. Owda, »The Reflectance of Human Skin in the Millimeter-Wave Band,« *Sensors - MDPI*, ožujak 2020.
- [74] S. I. Aleksev, A. A. Radzievsky, M. K. Logani i M. C. Ziskin, »Millimeter Wave Dosimetry of Human Skin,« *Bioelectromagnetics*, siječanj 2008.
- [75] S. Gabriel, R. W. Lau i C. Gabriel, »The dielectric properties of biological tissues: III. Parametric models for the dielectric spectrum of tissues,« *Physics in Medicine and Biology*, prosinac 1996.
- [76] K. Cole i R. Cole, »Dispersion and Absorption in Dielectrics I. Alternating Current Characteristics,« *The Journal of Chemical Physics*, pp. 341-351, travanj 1941.
- [77] A. Kanezaki, A. Hirata, S. Watanabe i H. Shirai, »Effects of dielectric permittivities on skin heating due to millimeter wave exposure,« *Physics in Medicine and Biology*, rujanj 2009.
- [78] T. Wu, T. S. Rappaport i C. M. Collins, »Safe for Generations to Come: Considerations of Safety for millimeter Waves in Wireless Communications,« *IEEE Microwave Magazine*, ožujak 2015.

- [79] C. M. Alabaster, »Permittivity of Human Skin in the Millimeter Wave Band,« *IEEE Electronics Letters*, svez. 21, pp. 1521-2, listopad 2003.
- [80] K. Li i dr., »Intercomparison of Calculated Incident Power Density and Temperature Rise for Exposure From Different Antennas at 10–90 GHz,« *IEEE Access*, pp. 151654-151666, 2021.
- [81] R. Morimoto, A. Hirata, I. Laakso, M. C. Ziskin i K. R. Foster, »Time constants for temperature elevation in human models exposed to dipole antennas and beams in the frequency range from 1 to 30 GHz,« *Physics in Medicine and Biology*, ožujak 2017,.
- [82] P. Bernardi, M. Cavagnaro, S. Pisa i E. Piuze, »Specific Absorption Rate and Temperature Increases in the Head of a Cellular-Phone User,« *IEEE Transactions on Microwave Theory And Techniques*, Vol. 48, No. 7 srpanj 2000.
- [83] J. F. Bakker, M. M. Paulides, E. Neufeld, A. Christ, N. Kuster i G. C. Van Rhoon, »Children and adults exposed to electromagnetic fields at the ICNIRP reference levels: theoretical assessment of the induced peak temperature increase,« *Physics in Medicine and Biology*, kolovoz 2011.
- [84] E. Neufeld, E. Carrasco, M. Murbach, Q. Balzano, A. Christ i N. Kuster, »Theoretical and Numerical Assessment of Maximally Allowable Power-Density Averaging Area for Conservative Electromagnetic Exposure Assessment Above 6 GHz,« *Bioelectromagnetics*, pp. 9999:1-14, 2018.
- [85] C. Gabriel, S. Gabriel i E. Corthout, »The Dielectric Properties of Biological Tissues: I. Literature Survey,« *Physics in Medicine and Biology*, prosinac 1996.
- [86] Z. Godec, »Steady-State Temperature Rise Determination,« *Automatika*, srpanj 2018.
- [87] K. Kashyap, »<https://www.cantorsparadise.com/>,« Cantor's Paradise, lipanj 2020. [Mrežno]. Available: <https://www.cantorsparadise.com/calculating-the-value-of-pi-using-random-numbers-a-monte-carlo-simulation-d4b80dc12bdf>. [Pokušaj pristupa veljača 2022].
- [88] A. Šušnjara, Kvalifikacijski ispit: Stohastički pristupi u računalnom elektromagnetizmu - primjene u bioelektromagnetizmu, Split: Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, 2019.
- [89] D. Xiu, »Stochastic Collocation Methods: A Survey,« *Springer International Publishing*, 2015.

- [90] »M. C. F. E. R. M. 0. 2. flax (2022). Global Sensitivity Analysis Toolbox,« [Mrežno]. Available: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/40759-global-sensitivity-analysis-toolbox>. [Pokušaj pristupa studeni 2021].
- [91] M. Ibrani, L. Ahma, E. Hamiti i R. sefa, »Human exposure assessment in the vicinity of 900 MHz GSM base station antenna,« *WSEAS Transactions on Communications*, srpanj 2007.

11. SAŽETAK

Poznato je da ljudsko tijelo apsorbira EM energiju, a u frekvenzijskom opsegu u kojem trenutno rade bazne stanice ($f < 6$ GHz) apsorbirana energija manifestira se kroz povećanje temperature, lokalno ili unutar cijelog tijela. Stoga se i smjernice organizacija koje se bave ovim problemom (ICNIRP i IEEE) odnose na ograničavanje razina EM polja na vrijednosti koje bi potencijalno mogle uzrokovati povišenje temperature sa štetnim zdravstvenim posljedicama.

Već dugi niz godina brojna istraživanja provode se upravo na temu apsorpcije i penetracije EM energije u tkivo čovjeka. U bliskoj vezi s tim svakako su i istraživanja koja se odnose na svojstva tkiva te posljedice uzrokovane povišenjem temperature.

Posebna pozornost posvećena je i izradi studija na temu proračuna i mjerenja razina EM polja izvan tijela. Iako je, prema važećim međunarodnim standardima, prihvaćen model proračuna jakosti električnog polja modelom slobodnog prostora, također se često spominju i različiti modeli koji razmatraju i reflektirane komponente EM polja. Široko rasprostranjen pristup je preko odgovarajućih koeficijenata refleksije, najčešće Fresnelovog ili pojednostavljenog koeficijenta refleksije koji proizlazi iz modificirane teorije preslikavanja.

Mjerenje razina EM polja poseban je pak izazov. Za kvalitetno izvođenje mjerenja potrebna je posebna mjerna oprema, ali i poznavanje načina rada samog izvora. U posljednje vrijeme intenzivno se radi na uvođenju 5G tehnologije u svakodnevni život. Sukladno tome, potrebna su sofisticirana mjerenja kako bi se ispitale razine EM polja novoinstaliranih, ali i svih postojećih tehnologija.

Uz poznavanje svojstava tkiva i izmjerenih ili proračunatih razina EM polja, moguće je pristupiti istraživanjima povišenja tjelesne temperature, odnosno ispitivanjima apsorpcije EM energije.

Osim apsolutnih vrijednosti koje se mogu dobiti u proračunima, korisno je ispitati i varijabilnost, odnosno nesigurnost dobivenih rezultata. Za to nam služi kvantifikacija nesigurnosti koja se često provodi uz pomoć dviju stohastičkih metoda: Monte Carlo i stohastička kolokacija. Uz to, moguće je ispitati i pojedinačni, ali i korelacijski utjecaj varijabli na konačni rezultat što se postiže analizom osjetljivosti.

12. POPIS OZNAKA I KRATICA

<i>ANOVA</i>	Analysis of Variance
<i>BCCH</i>	Broadcast Control Channel
<i>BHTE</i>	Bio-Heat Transfer Equation
<i>CDMA</i>	Code-division multiple access
<i>CRS</i>	Cell Reference Signal
<i>CSM</i>	Code-Selective Method
<i>DRL</i>	Dosimetric Reference Level
<i>E</i>	jakost električnog polja
<i>EDGE</i>	Enhanced Data GSM Evolution
<i>EIRP</i>	Effective Isotropic Radiated Power
<i>EM</i>	elektromagnetski
<i>eng.</i>	engleski
<i>ERL</i>	Exposure Reference Level
<i>ERP</i>	Effective radiated power
<i>FDD</i>	Frequency Division Duplexing
<i>FSM</i>	Frequency Selective Method
<i>GPRS</i>	General Packet Radio Service
<i>GSAT</i>	Global Sensitivity Analysis Toolbox
<i>GSM</i>	Global System for Mobile Communications
<i>H</i>	jakost magnetskog polja
<i>ICNIRP</i>	International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection
<i>IEEE</i>	The Institute of Electrical and Electronics Engineers
<i>LTE</i>	Long Term Evolution
<i>MC</i>	Monte Carlo

<i>MIMO</i>	Multiple Input Multiple Output
<i>MIT</i>	Modified Image Theory
<i>NEC</i>	Numerical Electromagnetics Code
<i>NR</i>	New Radio
<i>OAT</i>	One at a Time
<i>OFDM</i>	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
<i>PBCH</i>	Physical Broadcast Channel
<i>PBCH DM-RS</i>	Physical Broadcast Channel Demodulation Reference Signal
<i>P-CPICH</i>	Primary Common Pilot Channel
<i>PD</i>	Power Density
<i>PDSCH</i>	Physical Downlink Shared Channel
<i>PSS</i>	Primary Synchronization Signal
<i>RB</i>	Resource Block
<i>RBW</i>	Resolution Bandwidth
<i>RE</i>	Resource Element
<i>RF</i>	radiofrekvencijski
<i>S</i>	gustoća snage
<i>S_{ab}</i>	Absorbed Power Density
<i>SAR</i>	Specific absorption rate
<i>SAR_{10g}</i>	SAR uprosječen po kubnoj masi od 10 g
<i>SAR_{WB}</i>	SAR cijelog tijela
<i>SC</i>	Stochastic Collocation
<i>SSB</i>	Synchronization Signal Block
<i>SSS</i>	Secondary Synchronization Signal
<i>TDD</i>	Time Division Duplexing
<i>TD-SCDMA</i>	Time Division-Synchronous Code Division Multiple Access

<i>TE</i>	oznaka okomite polarizacije električnog vala
<i>TM</i>	oznaka paralelne polarizacije električnog vala
<i>U_{ab}</i>	Absorbed Energy Density
<i>u_c</i>	ukupna standardna nesigurnost
<i>u_i</i>	standardna nesigurnost parametra
<i>UMTS</i>	Universal Mobile Telecommunications System
<i>WHO</i>	World Health Organization