

Stohastičko-deterministički model za procjenu izloženosti ljudi poljima antena baznih stanica

Galić, Marin

Doctoral thesis / Disertacija

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Split, Faculty of Electrical Engineering, Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Splitu, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:179:401186>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-16**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Electrical Engineering, Mechanical Engineering and Naval Architecture - University of Split](#)



SVEUČILIŠTE U SPLITU

FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, STROJARSTVA I
BRODOGRADNJE

DOKTORSKA DISERTACIJA

**STOHAISTIČKO-DETERMINISTIČKI
MODEL ZA PROCJENU IZLOŽENOSTI
LJUDI POLJIMA ANTENA BAZNIH
STANICA**

Marin Galić

Split, 2023.

SVEUČILIŠTE U SPLITU

FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, STROJARSTVA I
BRODOGRADNJE

DOKTORSKA DISERTACIJA

**STOHAISTIČKO-DETERMINISTIČKI
MODEL ZA PROCJENU IZLOŽENOSTI
LJUDI POLJIMA ANTENA BAZNIH
STANICA**

Marin Galić

Split, 2023.

Doktorska disertacija izrađena je na Zavodu za elektroniku i računarstvo Fakulteta elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje

Mentor: prof. dr. sc. Dragan Poljak

Rad br. 188

PODACI ZA BIBLIOGRAFSKU KARTICU

Ključne riječi: Bazne stanice, proračuni i mjerenja izračenih polja, dozimetrija unutarnjeg polja, razina specifične apsorpcije, gustoća transmitirane snage, stohastičko modeliranje, kvantifikacija nesigurnosti.

Znanstveno područje: Tehničke znanosti

Znanstveno polje: Elektrotehnika

Znanstvena grana: Elektronika

Institucija u kojoj je rad izrađen: Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, Split

Mentor rada: prof. dr. sc. Dragan Poljak

Broj stranica: 180

Broj slika: 100

Broj tablica: 16

Broj jednadžbi: 163

Broj korištenih bibliografskih jedinica: 124



Povjerenstvo za ocjenu doktorske disertacije:

1. prof. dr. sc. Zoran Blažević – FESB, Split,
2. prof. dr. sc. Zvonimir Šipuš – FER, Zagreb,
3. izv. prof. dr. sc. Vicko Dorić – FESB, Split,
4. doc. dr. sc. Maja Škiljo – FESB, Split,
5. izv. prof. dr. sc. Mario Cvetković – FESB, Split.

Povjerenstvo za obranu doktorske disertacije:

1. prof. dr. sc. Zoran Blažević – FESB, Split,
2. prof. dr. sc. Zvonimir Šipuš – FER, Zagreb,
3. izv. prof. dr. sc. Vicko Dorić – FESB, Split,
4. doc. dr. sc. Maja Škiljo – FESB, Split,
5. izv. prof. dr. sc. Mario Cvetković – FESB, Split.

Stohastičko-deterministički model za procjenu izloženosti ljudi poljima antena baznih stanica

Sažetak

U svrhu zaštite ljudi od mogućeg štetnog utjecaja, ali i kontinuiranog praćenja razina, od interesa su proračuni i mjerenja jakosti EM polja u okolini baznih stanica. Osim referentnih fizikalnih veličina (jakost električnog i magnetskog polja i gustoća snage) u svrhu određivanja razine izloženosti prikladno je razmatrati i dozimetrijske veličine kao što su razina specifične apsorpcije i gustoća transmitirane snage.

U ovoj doktorskoj disertaciji ispitane su mjerne metode koje se koriste u postupcima mjerenja razina EM polja u okolini baznih stanica. Uz mjerenje, proveden je i proračun razina polja korištenjem više modela proračuna koji osim direktnog snopa zračenja u obzir uzimaju i komponentu EM polja reflektiranu iznad dvoslojne vodljive podloge. Osim determinističkih slučajeva, provedena je i stohastička analiza u vidu kvantifikacije nesigurnosti ulaznih varijabli nužnih za valjano izvođenje proračuna polja. Stohastičkim metodama Monte Carlo i stohastičkom kolokacijom, određene su srednje vrijednosti i standardno odstupanje razina polja u okolini stvarne bazne stanice, a analizom varijanci utvrđena je pojedinačna i skupna razina utjecaja ulaznih varijabli na izlaznu veličinu od interesa, tj. jakost električnog polja.

Uz razmatranje vanjskog polja, razvijen je i model unutarnjeg polja u vidu određivanja razine specifične apsorpcije, odnosno gustoće transmitirane snage unutar dvoslojnog tkiva. U okviru stohastičkog dijela modela unutarnjeg polja, kvantifikacija nesigurnosti ulaznih parametara provedena je primjenom stohastičke kolokacije za varijable kojima se opisuju parametri tkiva (specifična vodljivost, relativna permitivnost i debljina) te pripadna analiza osjetljivosti.

Ključne riječi:

Bazne stanice, proračuni i mjerenja izračenih polja, dozimetrija unutarnjeg polja, razina specifične apsorpcije, gustoća transmitirane snage, stohastičko modeliranje, kvantifikacija nesigurnosti.

Stochastic-deterministic Model for the Assessment of Human Exposure to Fields from Base Station Antennas

Abstract

For the purpose of human protection from possible harmful effects, but also for the purpose of continuous monitoring of field levels, calculation and measurement of electromagnetic fields in the vicinity of base stations are required. Apart from reference levels (electric and magnetic field intensity and power density) it is convenient to consider dosimetric quantities such as specific absorption rate and transmitted power density for the purpose of the assessment of exposure levels.

This thesis deals with measurement methods used for the field levels in the vicinity of base stations. Calculation of field levels is carried out using multiple models taking into account not only direct, but also the reflected wave component, respectively, from the two-layer conducting half-space. In addition to deterministic cases, stochastic analysis is undertaken by performing uncertainty quantification of input variables necessary for the field calculations. Mean and standard deviation are determined by using Monte Carlo and Stochastic Collocation, while analysis of variance is used to determine individual and mutual influence of input variables to the output of interest, i.e. electric field intensity.

In addition to the consideration of the external fields, a model for the assessment of the internal field is developed aiming to determine specific absorption rate and transmitted power density, respectively, within the two-layer tissue model. Within the framework of stochastic model of the internal field, uncertainty quantification of the input parameters is carried out via stochastic collocation for variables describing the tissue properties (specific conductivity, relative permittivity and tissue layer thickness) and sensitivity analysis, as well.

Keywords:

Base stations, Radiated fields calculation and measurements, internal field dosimetry, specific absorption rate, transmitted power density, stochastic modeling, uncertainty quantification.

Zahvala

Ova doktorska disertacija nastala je iz želje za proširenjem znanja iz područja teorije elektromagnetskih polja i približavanjem znanstvenih metoda stručnim, inženjerskim primjenama.

Provedena istraživanja ne bi bila izvediva bez pomoći koju mi je pružio mentor, prof. dr. sc. Dragan Poljak. Osim neupitne stručnosti, prof. Poljaka karakterizira i neopisiva količina strpljenja te sposobnost dijeljenja pozitivne energije i nadahnuća. Uz iskrenu zahvalnost osjećam i veliku privilegiju što sam mogao surađivati i učiti od prof. Poljaka.

Također bih se volio posebno zahvaliti prof. dr. sc. Vicku Doriću i dr. sc. Anni Šušnjari na pomoći i ugodnoj suradnji tijekom cjelokupnog trajanja poslijediplomskog studija.

Poslijediplomski studij ne bi bio izvediv bez pomoći, potpore i razumijevanja kolega iz *Centra za mjerenja u okolišu* na čemu im se također posebno zahvaljujem.

Hvala mojim roditeljima, sestri i prijateljima koji su bili velika moralna potpora tijekom svih ovih godina.

Mari, Anti i Antoniji



Sadržaj

1. Uvod	1
1.1. Kratki pregled dosadašnjih istraživanja	5
1.2. Metodologija istraživanja.....	12
1.3. Znanstveni doprinos i organizacija disertacije	17
2. Biološki učinci EM polja i smjernice za zaštitu od prekomjerne izloženosti	21
2.1. Biološki učinci EM polja.....	21
2.2. Smjernice za zaštitu od EM polja.....	25
3. Bežične telekomunikacijske tehnologije	32
4. Antenski sustavi radio-baznih stanica	44
5. Dozimetrija upadnog polja	51
5.1. Proračun razina EM polja.....	51
5.2. Mjerna oprema i postupak mjerenja.....	63
5.3. Mjerne metode u RF području ispod 6 GHz	68
5.4. Demodulacija signala sinkronizacijskog bloka (kodna domena).....	74
5.5. Izravno mjerenje snage (<i>zero span</i> domena).....	76
5.6. Kanalno mjerenje (frekvencijska domena)	77
5.7. Mjerenje prosječnih razina EM polja	78
6. Dozimetrija unutarnjeg polja	80
6.1. Modeliranje tijela za proračun dozimetrije unutarnjeg polja	80
6.2. Razina specifične apsorpcije (SAR) i gustoća transmitirane snage (TPD).....	83
6.3. Određivanje SAR-a i TPD-a u dvoslojnom tkivu	86
7. Stohastičko modeliranje	93
7.1. Kvantifikacija nesigurnosti	93
7.2. Analiza osjetljivosti.....	97
8. Rezultati	100
8.1. Deterministički slučajevi proračuna razina EM polja.....	100

8.2.	Deterministički slučajevi mjerenja razina EM polja 5G tehnologije	111
8.3.	Stohastičko-deterministička analiza izloženosti EM poljima bazne stanice iznad dvoslojne vodljive podloge	123
8.4.	Stohastičko modeliranje razine specifične apsorpcije i gustoće transmitirane snage unutar dvoslojnog tkiva izloženog upadnom EM polju	136
8.4.1.	Tkivo sastavljeno od kože i sloja masti	137
8.4.2.	Tkivo sastavljeno od kože i sloja mišića.....	141
9.	Zaključak.....	144
10.	Reference	147

Popis tablica

<i>Tablica 2.1 Međudjelovanje EM polja i ljudskog tijela [4], [61]</i>	<i>22</i>
<i>Tablica 2.2 Granične vrijednosti SAR-a po izloženim dijelovima tijela za opću populaciju [6]</i>	<i>28</i>
<i>Tablica 2.3 Granična razina gustoće snage za opću populaciju na frekvencijskom području iznad 10 GHz [6].....</i>	<i>28</i>
<i>Tablica 2.4 Granične razine za E i B između za područje povećane osjetljivosti prema [6] ..</i>	<i>29</i>
<i>Tablica 2.5 Granične razine za E i B između za javna područja prema [6].....</i>	<i>29</i>
<i>Tablica 2.6 Granične razine za E i H za područje izloženosti radnika prema [8]</i>	<i>30</i>
<i>Tablica 3.1 Mobilne mreže na pojedinim frekvencijskim područjima u Republici Hrvatskoj.</i>	<i>43</i>
<i>Tablica 4.1 Zone (regije) izvora EM polja [12].....</i>	<i>46</i>
<i>Tablica 5.1 "Pilot" signali u generacijama mobilnih mreža [27], [29], [76], [78].....</i>	<i>69</i>
<i>Tablica 8.1 Karakteristike modelirane dvoslojne podloge</i>	<i>101</i>
<i>Tablica 8.2 Osnovni parametri antene nužni za izradu proračuna razina EM polja u okolini bazne postaje.....</i>	<i>112</i>
<i>Tablica 8.3 Svojstva dvoslojne podloge iznad koje se događa refleksija EM vala za promatrani slučaj.....</i>	<i>113</i>
<i>Tablica 8.4 Razine električnog polja u točkama proračuna s obzirom na doprinos komponente EM vala reflektirane iznad modelirane podloge</i>	<i>114</i>
<i>Tablica 8.5 Termini korišteni u prikazu mjernih rezultata</i>	<i>117</i>
<i>Tablica 8.6 Ulazne varijable za izračun polja u odabranim točkama.....</i>	<i>126</i>
<i>Tablica 8.7 Srednje vrijednosti dielektričnih svojstava tkiva</i>	<i>136</i>



Popis ilustracija

<i>Slika 2.1 Dubina prodiranja EM energije u ovisnosti o frekvenciji [70]</i>	<i>24</i>
<i>Slika 3.1 Pet frekvencijskih područja između 925 MHz i 960 MHz alociranih za GSM tehnologiju u vlasništvu tri mobilna operatera označenih brojevima 1, 2 i 3. Na frekvencijskom području pod brojem 2 vidljiv je efekt "frequency hoppinga"</i>	<i>33</i>
<i>Slika 3.2 Aktivni kanali GSM tehnologije na frekvencijskom spektru između 1845 MHz i 1850 MHz koji pripadaju operateru označenom brojem 3</i>	<i>33</i>
<i>Slika 3.3 Četiri frekvencijska područja između 925 MHz i 960 MHz alocirana za UMTS tehnologiju u vlasništvu tri mobilna operatera označenim brojevima 1, 2 i 3</i>	<i>34</i>
<i>Slika 3.4 Jedan aktivni UMTS kanal na frekvenciji od 2127,5 MHz u vlasništvu operatera označenog brojem 3</i>	<i>35</i>
<i>Slika 3.5 Dva aktivna (2 i 3) i jedan neaktivni (1) kanal 4G tehnologije na frekvencijskom spektru između 757,5 MHz i 788,5 MHz dodijeljenom trima operaterima</i>	<i>36</i>
<i>Slika 3.6 Dva aktivna kanala 4G tehnologije na frekvencijskom opsegu između 790,5 MHz i 821,5 MHz dodijeljena dvama operaterima</i>	<i>36</i>
<i>Slika 3.7 Četiri aktivna kanala 4G tehnologije na frekvencijskom opsegu između 1804,9 MHz i 1880,1 MHz dodijeljena trima operaterima označenima brojevima 1, 2 i 3.</i>	<i>37</i>
<i>Slika 3.8 Tri aktivna 4G kanala na frekvencijskom opsegu između 2109,5 MHz i 2170,5 MHz dodijeljena trima operaterima (1, 2 i 3)</i>	<i>37</i>
<i>Slika 3.9 Dva aktivna (1 i 3) i jedan neaktivni (2) kanal 4G tehnologije na frekvencijskom opsegu između 2,62 GHz i 2,69 GHz dodijeljena trima operaterima označenim brojevima 1, 2 i 3</i>	<i>38</i>
<i>Slika 3.10 Struktura SSB-a u frekvencijskoj i vremenskoj domeni [26] PRIJEVOD</i>	<i>39</i>
<i>Slika 3.11 Raspodjela silazne i uzlazne veze u TDD modu rada 5G bazne stanice</i>	<i>40</i>
<i>Slika 3.12 Skica 64 TRx MIMO antene (4x8x2) [79]</i>	<i>41</i>
<i>Slika 3.13 Razlika aktivne i pasivne antene [79]</i>	<i>41</i>
<i>Slika 3.14 Tri frekvencijska područja alocirana za 5G tehnologiju na frekvencijskom području između 3500 MHz i 3800 MHz</i>	<i>42</i>
<i>Slika 4.1 Bazna stanica</i>	<i>44</i>
<i>Slika 4.2. Makročelije</i>	<i>45</i>
<i>Slika 4.3. Mikročelije</i>	<i>45</i>

<i>Slika 4.4 Horizontalni (plava linija) i vertikalni (crvena linija) dijagram zračenja 3G antene [58].....</i>	<i>47</i>
<i>Slika 4.5 Dijagram zračenja poluvalnog dipola i izotropnog radijatora [87]</i>	<i>48</i>
<i>Slika 5.1 Metoda slobodnog prostora u obzir uzima isključivo direktni snop zračenja</i>	<i>52</i>
<i>Slika 5.2 Skica incidentne i reflektirane komponente električnog polja u točki proračuna</i>	<i>53</i>
<i>Slika 5.3 Upad ravnog EM vala na granicu dviju sredina</i>	<i>54</i>
<i>Slika 5.4 Tangencijalne komponente električnog polja pri upadu vala na granicu dviju sredina</i>	<i>55</i>
<i>Slika 5.5 Okomiti upad ravnog vala na višeslojnu podlogu</i>	<i>56</i>
<i>Slika 5.6 Reflektirana i transmitirana komponenta upadnog EM vala za slučaj TM polarizacije</i>	<i>60</i>
<i>Slika 5.7 Osnovni dijelovi mjerne opreme</i>	<i>63</i>
<i>Slika 5.8 Snimka zaslona analizatora spektra pri širokopojasnom mjerenju u frekvencijskoj domeni.....</i>	<i>64</i>
<i>Slika 5.9 Izotropna antena</i>	<i>65</i>
<i>Slika 5.10 Usmjerena antena</i>	<i>65</i>
<i>Slika 5.11 Širokopojasno mjerenje razina električnog polja na frekvencijskom području između 30 MHz i 3.8 GHz</i>	<i>66</i>
<i>Slika 5.12 Uskopojasno (kanalno) mjerenje s centralnom frekvencijom od 3,75 GHz i širinom aktivnog kanala od 100 MHz</i>	<i>67</i>
<i>Slika 5.13 Razlika dobitka SSB-a i dobitka antene pri podatkovnom prometu [94].....</i>	<i>72</i>
<i>Slika 5.14 Mjerenje razlike snage pri podatkovnom prometu u odnosu na snagu SSB-a [60]</i>	<i>72</i>
<i>Slika 5.15 Prikaz silazne (zelena površina) i uzlazne (crvena površina) veze.....</i>	<i>73</i>
<i>Slika 5.16. Demodulacija signala unutar SSB-a.....</i>	<i>75</i>
<i>Slika 5.17 Mjerenje snage dominantnog SSB-a u vremenskoj domeni [84]</i>	<i>76</i>
<i>Slika 5.18 Kanalno mjerenje 5G signala pri uspostavljenom podatkovnom prometu.....</i>	<i>78</i>
<i>Slika 6.1 Model jednoslojnog, dvoslojnog i troslojnog tkiva.....</i>	<i>81</i>
<i>Slika 6.2 Struktura kože [44].....</i>	<i>81</i>
<i>Slika 6.3 Analitički (AN) i numerički (NUM) rezultati za TPD na dubini tkiva (z) pri frekvenciji od 6 GHz [47].....</i>	<i>86</i>
<i>Slika 6.4 Dvoslojno tkivo izloženo upadnom EM valu.....</i>	<i>87</i>
<i>Slika 7.1 Dijagram izvođenja proračuna jakosti električnog polja u ovisnosti o ulaznim varijablama</i>	<i>94</i>
<i>Slika 7.2 Primjer aproksimacije broja π Monte Carlo metodom.....</i>	<i>94</i>

Slika 8.1 Usporedba metoda proračuna i simulacije raspodjele električnog polja korištenjem NEC-a za slučaj $\epsilon_1 = 10$, $\sigma_1 = 0,01$ S/m, i $A_h = 20$ m [55], [56], [112]	100
Slika 8.2 Utjecaj debljine gornjeg sloja podloge na ukupnu razinu polja pri FRM metodi izračuna refleksijskog koeficijenta.....	101
Slika 8.3 Utjecaj relativne permitivnosti gornjeg sloja podloge na ukupnu razinu polja pri FRM metodi izračuna refleksijskog koeficijenta.....	102
Slika 8.4 Utjecaj relativne permitivnosti gornjeg sloja podloge na ukupnu razinu polja pri FRM metodi izračuna refleksijskog koeficijenta.....	103
Slika 8.5 Električno polje pri specifičnoj vodljivosti gornjeg sloja od 100 mS/m	103
Slika 8.6 Električno polje ($\epsilon_1 \rightarrow 100$)	104
Slika 8.7 Jakost električnog polja pri $\sigma_1 = 100$ mS/m i $\epsilon_1 = 50$	104
Slika 8.8 Utjecaj debljine gornjeg sloja podloge na ukupnu razinu polja pri MIT metodi izračuna refleksijskog koeficijenta.....	105
Slika 8.9 Električno polje pri $\epsilon_1 = 5$, $\sigma_1 = 1$ mS/m, $\epsilon_2 = 4$ i $\sigma_2 = 1000$ mS/m.....	106
Slika 8.10. Električno polje pri $\epsilon_1 = 5$, $\sigma_1 = 1$ mS/m, $\epsilon_2 = 100$ i $\sigma_2 = 50$ mS/m.....	106
Slika 8.11 Električno polje pri promjeni parametra ϵ_1 uz $\sigma_1 = 1$ mS/m, $\epsilon_2 = 4$ i $\sigma_2 = 50$ mS/m	107
Slika 8.12 Električno polje pri promjeni parametra σ_1 uz $\epsilon_1 = 5$, $\epsilon_2 = 4$ i $\sigma_2 = 50$ mS/m.....	107
Slika 8.13 Električno polje pri promjeni parametra ϵ_1 uz $\sigma_1 = 1000$ mS/m, $\epsilon_2 = 4$ i $\sigma_2 = 50$ mS/m pri $d_1 = 10$ cm	108
Slika 8.14 Električno polje pri $\epsilon_1 = 2$, $\sigma_1 = 1$ mS/m, $\epsilon_2 = 4$ i $\sigma_2 = 50$ mS/m.....	108
Slika 8.15 Električno polje dobiveno različitim modelima proračuna pri $\epsilon_1 = 5$, $\sigma_1 = 1$ mS/m, $\epsilon_2 = 4$ i $\sigma_2 = 50$ mS/m i $d_1 = 1$ cm.....	109
Slika 8.16 Električno polje dobiveno različitim modelima proračuna pri $\epsilon_1 = 5$, $\sigma_1 = 1000$ mS/m, $\epsilon_2 = 4$ i $\sigma_2 = 50$ mS/m i $d_1 = 1$ cm.....	109
Slika 8.17 Električno polje dobiveno različitim modelima proračuna pri $\epsilon_1 = 50$, $\sigma_1 = 1$ mS/m, $\epsilon_2 = 4$ i $\sigma_2 = 50$ mS/m i $d_1 = 1$ cm.....	110
Slika 8.18 Električno polje dobiveno različitim modelima proračuna pri $\epsilon_1 = 5$, $\sigma_1 = 1$ mS/m, $\epsilon_2 = 4$ i $\sigma_2 = 50$ mS/m i $d_1 = 25$ cm.....	110
Slika 8.19 Položaj bazne stanice i mjernih točaka u odnosu na sektore pokrivanja	111
Slika 8.20 Horizontalni (plavo) i vertikalni (crveno) dijagram zračenja antene AAU5339 pri električnom nagibu od 5°	112

<i>Slika 8.21 Usporedba rezultata proračunatih razina električnog polja dobivenih različitim postupcima</i>	114
<i>Slika 8.22 Korištena mjerna oprema (analizatora frekvencijskog spektra, izotropna prijamna antena, nevodljivi tronožac, prijenosno računalo te koaksijalni i LAN kabel)</i>	115
<i>Slika 8.23 Najviša zabilježena brzina prometa (Mbps) u mjernoj točki P1</i>	116
<i>Slika 8.24 Određivanje faktora F_{beam} mjerenjem ($F_{beam} = M2 - M1$)</i>	116
<i>Slika 8.25 Jakost električnog polja uz dvostruko standardno odstupanje u mjernoj točki P1</i>	117
<i>Slika 8.26 Dvostruka standardna devijacija izmjerenih razina polja u mjernoj točki P1</i>	118
<i>Slika 8.27 Jakost električnog polja uz dvostruko standardno odstupanje u mjernoj točki P2</i>	118
<i>Slika 8.28 Dvostruka standardna devijacija izmjerenih razina polja u mjernoj točki P2</i>	118
<i>Slika 8.29 Jakost električnog polja uz dvostruko standardno odstupanje u mjernoj točki P3</i>	119
<i>Slika 8.30 Dvostruka standardna devijacija izmjerenih razina polja u mjernoj točki P3</i>	119
<i>Slika 8.31 Jakost električnog polja uz dvostruko standardno odstupanje u mjernim točkama P1, P2 i P3 po mjernim metodama</i>	120
<i>Slika 8.32 Usporedba dvostrukih standardnih devijacija u mjernim točkama P1, P2 i P3 po mjernim metodama</i>	120
<i>Slika 8.33 Udio dvostruke standardne devijacije u srednjoj vrijednosti izmjerene razine električnog polja E_{mean}</i>	121
<i>Slika 8.34 Usporedba razina električnog polja dobivenih mjerenjem i proračunima u točki P1</i>	122
<i>Slika 8.35 Usporedba razina električnog polja dobivenih mjerenjem i proračunima u točki P2</i>	122
<i>Slika 8.36 Usporedba razina električnog polja dobivenih mjerenjem i proračunima u točki P3</i>	123
<i>Slika 8.37 Upadno električno polje sastavljeno od direktne i komponente reflektirane iznad dvoslojne vodljive podloge</i>	125
<i>Slika 8.38 Horizontalni (plava) i vertikalni (crvena) dijagram zračenja izvora od interesa</i>	125
<i>Slika 8.39 Srednja vrijednost jakosti električnog polja uz koeficijent refleksije dobiven FRM metodom</i>	127
<i>Slika 8.40 Standardna devijacija jakosti električnog polja uz koeficijent refleksije dobiven FRM metodom</i>	127

<i>Slika 8.41 Srednja vrijednost jakosti električnog polja uz koeficijent refleksije dobiven MIT metodom</i>	128
<i>Slika 8.42 Standardna devijacija jakosti električnog polja uz koeficijent refleksije dobiven MIT metodom</i>	128
<i>Slika 8.43 Standardne devijacije za 6 1-d slučajeva</i>	129
<i>Slika 8.44 Standardna devijacija za 1-d slučaj pri varijabilnom ulaznom parametru ϵ_1, stohastičkoj metodi SC i metodi izračuna MIT</i>	130
<i>Slika 8.45 Standardna devijacija za 1-d slučaj pri varijabilnom ulaznom parametru d_1, stohastičkoj metodi SC i metodi izračuna MIT</i>	130
<i>Slika 8.46 Srednja vrijednost razine električnog polja uz dvostruku standardnu devijaciju pri MIT i FRM metodi izračuna koeficijenta refleksije</i>	131
<i>Slika 8.47 Srednja vrijednost razine električnog polja uz trostruku standardnu devijaciju pri MIT i FRM metodi izračuna koeficijenta refleksije</i>	131
<i>Slika 8.48 Odnosno dvostruke i trostruke standardne devijacije i srednje vrijednosti električnog polja</i>	132
<i>Slika 8.49 Razina pojedinačnog utjecaja ulazne varijable pri FRM metodi proračuna</i>	133
<i>Slika 8.50 Razina pojedinačnog utjecaja ulazne varijable pri MIT metodi proračuna</i>	133
<i>Slika 8.51 Ukupni indeks osjetljivosti pojedine varijable pri FRM metodi proračuna</i>	134
<i>Slika 8.52 Ukupni indeks osjetljivosti pojedine varijable pri MIT metodi proračuna</i>	134
<i>Slika 8.53 Konvergencija SC metode pri izračunu varijanci TPD. Referentna razina dobivena je iz varijance s 9 kolokacijskih točaka</i>	137
<i>Slika 8.54 Srednje vrijednosti veličina od interesa uz interval pouzdanosti od 3 standardne devijacije (koža + masno tkivo)</i>	138
<i>Slika 8.55 Indeksi osjetljivosti prvog reda i ukupni indeksi osjetljivosti ulaznih varijabli pri trima frekvencijama (koža + masno tkivo)</i>	139
<i>Slika 8.56 Srednje vrijednosti veličina od interesa uz interval pouzdanosti od 3 standardne devijacije (koža + mišićno tkivo)</i>	141
<i>Slika 8.57 Indeksi osjetljivosti prvog reda i ukupni indeksi osjetljivosti ulaznih varijabli pri trima frekvencijama (koža + mišićno tkivo)</i>	142



1. Uvod

Rad baznih stanica (antena) temeljen je na odašiljanju radiofrekvencijskih elektromagnetskih polja (RF EM polja). Propagiranjem EM vala od izvora (bazne stanice) u prostor širi se EM energija koju smo naučili iskoristiti, odnosno primijeniti u svakodnevnom životu. Štoviše, danas je život teško zamisliv bez bežične tehnologije, no njen razvojni put nije bio nimalo jednostavan.

Iako je elektricitet kao pojava bio poznat još u antičko doba, može se reći da nije bio razumljiv sve do 19. stoljeća kada znanstvenici uspijevaju razviti njegovu teorijsku i matematičku osnovu. Jedan od najzaslužnijih za formulaciju elektromagnetske teorije svakako je James Clerk Maxwell koji je 1873. godine predstavio zakone koji su nam danas poznati pod nazivom "*Maxwellove jednadžbe*" [1]. U 20. pak stoljeću istraživanja iz područja elektromagnetizma uvelike su usmjerena na interakciju elektromagnetskih valova s materijama te rješavanju Maxwellovih jednadžbi.

Maxwellovo otkriće može se smatrati začetkom bežične komunikacije, a prvi oblik takve komunikacije ostvaren je 1895. godine kada je Guglielmo Marconi uspješno transmitirao Morseov kod na udaljenosti od 2,4 km. Nakon toga istraživanja u bežičnoj komunikaciji prvenstveno su vođena u vojne svrhe. U prvoj polovici 20. stoljeća bežična komunikacija prvi se put koristila u komercijalne svrhe, odnosno za emitiranje radio-valova. U drugoj pak polovici 20. stoljeća započinje se i televizijsko emitiranje. 50-ih godina 20. stoljeća bežična tehnologija počinje se koristiti u satelitima, a 70-ih godina razvijaju se prvi mobilni uređaji te GPS (eng. *Global Positioning System*) [2].

Prva generacija mobilne mreže (1G) započela je 80-ih godina. Iako je bila uvelike ograničena prema današnjim standardima, omogućila je povezivanje ljudi putem glasovnih poziva i tekstualnih poruka [3]. Prva mobilna mreža bazirana na digitalnoj tehnologiji razvijena je u ranim 90-im (2G), a uskoro se pojavio i prvi Wi-Fi koji je omogućio korisnicima bežično povezivanje na internet. U ranim 2000-im razvijena je treća generacija mobilne mreže (3G) koja je omogućila veću brzinu prijenosa podataka (do nekoliko megabita po sekundi, Mbps). 10-ak godina kasnije u upotrebu je ušla i četvrta generacija mobilne mreže (4G) pružajući brzine prijenosa podataka i do nekoliko stotina Mbps te je tako omogućila prijenos podataka u visokoj rezoluciji (eng. *High-Definition, HD*) [3]. Danas svjedočimo implementaciji nove

mobilne generacije, tzv. 5G tehnologije koja se javlja približno 100 godina od prvog uspješnog bežičnog prijenosa podataka.

Radiofrekvencijska elektromagnetska polja pripadaju u skupinu neionizirajućih EM polja čija energija kvanta nije dovoljna za kidanje molekularnih veza. S obzirom na valnu duljinu, odnosno frekvenciju (f), neionizirajuća EM polja grubo se mogu podijeliti na:

- polja ekstremno niskih frekvencija ($f < 300$ Hz),
- polja srednjih frekvencija ($300 \text{ Hz} < f < 10 \text{ MHz}$) te
- radiofrekvencijska polja ($10 \text{ MHz} < f < 300 \text{ GHz}$).

EM polja frekvencija između 100 MHz pa sve do nekoliko GHz najčešće se danas koriste u bežičnoj komunikaciji. U taj dio frekvencijskog opsega spadaju već spomenute tehnologije: 2G (GSM, GPRS i EDGE), 3G (UMTS, TD-SCDMA i CDMA), 4G (LTE), te kao najnovija generacija 5G.

Izvori ovakvih neionizirajućih EM polja su antene i antenski sustavi. Antena je, u pravilu, prilagodni sklop pri odašiljanju signala s predajnika u prostor te preuzimanju vala iz prostora na predajnik. U ovom slučaju, antena je odašiljačka jedinica u sastavu bazne stanice koja označava skup telekomunikacijske opreme nužne za bežično povezivanje telekomunikacijskih uređaja. Premda se daje opisati brojnim parametrima, neki od osnovnih su: dobitak, dijagram zračenja, zračena snaga, usmjerenost, polarizacija i dr.

Također jedan od važnih parametara antena je i njihova najveća dimenzija. Naime, s obzirom na dimenziju antene i valnu duljinu EM vala, definiraju se tri zone u njenoj okolini: zona bliskog reaktivnog polja, zona bliskog radijacijskog polja te zona daljinskog polja antene. Definiranje navedenih zona od posebne je važnosti pri izvođenju proračuna, odnosno mjerenja razina EM polja.

Tijekom posljednjih 20-ak godina uvelike je porastao broj instaliranih baznih stanica što posljedično doprinosi naglom porastu umjetno stvorenih EM polja. Povećani zahtjevi za električnom energijom, internetom i bežičnom komunikacijom razlog su sve većih akumuliranih razina izloženosti takvim EM poljima. Poznato je da ljudsko tijelo apsorbira EM energiju, a u frekvencijskom opsegu u kojem trenutno rade bazne stanice ($f < 3,8 \text{ GHz}$) apsorbirana energija manifestira se kroz povišenje tjelesne temperature. Energija koju nosi EM 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. Unutar tkiva nastala toplina tjelesnim mehanizmima (npr. krvotok) prenosi se kroz cijelo tijelo.

Nove tehnologije proširuju frekvencijski spektar i do nekoliko desetaka GHz. Porastom frekvencije mijenja se i priroda apsorpcije EM energije. Naime, pri milimetarskim EM valovima, dubina penetracije EM energije opada, odnosno energija uglavnom ostaje apsorbirana u površinskim dijelovima tkiva (kože). Toplina generirana uslijed apsorbirane EM energije dijelom se disipira u okoliš, a dijelom prenosi dublje u tkivo. Kako bi se izbjegli mogući štetni učinci ovako stvorenih EM polja organizacije koje se bave problematikom štetnog utjecaja na čovjeka definiraju granične vrijednosti referentnih i dozimetrijskih veličina kao što su jakost električnog polja (E), jakost magnetskog polja (H), gustoća snage (S), razina specifične apsorpcije (SAR), gustoća apsorbirane snage (S_{ab}) i dr. Prije nekoliko godina objavljene su nadopunjene 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 su *Pravilnik o zaštiti od elektromagnetskih polja* donesen 2014. godine [6], *Pravilnik o izmjenama i dopunama pravilnika o zaštiti od elektromagnetskih polja* iz 2019. godine [7] te *Pravilnik o zdravstvenim uvjetima kojima moraju udovoljavati radnici koji obavljaju poslove s izvorima neionizirajućeg zračenja* donesen 2016. godine [8].

Utjecaj EM polja na čovjeka, dakle, itekako postoji te stoga ne čudi interes i zabrinutost javnosti za njihov mogući štetni učinak na zdravlje. U svrhu očuvanja zdravlja i kontinuiranog praćenja razina RF EM polja od velike su važnosti proračuni i mjerenja u okolini baznih stanica. Razvojem novih telekomunikacijskih tehnologija javlja se potreba i za novim metodama mjerenja i proračuna kako bi se na valjan, ekonomičan i efikasan način što vjerodostojnije odredile stvarne razine izloženosti, što se posebno naglašava pri implementaciji 5G tehnologije.

Prema važećim normama [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16] za proračun razina električnih polja visokih frekvencija u daljinskom polju antene koristi se model antene izolirane u slobodnom prostoru kojim se razmatra isključivo učinak direktnog snopa zračenja uz moguću primjenu faktora refleksije u iznosu od 0,6 ili 1, ovisno o uvjetima u točki proračuna [11]. Ovakvim pristupom nastoji se odrediti najviša moguća razina EM polja u okolini bazne stanice, tj. u odabranim točkama proračuna. Iako se ovakvim pristupom razine EM polja najčešće predimenzioniraju, korištenjem aproksimacije slobodnog prostora razina električnog polja u

točki proračuna može se i poddimenzionirati, što je vidljivo ako se proračunata vrijednost usporedi s rezultatima mjerenja. Za proračun reflektiranog polja mogu poslužiti i neke efikasne tehnike temeljene na primjeni koeficijenta refleksije koji proizlaze iz modificirane metode slike (eng. *Modified Image Theory*, MIT) ili primjeni Fresnelovog koeficijenta refleksije za ravni val [1], [17].

Kako je već spomenuto, osim proračuna, značajna pozornost pridaje se i mjerenju razina EM polja. Mjerenje se provodi adekvatnom mjernom opremom koja se u osnovi sastoji od analizatora frekvencijskog spektra i prijamne antene. Postupci za mjerenje razina EM polja detaljno su opisani u [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16] no još uvijek se vode istraživanja na temu mjerenja razina polja proizvedenih od baznih stanica koje rade u 5G frekvencijskom području.

Ovakvim postupcima proračuna i mjerenja određuju se razine veličina kao što su jakost električnog polja, jakost magnetskog polja ili pak gustoća snage. No, osim referentnih veličina, od posebnog su interesa i unutarnje dozimetrijske veličine kao što su razina specifične apsorpcije (eng. *Specific Absorption Rate*, SAR), gustoća apsorbirane snage (S_{ab}), odnosno alternativna dozimetrijska veličina u vidu gustoće transmitirane snage (eng. *Transmitted Power Density*, TPD). Da bi određivanje ovih dozimetrijskih veličina bilo moguće, potrebno je na zadovoljavajući način modelirati izloženo tijelo što se često provodi uz pojednostavnjene modele poput kvadra, cilindra, paralelepipeda i sl.

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. Površinsko tkivo uglavnom se modelira kao jednoslojno ili pak višeslojno.

Nesigurnosti u proračunima upadnog polja i dozimetrijskih veličina pridonosi i razmatranje isključivo fiksnih varijabli kao što su izmjerena visina izvora (antene) iznad tla, električna svojstva reflektirajuće podloge, električna svojstva modeliranog tkiva, debljina pojedinog sloja tkiva i dr. Budući da male varijabilnosti ulaznih parametara mogu značajno utjecati na proračunatu veličinu od interesa, prikladnije bi bilo u izračun uključiti kvantifikaciju nesigurnosti, odnosno stohastičku analizu kako bi se s većom sigurnosti mogao odrediti slučaj s najvećom vjerojatnosti pojavljivanja, ali i najgori mogući slučaj izloženosti.

U ovoj disertaciji provedena je analiza utjecaja podloge (tla) na jakost polja u točki proračuna, odnosno mjerenja. Razmatrano je višeslojno tlo s pripadajućim električnim parametrima u smislu specifične vodljivosti i relativne permitivnosti. Pri tome se posebno proučava proračun reflektiranog električnog polja upotrebom koeficijenata refleksije koji proizlaze iz modificirane metode slike ili Fresnelovog koeficijenta refleksije za ravne valove.

Uz proračun, predstavljeni su i rezultati mjerenja razina EM polja 5G bazne stanice korištenjem različitih mjernih metoda. Rezultati mjerenja uspoređeni su s rezultatima dobivenim proračunom.

Nadalje, analiziran je jednostavni (kanonski) model ljudskog tijela izložen zračenju visokih frekvencija za potrebe dozimetrije unutarnjeg polja. Osim determinističkih slučajeva, analizirano je i stohastičko modeliranje u svrhu ispitivanja utjecaja varijacije ulaznih parametara. Kvantifikacijom nesigurnosti, odnosno analizom osjetljivosti parametara, pružena je informacija o najizglednijem i najgorem slučaju kada je u pitanju izloženost ljudi EM poljima.

1.1. Kratki pregled dosadašnjih istraživanja

Razvoj bežičnih komunikacija u korak prati i pitanje štetnih učinaka izloženosti umjetno stvorenim EM poljima frekvencija na kojima trenutno najčešće rade bazne stanice ($100 \text{ kHz} < f < 3,8 \text{ GHz}$). Poznato je naime da u tom frekvencijskom opsegu dozračena EM energija uzrokuje povišenje tjelesne temperature. U [18] je navedeno kako su mogući štetni učinci za organizam ukoliko se tjelesna temperatura poveća za $1 \text{ }^\circ\text{C}$.

Još su 1998. godine, kada je otprilike i započela "bežična revolucija", izdane prve ICNIRP-ove smjernice u svrhu zaštite ljudi. U posljednjih 30-ak godina razvoj bežične komunikacije doživio je nekoliko generacija: 2G, 3G, 4G te kao najnovija generacija 5G. Shodno tome, 2019. i 2020. godine objavljena su nova i dopunjena izdanja smjernica za zaštitu [4], [5].

Danas se još uvijek u službenim mjerenjima i proračunima razina EM polja razmatraju slučajevi s najvećom mogućom izračenom snagom, odnosno teorijski najvišom mogućom izmjerenom razinom polja u okolišu.

Zbog instaliranja novih tehnologija naglašava se problematika nadogradnje postojećih baznih stanica u vidu povećane mogućnosti prekoračenja sigurnosnih graničnih razina izloženosti. Ovaj problem posebno je izražen pojavom nove 5G tehnologije, posebice u urbanim, gusto naseljenim sredinama. Zbog toga niz znanstvenika i stručnjaka prikladnijim smatra razmatranje prosječne umjesto teorijski najviše moguće zračene snage bazne postaje.

Upravo takav problem, ali i moguće rješenje predstavljeno je u [19] i [20] gdje je opisana problematika nadogradnje postojećih baznih stanica novom 5G tehnologijom. Također, umjesto korištenja najveće moguće izračene snage, u proračunu jakosti električnog polja korišten je redukcijski faktor koji predstavlja omjer prosječne i najveće zračene snage unutar 24 sata.

Slična problematika obrađena je i u [21]. Razina gustoće snage određena je iz konzervativne metode koja u obzir uzima izračenu snagu, dijagram zračenja antene, udaljenost od izvora te impedanciju slobodnog prostora. U razmatranom sustavu s višestrukim ulazima i izlazima (eng. *Multiple-Input Multiple Output*, MIMO) dijagram zračenja mijenja se u vremenu, stoga je u obzir uzeta vrijednost dijagrama zračenja uprosječena kroz 6-minutni vremenski interval. Za dva pretpostavljena slučaja prikazana je i kumulativna funkcija distribucije snage transmitirane iz bazne stanice, a rezultati istraživanja pokazali su kako je izračena snaga u 95 % odnosno 99 % slučajeva niža od 26 %, odnosno 32 %, dok je sigurnosna udaljenost gotovo upola manja od one dobivene izračunom uz konzervativnu metodu.

Još jedno od mnogih znanstvenih istraživanja bavi se teorijskom procjenom izloženosti EM poljima 5G bazne stanice uzimajući u obzir vremenski uprosječenu razinu izračene snage. Ustanovljeno je smanjenje sigurnosne udaljenosti približno 2,6 puta u odnosu na konzervativni pristup, s prosječnom razinom zračene snage između 7 % i 22 % u odnosu na najveću moguću [22].

S obzirom na sve češće korištenje tzv. "pametnih" antena koje generiraju snopove zračenja prema potrebi korisnika, u novijim istraživanjima izloženosti pribjegava se stohastičkim modelima umjesto tradicionalnom, konzervativnom pristupu. Jednostavan statistički izračun gustoće snage bazne postaje, odnosno razine izloženosti dan je u [23]. Naime, gustoća snage određena je iz vjerojatnosti pojave broja korisnika, odnosno iz vjerojatnosti prisutnosti snopa zračenja u promatranoj točki proračuna. Teorijski model potkrijepljen je i numeričkim primjerom izračuna gustoće snage te terenskim mjerenjem.

Iako se novija istraživanja izloženosti zasnivaju na statističkim modelima izračene snage bazne stanice, u znanstvenim radovima rijetko se spominje utjecaj reflektiranih komponenti na ukupno polje. Radna skupina u [14] donosi metode izračuna i mjerenja jakosti električnog polja i SAR-a u blizini radio-frekvencijskih baznih stanica. Prema prikupljenim istraživanjima i znanstvenim radovima dane su smjernice za izračun izloženosti ljudi EM poljima. Važno je izdvojiti kako se u daljinskom polju izvora za izračun gustoće snage može koristiti aproksimacija slobodnog prostora, dok se pri postojanju reflektirajuće podloge može koristiti faktor refleksije jednak 1 za savršeno vodljivu podlogu, odnosno korekcijski (empirijski) faktor 0,6 za konačno vodljivu podlogu.

Osim brojnih istraživanja na temu proračuna i simulacija razina EM polja u blizini 5G bazne stanice, posljednjih godina pojavljuje se i niz istraživanja na temu mjerenja EM polja u 5G frekvencijskom području. Slično kao i sa starijim tehnologijama (2G, 3G i 4G) i kod nove 5G tehnologije mjerenje će, po svemu sudeći, biti zasnovano na mjerenju signala koji je emitiran konstantnom snagom (tzv. sinkronizacijski blok, SSB). Na izmjerenu vrijednost primjenjivat će se dominantni ekstrapolacijski faktori kako bi se što točnije aproksimirala razina električnog polja pri najvećem mogućem opterećenju bazne stanice [21], [24], [25], [26], [27], [28], [29], [30], [31] i dr.

Pa ipak, zbog specifičnosti i brojnih noviteta u 5G tehnologiji metodologija mjerenja razina EM polja bit će kudikamo drugačija i složenija u odnosu na prijašnje tehnologije (2G, 3G i 4G). Zbog ozbiljne mogućnosti prekoračenja sigurnosnih (graničnih) razina EM polja, znanstvenici, ali i proizvođači 5G odašiljačke opreme, trude se iznjedruti mjernu metodologiju koja će na pouzdan i efikasan način dati informaciju o razinama polja na mjernim lokacijama pazeći na oboje: očuvanje sigurnosti korisnika i opće populacije te smanjenje mogućnosti predimenzioniranja razina EM polja.

U [25] predstavljene su dvije mjerne metode s ciljem određivanja najveće moguće izloženosti EM poljima baznih stanica: frekvencijski-selektivno mjerenje bazirano na mjerenju tzv. SSB-a i mjerenje bazirano na demodulaciji sinkronizacijskog signala (SS). U istraživanju su posebno naglašeni uvjeti koji moraju biti zadovoljeni za valjano korištenje frekvencijski-selektivne metode što bi moglo utjecati na njenu primjenjivost u praksi. Prema tome, ekstrapolacija temeljena na demodulaciji čini se kao prikladnija metoda, iako iziskuje veće operativne troškove.

Problematika ekstrapolacijskih tehnika u cilju aproksimacije najviših razina EM polja opisana je i u [24]. Kao i u prethodno navedenom istraživanju, i u ovom radu mjerenje je bazirano na signalu koji je teorijski uvijek aktivan i emitiran konstantnom snagom (SSB) unutar kojeg je, između ostalog, smješten i demodulacijski referentni signal (DMRS). Posebna pozornost posvećena je determinaciji ekstrapolacijskih faktora kao što su omjer prosječne i najveće izmjerene razine snage, faktor razlike podatkovnog signala i signala za sinkronizaciju te faktor redukcije snage koji se istražuje i u [22].

Ekstrapolacijski faktori analiziraju se i u [31] u svrhu osmišljavanja efikasne metode u aproksimaciji trenutne najveće zračene snage kao i ukupne odaslane snage. Naglašen je učinak tehnologije TDD (eng. *Time Division Duplex*) i formiranja snopova zračenja. Ustanovljen je također i postupak mjerenja TDD faktora u vremenskoj domeni (eng. *Zero Span Measurement*) čiji iznos bi trebao biti približno jednak 0,74. Podjednak iznos tog faktora potvrđen je i u [32]. Nadalje, posebna pozornost posvećena je i faktoru formiranja snopova zračenja koji je jednak omjeru prosječne snage detektiranih SS blokova i snage najizraženijeg SS bloka.

Na višim frekvencijama ($f > 100$ kHz) EM polje utječe na ljudski organizam u vidu zagrijavanja tkiva tj. povišenja tjelesne temperature. Spomenuto je kako povišenje tjelesne temperature za više od 1 °C može dovesti do negativnih učinaka na ljudsko zdravlje, a povišenje iznad 40 °C može dovesti do toplinskog šoka, odnosno smrti. Osim zagrijavanja cijelog tijela postoji i lokalno povišenje temperature, a odnosi se na lokalno zagrijavanje tkiva koje može uzrokovati bol i opekline. Prema [33] 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 [34], [35].

U [36] provedeno je istraživanje termalnih učinaka na glavi korisnika izloženoj različitim mobilnim telefonima u trajanju od 50 min. Ustanovljeno je povišenje temperature na području uha između 0,22 °C i 0,43 °C te povišenje temperature unutar mozga između 0,08 °C i 0,19 °C.

Brojne organizacije istražuju posljedice izloženosti EM poljima, a neke od najpoznatijih istraživanja dali su Svjetska zdravstvena organizacija (eng. *World Health Organization*, 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].

Prema novim ICNIRP-ovim smjernicama [4], u frekvencijskom području ispod 6 GHz fizikalna veličina kojom je pogodno promatrati učinke izloženosti EM poljima jest razina specifične apsorpcije (SAR). Budući da nije prihvatljivo izravno mjeriti SAR, izvedena je ekvivalentna referentna veličina u vidu jakosti incidentnog električnog polja, iako takav pristup može dovesti do predimenzioniranja sigurnosne udaljenosti od izvora. Prema [37] SAR je proporcionalan zračevoj snazi, a njegov izračun može se opisati s obzirom na udaljenost od izvora (blisko reaktivno polje, blisko zračeno polje i daljinsko polje izvora). Važno je istaknuti kako je u zoni daljinskog polja transmitirana snaga obrnuto proporcionalna kvadratu udaljenosti od izvora. Također, u zoni daljinskog polja SAR uvelike ovisi i o širini snopa zračenja, budući da uži snopovi sadrže veću gustoću snage.

Prema [38] za povećanje temperature krvotoka odrasle ženske osobe za 1 °C potrebno je biti izložen SAR-u 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.

U [37] je također razrađen model izračuna SAR_{WB} -a i lokalnog SAR-a, odnosno SAR-a usrednjenog po volumenu koji sadrži 10 g tkiva (SAR_{10g}). U zonama bliskog polja na razinu lokalnog SAR-a uvelike utječe i dimenzija izvora (antene). Dokazano je da izvori s manje elemenata uzrokuju višu razinu SAR-a, budući da se prijelaz iz cilindrične u sfernu propagaciju vala događa na manjoj udaljenosti. Kada se promatra SAR_{WB} , korišteni model izračuna predviđa konstantnu razinu SAR_{WB} -a u zoni bliskog reaktivnog polja. Naglašeno je kako SAR_{WB} , osim već navedenih fizikalnih veličina, ovisi i o dimenziji izloženog tijela. Naime, što je izloženo tijelo manje, za očekivati je veći SAR, budući da omjer mase i volumena tijela opada brže od apsorbirane snage.

Hirata i suradnici u [39] donose izračun SAR-a i odgovarajućeg temperaturnog porasta u modelima tijela izloženih ravnom valu frekvencije između 30 MHz i 6 GHz uzimajući u obzir i termoregulacijske procese. Za određivanje SAR_{WB} -a te lokalnog porasta temperature u tkivu

rješavanjem Pennesove bio-toplinske jednadžbe korištena je metoda konačnih razlika u vremenskom području (eng. *Finite-Difference Time-Domain*, FDTD). Rezultati ovog istraživanja upućuju na smanjenje različitih faktora zagrijavanja - omjera tjelesne temperature i SAR_{WB-a} , kao i smanjenje omjera lokalne temperature i lokalnog SAR-a do čega dolazi uslijed aktivacije termoregulacijskih procesa. Također, ustanovljeno je i smanjenje tjelesne temperature u gigahertznom frekvencijskom području budući da površinsko zagrijavanje postaje dominantnije, a nastaju i gubici topline zbog konvekcije i zračenja na granici tkivo-zrak.

U okviru dozimetrije bitno je ispravno definirati parametre kojima se opisuje tkivo. Za potrebe određivanja SAR-a najviše pozornosti pridaje se relativnoj permitivnosti tkiva, specifičnoj vodljivosti te debljini pojedinog sloja. Odnos relativne permitivnosti i inducirane topline unutar troslojnog tkiva u milimetarskom frekvencijskom području opisan je u [40]. Troslojno tkivo modelirano je slojem kože, masti i mišića. Utvrđeno je da se tkivo više zagrijava kako se smanjuju statička relativna permitivnost i statička specifična vodljivost. Može se istaknuti kako se statička relativna permitivnost i statička specifična vodljivost koriste u Debyevoj jednadžbi za određivanje relativne kompleksne permitivnosti tkiva. Istraživanje je usko povezano s radovima Alekseva, Ziskina i suradnika u [41], [42] i [43] u kojima je istražena refleksija upadnog vala iznad modeliranog tkiva, penetracija gustoće snage, odnos SAR-a i frekvencije vala te odnos relativne permitivnosti tkiva i frekvencije.

SAR je, kako je već spomenuto, izravno povezan s količinom apsorbirane snage. Međutim, dio snage, tj. dio vala koji upada na površinu tkiva (kožu) biva reflektiran, a dio prodire dublje unutar tkiva. U istraživanju [44] na 50 ispitanika provedeno je mjerenje refleksije upadnog vala u milimetarskom frekvencijskom području. Ispitanici su bili osobe različite dobi, fizičke konstitucije te spola, a smatrani su potpuno zdravima. Ovisno o mjestu upada vala (dlan, podlaktica i dr.) izmjeren je iznos refleksije između 0,563 i 0,680. Ustanovljena je također i ovisnost razine refleksije o debljini kože (na mjestima s tanjom kožom refleksija je više izražena), sadržaju vode (više vode uzrokuje veću refleksiju), prokrvljenosti te pojedincu općenito što navodi na zaključak kako iznos SAR-a u dubljim slojevima tkiva znatno ovisi o modelu površinskog sloja.

Analitički izračun SAR_{WB-a} uz razmatranje transmisije, odnosno refleksije na površini tkiva uz primjenu modificirane metode preslikavanja prikazan je u [45] gdje je model ljudskog tijela aproksimiran paralelepipedom sa definiranom relativnom permitivnosti i specifičnom

vodljivosti u ovisnosti o frekvenciji upadnog vala. Tijelo je izloženo valu kojeg izrači dipolna antena na frekvencijama od 0,1 GHz do 6 GHz. Istraživanje je pokazalo kako SAR eksponencijalno opada udaljavanjem tijela od izvora, dok s porastom frekvencije vala raste i razina SAR-a. Također, iznad 3,5 GHz nema značajnije promjene u vrijednostima SAR-a.

Iznad frekvencije od 6 GHz od interesa su S_{ab} i TPD. Numerički i analitički pristup izračunu TPD-a detaljno je opisan u [46] i [47]. Za izračun koeficijenta transmisije EM vala korištena je Fresnelova aproksimacija ravnog vala. Rezultati istraživanja pokazali su eksponencijalni porast razine TPD-a do određene dubine unutar tkiva nakon čega dolazi do zasićenja. Također, prikazana je ovisnost TPD-a o dimenzijama dipola i frekvenciji odaslanog vala.

Instaliranjem i puštanjem u rad sustava nove 5G tehnologije raste i zabrinutost javnosti u vezi mogućih štetnih učinaka na zdravlje. Stoga se povećava broj znanstvenih istraživanja s temom utjecaja EM polja 5G baznih stanica na ljudsko tijelo. U jednom takvom istraživanju [48] ispitana je razina izloženosti polju mobilne antene u 5G frekvencijskom području (27 GHz). U tu svrhu modelirani su različiti, višeslojni tipovi tkiva. Prema rezultatima istraživanja, pri jednoslojnom modeliranju tkiva vrlo lako može doći do procjene nižeg iznosa apsorbirane snage u odnosu na stvarnu. U usporedbi sa troslojnim i četveroslojnim modelom, razina apsorbirane snage bila je manja između 18 % i 55 %. Stoga je za frekvencijska područja niža od 15 GHz predloženo modeliranje tkiva kao četveroslojno sa rožnatim slojem, jedinstvenim slojem sastavljenim od epidermisa i dermisa, zatim slojem masti i slojem mišića. Naime, pri frekvencijama višim od 15 GHz utjecaj sloja mišića bitno se umanjuje. U istraživanju su također detaljno opisani parametri svih modeliranih slojeva tkiva, a rezultati su pokazali kako se većina energije apsorbira u prva dva sloja (rožnati sloj i zajednički sloj epidermisa i dermisa).

Kako je u uvodu spomenuto, u službenoj regulativi za proračun razina polja u prostoru navodi se pristup zasnovan na aproksimaciji slobodnog prostora. Pri tome se ulazne, međusobno neovisne varijable (visina izvora, nagib antene, udaljenost točke proračuna, visina točke proračuna, nadmorske visine izvora i točke proračuna i dr.) uzimaju kao fiksne vrijednosti. Kako bi se smanjio utjecaj pogreške pri definiranju spomenutih varijabli, korisno je definirati i njihovu nesigurnost, odnosno odstupanje. Ovakvim pristupom dobiva se niz skupova ulaznih varijabli pri čemu pojedini skup rezultira po jednom izlaznom veličinom. Naknadnom obradom izlaznih veličina moguće je utvrditi srednju vrijednost, varijancu, odnosno standardno

odstupanje čime se povećava pouzdanost metode proračuna EM polja. Kvantifikacija nesigurnosti daje se provesti uz pomoć neke od stohastičkih metoda, a često korištene su Monte Carlo (MC) i stohastička kolokacija (eng. *Stochastic Collocation*, SC).

MC metoda zasniva se na velikom broju ponavljanja simulacija, a služi za rješavanje različitih tipova problema te se često primjenjuje u matematici, fizici, kemiji, financijama i dr. Primjena MC metode u izračunu izloženosti EM poljima dana je u [49] gdje je model s ulaznim parametrima i njihovim odstupanjima pokrenut 400 puta kako bi se dobio željeni interval pouzdanosti konačne izlazne veličine u iznosu od 95 %.

SC metoda donekle je slična MC metodi, odnosno također se zasniva na određenom broju determinističkih simulacija, odnosno na metodi uzorkovanja, tj. ponavljanja simulacijskog algoritma s promijenjenim vrijednostima ulaznih parametara [50]. Međutim, za SC metodu često se kaže da je zapravo "pametna MC metoda" jer značajno optimizira broj ponavljanja, odnosno broj izvođenja determinističkih proračuna.

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 [51].

1.2. Metodologija istraživanja

Prije puštanja u rad bazne stanice potrebno je izraditi elaborat proračuna jakosti električnog polja u njenoj okolini. U točkama proračuna jakost električnog polja ne smije biti veća od propisanih graničnih razina. Proračun razina električnog polja ovisi o više varijabli kao što su: efektivna izračena snaga (EIRP), gubici zračene snage prema dijagramu zračenja, udaljenost točke proračuna od izvora, procjena nadmorskih visina i apsolutnih visina iznad tla izvora i točke proračuna i dr. Sve ulazne varijable uzimaju se kao međusobno neovisne, fiksne vrijednosti, a službena metoda prema kojoj se izračun vrši jest metoda slobodnog prostora. U okviru aproksimacije slobodnog prostora uzima se u obzir isključivo direktni snop zračenja, zanemarujući reflektirane komponente. 2018. godine izdana je norma prema kojoj se u metodi

proračuna električnog polja može koristiti fiksni faktor refleksije snage u iznosu od 0,6 ili 1 [14].

Budući da se, kako je već spomenuto, za proračun razina polja razmatra isključivo najviša moguća izračena snaga, za očekivati je da se u točki proračuna dobije teorijski najviša razina polja. Međutim, nerijetko se u praksi dogodi kako upravo izmjerena razina električnog polja bude viša od proračunate. Stoga je potrebno, u svrhu zaštite ljudi od utjecaja EM polja, ali i osiguranja tehničkih uvjeta prije puštanja u rad bazne stanice, ovakve slučajeve identificirati.

Mjerenje razina elektromagnetskih polja baznih stanica nužno je za praćenje izloženosti ljudi i popratnu analizu. U praksi postoji više mjernih metoda kojima se može odrediti razina izloženosti. Kod starijih telekomunikacijskih tehnologija (2G, 3G i 4G) mjerenje se uglavnom zasnivalo na određivanju razine signala koji je uvijek emitiran (tzv. pilot signal), budući da bazna stanica ne odašilje nužno najvećom snagom. Izmjerena vrijednost ekstrapolira se uz pomoć određenih parametara na najveći mogući promet, tj. na najveću opterećenost bazne stanice. Tehnika ekstrapolacije, osim što mora osigurati pouzdanost u određivanju razina električnog polja, također mora biti i što je moguće jednostavnija za implementaciju.

Mjerenje razina polja 5G tehnologije također mora pružiti informaciju o najvećoj mogućoj razini izloženosti. Iako se brojna istraživanja pozivaju na činjenicu da je prikladnije određivati prosječnu razinu izloženosti umjesto najviše moguće, još uvijek se u službenim mjerenjima određuje razina polja pri najvećoj izračenoj snazi.

5G tehnologija trenutno radi u frekvencijskom području ispod 6 GHz u kojem je, prema aktualnim ICNIRP-ovim smjernicama, prikladno proučavati razinu specifične apsorpcije (SAR) iskazanu u W/kg. U svrhu određivanja izloženosti najčešće se razmatra SAR cijelog tijela ili lokalni SAR (često označen i kao SAR_{10g}). SAR_{10g} definira se kao snaga apsorbirana u volumenu mase od 10 g, usrednjena po tom volumenu. Volumen mase 10 g najčešće se aproksimira kockom dimenzija 2,15 cm³.

Uz SAR usko je povezana i gustoća transmitirane snage (TPD). TPD se zapravo smatra alternativnom dozimetrijskom veličinom pouzdanom u određivanju povišenja temperature tkiva izloženog upadnom EM valu [47].

Budući da direktna mjerenja na ljudskom tkivu nisu prihvatljiva, pribjegava se mjerenju tzv. referentnih veličina među koje spada i jakost električnog polja. Kako bi se ispitao utjecaj takvih veličina potrebno je na zadovoljavajući način modelirati tijelo, odnosno tkivo čovjeka. Često

se, s obzirom da su realistični modeli zahtjevni, u svrhu inženjerske procjene koriste jednostavni modeli zasnovani na kanonskim geometrijama poput kvadra, sfere, elipsoida ili cilindra. Osim oblika, nužno je definirati i dielektrična svojstva tkiva kao što su specifična vodljivost i relativna permitivnost, ali i debljinu pojedinog sloja.

U dosadašnjim istraživanjima najčešće se mogu pronaći troslojni i četveroslojni modeli ljudskog tkiva. Troslojni modeli najčešće sadrže rožnati sloj, zajednički sloj epidermisa i dermisa i sloj masti. Četveroslojni model sadrži još i sloj mišića. Na umu treba imati i da dubina prodiranja EM energije u tkivo, između ostaloga, ovisi o frekvenciji EM vala. Povišenjem frekvencije dubina prodiranja u tkivo znatno se smanjuje pa pri milimetarskim EM valovima dovoljno je tijelo modelirati kao trosloj.

U ovoj disertaciji provedeno je stohastičko-determinističko modeliranje dozimetrije upadnog i unutarnjeg polja. U okviru determinističke dozimetrije upadnog polja koristi se aproksimacija kratke antene u dalekom polju, a izvedeni su izrazi za koeficijente refleksije EM vala iznad dvoslojne ravne podloge (tla). Razmotren je realni slučaj bazne stanice, odnosno antene postavljene na antenski stup sa stvarnim pripadajućim tehničkim podacima. Točke proračuna postavljene su u daljinskom polju prema uvjetima iz [14]. Svojstva dvoslojne podloge izražena su preko relativne permitivnosti, specifične vodljivosti te debljine prvog (gornjeg) sloja tla, dok se donji sloj smatra neograničenim.

Koeficijenti refleksije proizlaze iz dva različita pristupa: modificirane teorije preslikavanja (MIT) i Fresnelove aproksimacije za ravni val [52], [53], [54], [55], [56], [57]. Kod MIT pristupa na koeficijent refleksije utječu relativna permitivnost podloge, specifična vodljivost i frekvencija upadnog vala. Fresnelov koeficijent refleksije ovisan je pak o impedanciji sredine i kutu upada. Važno je istaknuti kako koeficijent refleksije u oba slučaja ovisi o debljini slojeva tla.

Kako bi se smanjila mogućnost poddimenzioniranja, ali i moguće predimenzioniranje razina polja, u proračun je uključeno odstupanje, tj. nesigurnost pojedine ulazne varijable. Naime, ulazne varijable mogu se modelirati kao slučajne varijable uz određenu funkciju gustoće vjerojatnosti. U najjednostavnijem slučaju daje se pretpostaviti jednolika distribucija vrijednosti slučajne varijable oko postavljene srednje vrijednosti. Za svaki skup ulaznih varijabli provodi se proračun dajući po jednu izlaznu veličinu. Dakle, ukupan broj izlaznih veličina ovisi o ukupnom broju skupova ulaznih varijabli. Izlazne vrijednosti dalje se obrađuju

stohastičkim metodama kako bi se dobila potpunija informacija o izlaznoj veličini od interesa (izračun varijance, standardnog odstupanja i intervala pouzdanosti). U tu svrhu iskorištene su dvije metode stohastičke analize: Monte Carlo (MC) i stohastička kolokacija (SC).

MC metoda relativno je jednostavna, a temelji se na velikom broju ponavljanja postupka kojim se dobiva izlazna veličina. SC metoda slična je MC metodi, a počiva na polinomnoj aproksimaciji izlazne varijable za skup ulaznih parametara pri čemu se unaprijed definira broj tzv. kolokacijskih točaka. Iz dobivenih izlaznih varijabli relativno je jednostavno izračunati varijancu, odnosno standardnu devijaciju. Standardna devijacija potrebna je u određivanju intervala pouzdanosti, tj. nužna je dvostruka i trostruka standardna devijacija kako bi se dobio interval pouzdanosti od 95 %, odnosno 99 % [58].

Osim analize dobivenih rezultata provedena je i analiza osjetljivosti ulaznih parametara, odnosno analizom osjetljivosti ispitan je pojedinačni i skupni utjecaj ulaznih varijabli na izlaznu veličinu. Analizom osjetljivosti moguće je, dakle, rangirati ulazne parametre prema razini utjecaja na izlaznu vrijednost. Jedan od jednostavnijih pristupa u analizi osjetljivosti svakako je "*One-at-a-Time*" (OAT) metoda kojom se proučavaju varijance jednodimenzionalnog problema. Dakle, mijenja se samo po jedna varijabla na ulazu dok se ostale varijable uzimaju kao konstante vrijednosti. U svrhu ispitivanja skupnog utjecaja dvije ili više ulaznih varijabli iskorištena je tzv. analiza varijance (eng. *Analysis of Variance*, ANOVA) koja se temelji na izračunu Sobolovg indeksa [50]. Osim toga, ANOVA-om je moguće dobiti i informaciju o utjecaju pojedinog parametra u interakciji sa svim ostalim ulaznim parametrima [58].

Osim metoda proračuna, uspoređene su i mjerne metode aktualne u 5G frekvencijskom području. Mjerenje je obavljeno u više različitih domena:

- kodna domena (demodulacija SSB-a),
- *zero span* domena (izravno mjerenje snage SSB-a) te
- frekvencijska domena (uskopojasno/kanalno mjerenje razine signala).

Pri kodnoj i *zero span* domeni mjeri se razina signala koji se uvijek emitira konstantnom snagom, a to je u ovom slučaju sinkronizacijski blok (SSB). Na izmjerenu vrijednost dodaju se definirani ekstrapolacijski faktori.

Iako još uvijek nema jednoznačnog načina mjerenja razina polja 5G tehnologije, u znanstvenim radovima najčešće se spominju sljedeći ekstrapolacijski faktori:

- ukupan broj podnositelja,
- faktor razlike snage pri podatkovnom prometu i sinkronizacijskog signala,
- faktor radnog ciklusa,
- faktor redukcije snage i dr.

Osim ekstrapolacijskih metoda u mjerenju razina polja iskorištena je i konzervativna metoda uskopojasnog/kanalnog mjerenja u frekvencijskoj domeni (eng. *Channel Power*, CP) [52], [59], [60] pri čemu se podatkovni promet inicirao upotrebom 5G mobilnog uređaja.

Post-procesiranjem i međusobnom usporedbom izmjerenih veličina ispitana je pouzdanost i definirana mogućnost primjene pojedine mjerne metode.

U okviru determinističke dozimetrije unutarnjeg polja kao ulazna veličina na površini višeslojnog modela tkiva koristi se vrijednost izračenog polja bazne stanice dobivena mjerenjem i/ili proračunom. Propagacija polja kroz višeslojno tkivo predočena je analitičkim izrazima na temelju pretpostavke okomitog upada vala na tkivo. Nakon dobivanja analitičkih izraza za polje u različitim slojevima tkiva primjenom aproksimacije ravnog vala određen je SAR usrednjen po čitavom tkivu, odnosno gustoća transmitirane snage.

U okviru stohastičkog dijela modela unutarnjeg polja kvantifikacija nesigurnosti ulaznih parametara (specifična vodljivost i relativna permitivnost) provedena je primjenom stohastičke kolokacije za varijable kojima se opisuju parametri tkiva te pripadna analiza osjetljivosti primjenom prethodno opisanih metoda. Tako su za dobivene vrijednosti ukupnog upadnog polja koje slijede iz dozimetrije upadnog polja analizirane realistične razine izloženosti višeslojnog tkiva kroz izračun dozimetrijskih veličina SAR-a i TPD-a.

S obzirom na opisanu problematiku, odnosno metodologiju istraživanja, proizašle su tri osnovne hipoteze disertacije:

- Metoda proračuna jakosti električnog polja može se unaprijediti uzimanjem u obzir reflektirane komponente električnog polja iznad dvoslojne vodljive podloge. Refleksija vala od podloge uzima se u obzir preko odgovarajućih refleksijskih koeficijenata primjenom dva pristupa koji proizlaze iz

modificirane teorije preslikavanja (MIT) i Fresnelovih refleksijskih koeficijenata.

- Primjenom stohastičkih metoda moguće je uzeti u obzir utjecaj nesigurnosti ulaznih parametara na izračun jakosti električnog polja u točki prostora u svrhu određivanja teorijske najviše razine polja i razine polja s najvećom vjerojatnosti pojavljivanja, odnosno u svrhu dobivanja intervala pouzdanosti odziva.
- Korištenjem mjernih metoda, odnosno pouzdanim post-procesiranjem mjernih rezultata i korištenjem unaprijedenih metoda proračuna, uz primjenu stohastičke analize pri modeliranju višeslojnog modela tijela, moguće je odrediti razine izloženosti kroz izračun dozimetrijskih veličina SAR-a i TPD-a.

1.3. Znanstveni doprinos i organizacija disertacije

Iako su do sada objavljena brojna istraživanja na temu proračuna razina EM polja, utjecaj komponente polja koja se reflektira od podloge na ukupnu jakost polja još uvijek se rijetko uzima u obzir. Također, značajno nedostaje i istraživanja na temu utjecaja pojedinih parametara. Ovo područje od iznimnog je interesa organizacijama koje se bave ispitivanjem razina EM polja u okolini bazne stanice u svrhu pouzdanog određivanja razina izloženosti. Stoga je od interesa unaprijediti jednostavni model izračuna razina električnog polja u svrhu izračuna najviše moguće i najizglednije vrijednosti polja, smanjenja mogućnosti poddimenzioniranja razina polja te ispitivanje pojedinačnog i skupnog utjecaja definiranih ulaznih varijabli na izlaznu veličinu.

Od posebnog su interesa i mjerenja razina EM polja u 5G frekvencijskom području kako bi se ispitala pouzdanost i područje primjene aktualnih mjernih metoda s ciljem jednostavnijeg rada na terenu te smanjenja operativnih troškova.

S obzirom na upadno polje dobiveno proračunima i mjerenjima, analizirani su jednostavni (kanonski) modeli ljudskog tijela izloženi zračenju visokih frekvencija za potrebe dozimetrije unutarnjeg polja.

Naposljetku, od interesa je i primjena stohastičkog modeliranja u svrhu ispitivanja utjecaja ulaznih varijabli na izlaznu veličinu od interesa (E , SAR i TPD) kako bi se pružila informacija o najvjerojatnijem, ali i najgorem slučaju izloženosti.

Prema navedenom, očekivani znanstveni doprinosi ove doktorske disertacije vidljivi su kroz sljedeće stavke:

- Temeljni znanstveni doprinos ove doktorske disertacije je razvoj novog determinističko-stohastičkog modela antenskog sustava baznih stanica predstavljenog nizom žičanih antena iznad zemlje za analizu upadnog polja. Deterministički dio modela zasniva se na proširenom konceptu električki kratkih antena iznad višeslojne sredine pri čemu se val reflektiran od granice zrak-višesloj uzima u obzir preko refleksijskih koeficijenata koji proizlaze iz dva pristupa: modificirane teorije preslikavanja i Fresnelove aproksimacije za ravni val. Stohastičkom analizom moguće je dobiti interval pouzdanosti za razmatranu izlaznu veličinu u vidu izračenog polja.
- Daljnji znanstveni doprinos je provođenje analize osjetljivosti odziva od interesa u smislu određivanja ulaznog parametra koji najviše utječe na varijacije izlazne veličine od interesa. Analizom osjetljivosti, odnosno OAT metodom, biti će moguće rangirati ulazne parametre prema razini utjecaja na izlaznu vrijednost. Analizom varijance moći će se pak ustanoviti razina skupnog utjecaja pojedine varijable u interakciji s ostalim ulaznim varijablama.
- Znanstveni doprinos predložene disertacije je i razvijanje višeslojnog paralelepipednog modela tkiva za proračun SAR-a i TPD-a za koji su izvedeni analitički izrazi. Ovaj model zasniva se na upadnom polju kao ulaznoj veličini koju daje prethodni znanstveni doprinos (analiza upadnog polja).
- Važan doprinos ovog rada je i moguća primjena razvijenih metoda u izradi priručnika za sveobuhvatniju i točniju procjenu polja konkretnih antenskih sustava radio-baznih stanica. Izrada ovakvih priručnika je od iznimne važnosti za postojeću, ali i nadolazeću tehnologiju bežičnih komunikacija.

Osim navedenih doprinosa, pretpostavljene mogućnosti primjene rezultata istraživanja ove disertacije su sljedeće:

- Primjenom koeficijenta refleksije unaprijedit će se i prilagoditi postojeća metoda određivanja polja zasnovana na pretpostavci slobodnog prostora s ciljem smanjenja mogućnosti poddimenzioniranja razina EM polja u točkama proračuna.
- Primjenom stohastičke analize u proračunu razina EM polja moguće je iznjedriti jednostavan pristup proračunu ne samo najgoreg mogućeg slučaja izloženosti, već i onog najizglednijeg, odnosno realističnog, s definiranim intervalom pouzdanosti.
- Analizom osjetljivosti ulaznih parametara za proračun razina EM polja ukazat će se na razinu pouzdanosti izlaznih veličina s obzirom na najutjecajnije ulazne parametre.
- Ispitivanjem pouzdanosti mjernih metoda u 5G frekvencijskom području definirat će se mogućnosti njihove primjene s ciljem pojednostavnjena rada na terenu, ali i smanjenja operativnih troškova.
- Pružit će se jednostavan model u primjeni rezultata proračuna i mjerenja upadnog polja pri određivanju razina izloženosti u vidu izračuna veličina unutarnje dozimetrije: SAR-a i TPD-a.

Disertacija je podijeljena ukupno u 10 poglavlja. U drugom poglavlju opisani su biološki učinci EM polja na čovjeka te aktualne međunarodne smjernice za zaštitu i smjernice za zaštitu koje su na snazi u Republici Hrvatskoj. U trećem poglavlju dana je povijest razvoja bežičnih telekomunikacijskih tehnologija te implementacija i struktura nove 5G tehnologije. Antenski sustavi kao izvori EM polja opisani su u četvrtom poglavlju. Neke od metodologija proračuna upadnog električnog polja, odnosno gustoće snage prikazani su u petom poglavlju. Također, detaljno su opisani postupci mjerenja razina EM polja u visokofrekvencijskom području ispod 6 GHz. Posebna pozornost posvećena je aktualnim mjernim metodama oko kojih se još uvijek vode ispitivanja o adekvatnosti primjene za mjerenje razina EM polja 5G tehnologije. Pored dozimetrije upadnog polja, u šestom poglavlju opisana je dozimetrija unutarnjeg polja koja je usko povezana s matematičkim modeliranjem izloženog tkiva (tijela) te dozimetrijskim veličinama prikladnim za ispitivanje razina izloženosti u frekvencijskom području ispod 6 GHz: SAR i TPD. Osim determinističkih slučajeva, u sedmom poglavlju posebna važnost pridana je stohastičkom modeliranju pri proračunima razina EM polja u okolini bazne stanice

i ispitivanju spomenutih dozimetrijskih veličina. Stohastičkim modeliranjem nesigurnosti ulaznih parametara propagiraju se na nesigurnost izlazne veličine od interesa (E , E_{inc} , SAR i TPD) kako bi bilo moguće odrediti najgori i najizgledniji slučaj izloženosti. Osim kvantifikacije nesigurnosti, analizom osjetljivosti u vidu ispitivanja pojedinačnih indeksa osjetljivosti ulaznih varijabli i ukupnog indeksa osjetljivosti, prikazane su razine utjecaja pojedinih varijabli i razina utjecaja interakcije ulaznih varijabli na izlaznu veličinu od interesa. Rezultati stohastičko-determinističkog izračuna razina EM polja u okolini bazne stanice, usporedba s izmjerenim rezultatima te stohastičko-deterministička analiza dozimetrijskih veličina (E_{inc} , SAR i TPD) dani su u osmom poglavlju. Zaključne zabilješke dane su u devetom, a popis korištene literature prikazan je u desetom poglavlju.

2. Biološki učinci EM polja i smjernice za zaštitu od prekomjerne izloženosti

2.1. Biološki učinci EM polja

Čovjek je neprestano izložen djelovanju prirodnih EM polja kao što su Zemljino magnetsko polje ili pak Sunčevo zračenje. Međutim, razvoj bežične telekomunikacijske tehnologije u posljednjih 30-ak godina doprinio je povećanju razina umjetno stvorenih EM polja na frekvencijskom opsegu između 100 kHz i 4 GHz, na kojem trenutno rade mrežne tehnologije, odnosno bazne stanice.

Suvremeni mobilni uređaji odavno su prerasli svrhu uspostavljanja poziva i slanja SMS poruka te već godinama postaju sredstvo za modernu komunikaciju, poslovno upravljanje, ali i zabavu. Povećanje korisničkih zahtijeva podrazumijeva nadogradnju postojećih baznih stanica ili gradnju novih. Današnji povećani zahtjevi za električnom energijom, internetom i bežičnom komunikacijom razlog su sve većih akumuliranih razina izloženosti umjetno stvorenim EM poljima. Mogući štetni učinak takvih EM polja na zdravlje nije samo predmet stručnih istraživanja, već izaziva interes i zabrinutost široke javnosti, a ova tema dodatno je dobila na značenju implementacijom nove 5G tehnologije.

Utjecaj EM polja na čovjeka, između ostaloga, ovisi 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 dozom ozračenosti [61], [62]. Iako je zasad 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 [4], [5], [18], [63].

Stoga se provode mnoge epidemiološke studije na tu temu, no važno je istaknuti kako su takve studije važne u uspostavljanju hipoteza, ali ne mogu biti dovoljne za stvaranje relevantnih zaključaka, odnosno mogu poslužiti isključivo za opisivanje veze između uzroka i posljedica, ali iste ne mogu i dokazati [64].

Biološki učinci EM polja na čovjeka očituju se kroz bilo kakve detektabilne, reverzibilne ili nereverzibilne fiziološke promjene u organizmu. Pri niskim frekvencijama EM polja imaju dominantni učinak na neuromišićne stimulacije što se najčešće očituje kao pojava trnaca. EM

polja niskih frekvencija također utječu i na distribuciju električnih naboja po površini tijela stvarajući struje koje teku kroz tijelo prema zemlji ili pak na 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 [18].

U frekventijskom području iznad 100 kHz učinci EM polja s elektrostimulacije živčanog sustava prelaze u učinke promjene u permeabilnosti membrana i povišenja temperature unutar ili na površini tkiva (tablica 2.1).

Tablica 2.1 Međudjelovanje EM polja i ljudskog tijela [4], [61]

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 – 6 GHz)	Zagrijavanje tkiva	Razina specifične apsorpcije SAR (W/kg)
Mikrovalno i milimetarsko zračenje (6 – 300 GHz)	Površinsko zagrijavanje	Gustoća apsorbirane snage S_{ab} (W/m ²)

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. Naime, pri $f > 100$ kHz tijelo apsorbira dozračenu EM energiju, a energija koju nosi val prenosi se na molekule unutar tkiva. Molekule koje prime takvu energiju počinju se rotirati, odnosno naboji koji se počinju gibati međusobno se sudaraju te se njihova kinetička energija pretvara u toplinsku. Kada se govori o toplinskim učincima, ovisno o visini frekvencije EM vala, odnosno dubini prodiranja EM energije u tkivo, promatra se zagrijavanje u dubini ili pak površinsko zagrijavanje tkiva.

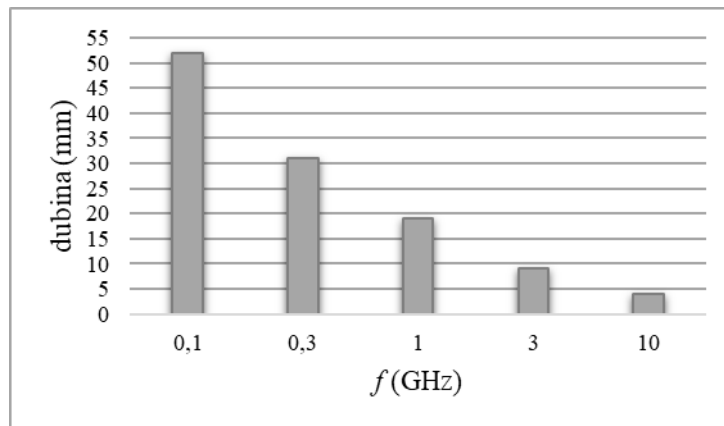
Pri izloženosti ekstremno visokim intenzitetima EM polja dokazani su štetni učinci po zdravlje. Primjerice, jedan od negativnih učinaka jest povećanje propusnosti barijere koja bi inače priječila protok određenih supstancija u mozak putem krvi. Neki pak istraživači ističu štetan utjecaj mobilnog telefona na mentalne procese (pozornost, kratkotrajna memorija, upravljanje informacijama ili pak vrijeme reakcije). Do potencijalno štetnih učinaka po zdravlje može doći pri biološkim učincima koje organizam regulacijskim procesima nije sposoban kompenzirati,

a koji ovise o vremenu i razini izloženosti. No, i danas se postavlja pitanje postoji li štetni učinak po zdravlje pri izloženosti razinama EM polja pri kojima nema evidentnih toplinskih efekata. Dodatno pitanje je mogu li efekti nastupiti i kada je tijelo sposobno regulacijskim mehanizmima uspostaviti ravnotežu, usprkos dozračenoj EM energiji [64], [65].

Kada se govori o utjecaju EM polja na čovjeka u vidu povišenja tjelesne temperature onda [18] 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 (hipertermija), negativni učinci na ljudsko zdravlje su mogući, a povišenje iznad 40 °C može dovesti do toplinskog šoka, odnosno smrti. Tjelesna temperatura u vezi je s toplinskom energijom u tijelu, što je u velikoj mjeri ovisno o sposobnosti regulacije tjelesne temperature znojenjem te omjerom mase i površine tijela. Naime, apsorbirana EM energija na površinskim dijelovima tijela prenosi se u njegovu unutrašnjost krvotokom čime se aktivira termoregulatorni sustav kako bi organizam održao tjelesnu temperaturu stabilnom. Gubici topline uzrokovani znojenjem pridonose smanjenju tjelesne temperature. Slično tome, izmjena topline na površini kože također uvjetuje razinu promjene tjelesne temperature. Naime, porast temperature tijela proporcionalan je omjeru ukupne apsorbirane snage i površine tijela [4].

Izloženost lokalnom zagrijavanju tkiva može dovesti do osjećaja boli odnosno opekline, a štetnim se smatra 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. Na razinu lokalnog zagrijavanja uvelike utječu mnogi faktori kao što su vrsta odjeće, uvjeti u okolišu, fiziološko stanje organizma i dr.

Dubina prodiranja EM energije u tkivo uvelike je ovisna o frekvenciji upadnog EM vala. Naime, pri frekvencijama nižim od 6 GHz apsorbirana energija prodire dublje u tkivo. Povišenjem frekvencije EM polja iznad 6 GHz rezultirajuće zagrijavanje tijela postaje više površinsko (slika 2.1).



Slika 2.1 Dubina prodiranja EM energije u ovisnosti o frekvenciji [70]

Prema nekim istraživanjima dubina penetracije vala pri frekvenciji od 6 GHz jednaka je 6 mm [39], a pri frekvenciji višoj od 30 GHz dubina prodiranja energije manja je od 1 mm [66]. Smatra se da je približno 86 % snage apsorbirano na dubini između 8 mm i 0,2 mm pri frekvencijama između 6 GHz i 300 GHz [4], [5]. Također, u usporedbi s toplinom generiranom u dubljim slojevima tkiva, toplina u površinskim dijelovima lakše se disipira u okoliš.

Prema [33], smatra se kako doticaj površinskog sloja tkiva (kože) s temperaturom nižom od 42 °C neće uzrokovati bol ili oštećenja tkiva. No, također, u [4] su navedena i neka istraživanja koja upućuju na oštećenje tkiva pri povišenju temperature iznad 41 °C, odnosno 43 °C.

Korisno je izdvojiti činjenicu kako je količina apsorbirane energije viša pri rezonantnim frekvencijama. Rezonantnom frekvencijom smatra se frekvencija pri kojoj je polovica valne duljine jednaka visini čovjeka u slobodnom prostoru, ili pri kojoj je četvrtina valne duljine jednaka visini čovjeka koji stoji na tlu [4].

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 [67]. Dapače, u većini slučajeva razine zračenja baznih stanica u odnosu na mobilne uređaje postavljene neposredno uz tijelo višestruko su niže, odnosno višestruko niže od dozvoljenih graničnih razina [64], [68].

Prema [65] temperaturni porast od 0,3 °C u području hipotalamusa kod djece može izazvati proširenje krvnih žila, povećanje protoka krvi, isparavanje znojenjem, a moguće su i promjene u brzini propagacije živčanih impulsa. U [36] se također navodi i granično povišenje temperature od 4,5 °C pri kojem dolazi do oštećenja neurona u trajanju izloženosti dužem od

30 min, povišenje temperature od 10 °C za oštećenja na koži, a posebno su istaknute i različite fiziološke posljedice pri povišenju tjelesne temperature u iznosu između 1 °C i 2 °C kod životinja.

Postoje istraživanja na temu korištenja mobilnog uređaja dugi vremenski period (10 i više godina) što može povećati rizik od teških, zloćudnih bolesti i do 40 %. Međutim rezultati takvih istraživanja smatraju se nedosljednim, odnosno još uvijek nema relevantnih dokaza da EM polja mogu uzrokovati tumore [69]. Prema Svjetskoj zdravstvenoj organizaciji (*eng. World Health Organization*) radiofrekvencijska EM polja pripadaju u skupinu potencijalno kancerogenih [21].

Istraživanja na temu zdravstvenih rizika zbog izloženosti radio-frekvencijskim (RF) EM poljima uglavnom su vezana uz funkcije i fiziologiju mozga, slušne i očne funkcije, neuroendokrini sustav, neurodegenerativne bolesti, kardiovaskularni sustav, živčani sustav, termoregulacijski sustav, imunološki sustav, reproduktivni sustav, te kancerogene bolesti. Prema [4] ne postoje relevantni dokazi o štetnom utjecaju pri izloženosti razinama EM polja propisanim u temeljnim, odnosno referentnim ograničenjima.

2.2. Smjernice za zaštitu od EM polja

Kako bi se izbjegli štetni učinci na zdravlje, odnosno spriječila prekomjerna izloženost EM poljima baznih stanica, brojne svjetske organizacije propisuju mjere zaštite i definiraju granične vrijednosti za izloženost. Najpoznatije dvije takve organizacije su ICNIRP (*eng. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection*, [4]) i IEEE (*eng. The Institute of Electrical and Electronics Engineers*, [5]). Općenito govoreći, u Europi su prihvaćene granične razine izloženosti EM poljima propisane upravo od strane ICNIRP-a. Međutim, države i lokalne zajednice slobodne su same regulirati nacionalne legislative u svrhu zaštite zdravlja, kako javnosti, tako i radnika koji obavljaju poslove vezane uz izvore EM polja.

U svrhu zaštite od neionizirajućih EM polja u Republici Hrvatskoj trenutno su na snazi *Pravilnik o zaštiti od elektromagnetskih polja* [6], *Pravilnik o izmjenama i dopunama*

Pravilnika o zaštiti od elektromagnetskih polja [7] te Pravilnik o zdravstvenim uvjetima kojima moraju udovoljavati radnici koji obavljaju poslove s izvorima neionizirajućeg zračenja [8].

Granične razine definiraju se prema znanstvenim i stručnim spoznajama koje se često temelje na istraživanju nad fantomima, a u kojima je dokazan štetni učinak na organizam. Prema tome granične razine temeljene su na konkretnim dokazima o štetnim učincima, a ne na hipotezama, odnosno tvrdnjama. 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].

U smjernicama za zaštitu [4] primarno su definirane granice nepovoljnih učinaka ili pak operativne granice za koje postoje saznanja o štetnim učincima izloženosti. Na takve granične razine naknadno su primijenjeni sigurnosni faktori zbog varijabilnosti unutar populacije (starosna dob, spol), varijabilnosti u okolišu (temperatura, vlažnost i sl.) te različitih nesigurnosti prilikom određivanja stvarnih razina izloženosti čime se definiraju temeljna ograničenja (*eng. Basic Restrictions*). Temeljna ograničenja odnose se na veličine usko povezane sa štetnim RF učincima, a neke od njih su fizikalne veličine koje je teško ili pak neprimjereno izravno mjeriti.

S obzirom na rizik po zdravlje, osnovno je pitanje kolika se količina EM energije apsorbira u biološkom tkivu, budući da ona ima najviši utjecaj na termalne učinke opisane u prethodnom potpoglavlju. Pokazano je kako povišenjem frekvencije EM vala opada mogućnost penetracije EM energije u tkivo. S obzirom na dubinu penetracije 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 [70], [71].

Prema smjernicama [4], [5] za dugoročne izloženosti najčešće se izračunava SAR koji se označava i kao SAR cijelog tijela (eng. *Whole Body SAR*), 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. Prema [4] izloženost razinama SAR-a od 6 W/kg u frekvencijskom opsegu između 100 kHz i 6 GHz tijekom 1 h uzrokovat će porast tjelesne temperature za 1 °C kod odrasle osobe. Nešto viši SAR potreban je za jednaki porast temperature kod djece, budući da ona imaju efikasniji sustav odvođenja topline. Sukladno tome, na frekvencijskom opsegu između 100 kHz i 300 GHz, u [4] je prihvaćena razina SAR-a u iznosu od 4 W/kg uprosječena kroz vremenski period od 30 min potrebna da se tijelu povisi temperatura za 1 °C. Na navedenu razinu naknadno je primijenjen faktor 10 za slučaj izloženosti radnika (profesionalna izloženost), stoga je granična razina postavljena na 0,4 W/kg uprosječena kroz 30-minutni vremenski interval. Za slučaj izloženosti na javnim područjima primijenjen je redukcijski faktor 50, odnosno granična razina postavljena je na 0,08 W/kg uprosječena kroz 30-minutni vremenski interval.

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.) [61]. Vrijednost SAR-a tada se često usrednjava po volumenu mase. Istraživanje kao što je [72] usrednjavanje po masi od 1 g smatra neprikladnim, odnosno lošim indikatorom povećanja tjelesne temperature. Danas se masa od 10 g (kocka duljine stranice 2,15 cm) najčešće uzima pri usrednjavanju, a oznaka za takvu veličinu je 10-g-SAR ili SAR_{10g}. U frekvencijskom opsegu između 100 kHz i 6 GHz SAR_{10g} koristi se i za opisivanje lokalnog zagrijavanja, odnosno kao prikladna mjera za opis porasta temperature tkiva. Stoga su, u ovisnosti o dijelu izloženog tijela (glava, torzo, udovi i dr.) u [4] definirane najviše vrijednosti koje osiguravaju da granične razine porasta temperature pri kojima može doći do štetnih učinaka ne budu prekoračene (do 5 °C za tkiva *tipa 1*, odnosno do 2 °C za tkiva *tipa 2*).

Do štetnih učinaka može dovesti izloženost SAR_{10g}-u u iznosu od 20 W/kg na području glave i torza. Na ovu veličinu primijenjen je redukcijski faktor 2 za profesionalnu izloženost, odnosno faktor 10 za izloženost opće populacije čime su granične razine izloženosti postavljene na 10 W/kg, odnosno 2 W/kg. U slučaju izloženosti udova, štetnim se smatra izloženost SAR_{10g}-u u iznosu od 40 W/kg. Primjenom redukcijskih faktora granične razine za izloženost postavljene

su na iznos od 20 W/kg za slučaj profesionalne izloženosti, odnosno 4 W/kg za slučaj izloženosti opće populacije.

Kada je lokalno zagrijavanje u pitanju, pri frekvencijama iznad 6 GHz prikladnijim se smatra razmatrati apsorbiranu gustoću snage (S_{ab}) preko koje je također moguće razmatrati povišenje temperature, budući da je pri takvim frekvencijama većina dozračene snage apsorbirana unutar kožnog tkiva, odnosno u prvoj polovici definirane kocke dimenzija $2,15^3 \text{ cm}^3$ korištene pri izračunu SAR_{10g} . Smatra se da razina S_{ab} u iznosu većem od 200 W/m^2 , uprosječenom kroz 6-minutni vremenski period nad površinom od 4 cm^2 može uzrokovati štetne učinke. Kao i u prethodnom slučaju za određivanje graničnih razina uzet je faktor 2 za slučaj profesionalne izloženosti, odnosno faktor 10 za slučaj izloženosti opće populacije. Stoga su granične razine postavljene na 100 W/m^2 , odnosno 20 W/m^2 . Površina od 4 cm^2 uzeta je jer pruža zadovoljavajuću aproksimaciju za lokalno najviše povišenje temperature uslijed izloženosti EM poljima frekvencije više od 6 GHz.

U Republici Hrvatskoj je prema [7] definirana granična vrijednost SAR-a na frekvencijskom opsegu između 100 kHz i 10 GHz posebno propisana za cijelo tijelo, glavu i trup te udove (tablica 2.2).

Tablica 2.2 Granične vrijednosti SAR-a po izloženim dijelovima tijela za opću populaciju [6]

$f \text{ (GHz)}$	$\text{SAR} \left(\frac{\text{W}}{\text{kg}} \right)$		
	<i>cijelo tijelo</i>	<i>glava i trup</i>	<i>udovi</i>
$10^{-4} - 10$	0,08	2	4

Na frekvencijskom pak području iznad 10 GHz definirana je granična razina gustoće snage (tablica 2.3).

Tablica 2.3 Granična razina gustoće snage za opću populaciju na frekvencijskom području iznad 10 GHz [6]

$f \text{ (GHz)}$	$S \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right)$
10 – 300	10

Kako je u uvodu već objašnjeno, mjerenje dozimetrijskih veličina (SAR i S_{ab}) nije prikladno. Zbog toga se na osnovu temeljnih veličina izvode tzv. referentne veličine (eng. *Reference Levels*) koje su praktične za izravno mjerenje, a sukladno tome izvedene su i referentne granične razine koje proizlaze iz temeljnih ograničenja. Valja napomenuti kako su referentne granične razine izvedene uz konzervativni pristup stoga je za očekivati da referentna ograničenja budu stroža nego temeljna ograničenja.

Prema tome, pri najgorem slučaju izloženosti referentnim razinama, osigurano je zadovoljenje temeljnih graničnih razina. To također znači da razina izloženosti može prekoračiti dozvoljene granične referentne razine izloženosti, dok istovremeno razine izloženosti budu niže od temeljnih graničnih razina.

U referentne veličine spadaju primjerice incidentno električno i magnetsko polje (E_{inc} , H_{inc} , B_{inc}), incidentna gustoća snage (S_{inc}), gustoća snage ekvivalentnog ravnog vala (S_{eq}), incidentna gustoća energije (U_{inc}) i dr. Sve spomenute veličine mjere se izvan tijela izloženog zračenju.

U Republici Hrvatskoj na snazi su trenutno ograničenja referentnih veličina dana u tablicama ispod, ovisno o kategoriji izložene populacije.

Tablica 2.4 Granične razine za E i B između za područje povećane osjetljivosti prema [6]

f (MHz)	E ($\frac{V}{m}$)	B (μT)	S ($\frac{W}{m^2}$)
10 – 400	11,20	0,0368	0,326
400 – 2000	$0,55 \cdot \sqrt{f}$	$1,84 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{f}$	$\frac{f}{1250}$
2000 – 10 000	24,40	0,08	1,6

Tablica 2.5 Granične razine za E i B između za javna područja prema [6]

f (MHz)	E ($\frac{V}{m}$)	B (μT)	S ($\frac{W}{m^2}$)
10 – 400	26,00	$8,7 \cdot 10^{-2}$	1,80
400 – 2000	$1,3 \cdot \sqrt{f}$	$4,3 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{f}$	$4,5 \cdot 10^{-3} \cdot f$
2000 – 10 000	58,00	0,19	8,9

Tablica 2.6 Granične razine za E i H za područje izloženosti radnika prema [8]

f (MHz)	E $\left(\frac{V}{m}\right)$	B (μT)	S $\left(\frac{W}{m^2}\right)$
10 – 400	61,00	0,20	-
400 – 2000	$3 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{f}$	$1 \cdot 10^{-5} \cdot \sqrt{f}$	-
2000 – 6000	$1,4 \cdot 10^2$	$4,5 \cdot 10^{-1}$	-

Graničnim referentnim razinama mora udovoljavati svaki izvor EM polja pojedinačno. No, u slučaju postojanja više izvora različitih frekvencija, kumulativni efekt djelovanja izvora EM polja u vidu ozračenosti mora biti zadovoljen.

Prema tome, za izloženost cijelog tijela u intervalu uprosječenja većem ili jednakom 6 min, vrijedi [4]:

$$\begin{aligned}
 & \sum_{i=100 \text{ kHz}}^{30 \text{ MHz}} \left\{ \left(\frac{E_{inc,i}}{E_{inc,RL,i}} \right)^2 + \left(\frac{H_{inc,i}}{H_{inc,RL,i}} \right)^2 \right\} + \\
 & \sum_{i>30 \text{ MHz}}^{2 \text{ GHz}} \text{MAX} \left\{ \left(\frac{E_{inc,i}}{E_{inc,RL,i}} \right)^2, \left(\frac{H_{inc,i}}{H_{inc,RL,i}} \right)^2, \left(\frac{S_{inc,i}}{S_{inc,RL,i}} \right)^2 \right\} + \quad (2.1) \\
 & \sum_{i>2 \text{ GHz}}^{300 \text{ GHz}} \left(\frac{S_{inc,i}}{S_{inc,RL,i}} \right)^2 \leq 1
 \end{aligned}$$

gdje indeks " inc, i " označava incidentnu vrijednost fizikalne veličine, a " inc, RL, i " graničnu referentnu vrijednost veličine za izvor frekvencije i .

Za lokalnu izloženost vrijedi pak [4]:

$$\sum_{i=100 \text{ kHz}}^{30 \text{ MHz}} \text{MAX} \left\{ \left(\frac{E_{inc,i}}{E_{inc,RL,i}} \right)^2, \left(\frac{H_{inc,i}}{H_{inc,RL,i}} \right)^2 \right\} + \quad (2.2)$$

$$\begin{aligned}
& \sum_{i>30 \text{ MHz}}^{2 \text{ GHz}} \text{MAX} \left\{ \left(\frac{E_{inc,i}}{E_{inc,RL,i}} \right)^2, \left(\frac{H_{inc,i}}{H_{inc,RL,i}} \right)^2, \left(\frac{S_{inc,i}}{S_{inc,RL,i}} \right)^2 \right\} + \\
& \sum_{i>2 \text{ GHz}}^{6 \text{ GHz}} \left(\frac{S_{inc,i}}{S_{inc,RL,i}} \right)^2 + \\
& \sum_{i>6 \text{ GHz}}^{30 \text{ GHz}} \left(\frac{S_{inc,4 \text{ cm}^2,i}}{S_{inc,4 \text{ cm}^2,RL,i}} \right)^2 + \\
& \sum_{i>30 \text{ GHz}}^{300 \text{ GHz}} \text{MAX} \left\{ \left(\frac{S_{inc,4 \text{ cm}^2,i}}{S_{inc,4 \text{ cm}^2,RL,i}} \right)^2, \left(\frac{S_{inc,1 \text{ cm}^2,i}}{S_{inc,1 \text{ cm}^2,RL,i}} \right)^2 \right\} \leq 1
\end{aligned}$$

Kako je istaknuto u [6], na frekvencijskom području između 100 kHz i 300 GHz za slučaj djelovanja EM polja više frekvencija moraju biti zadovoljeni uvjeti:

$$\sum_{i>1}^N \left[\frac{E_i(f_i)}{E_{RL,i}(f_i)} \right]^2 \leq 1 \quad (2.3)$$

$$\sum_{i>1}^N \left[\frac{H_i(f_i)}{H_{RL,i}(f_i)} \right]^2 \leq 1 \quad (2.4)$$

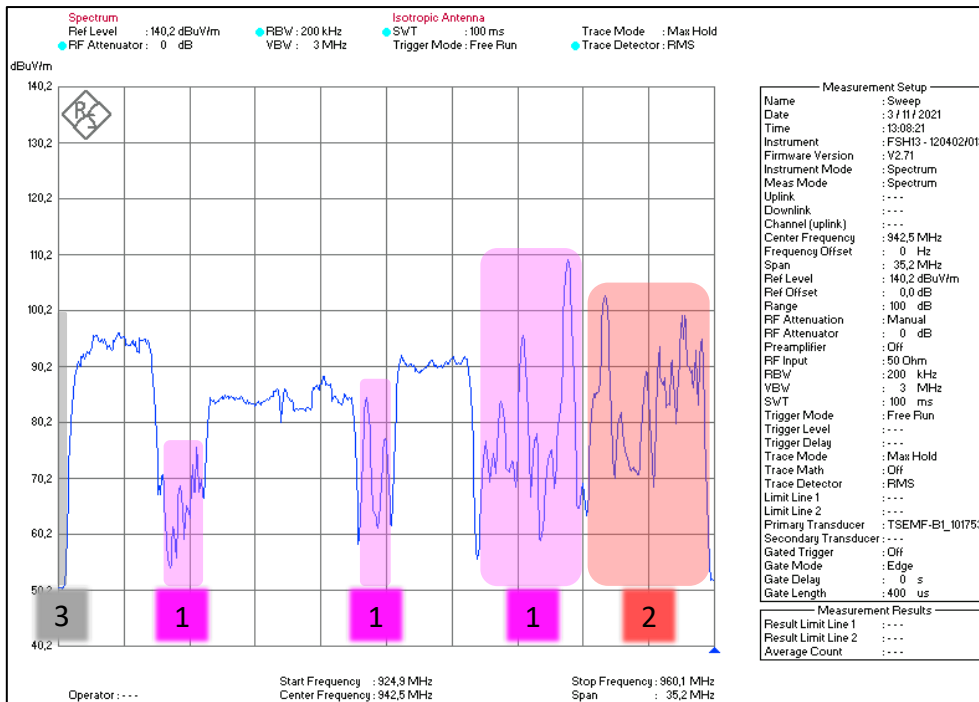
gdje $E_i(f_i)$ i $H_i(f_i)$ označavaju izmjerenu/izračunatu razinu električnog, odnosno magnetskog polja i -tog izvora, a $E_{RL,i}(f_i)$ i $H_{RL,i}(f_i)$ granične razine električnog, odnosno magnetskog polja na frekvenciji f .

3. Bežične telekomunikacijske tehnologije

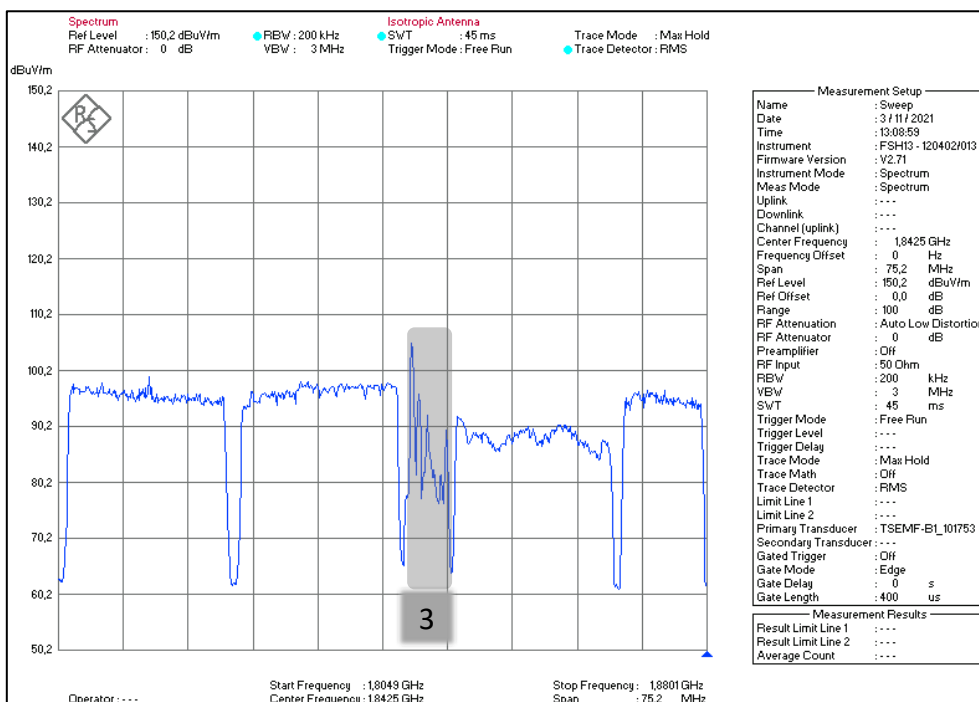
Bežične tehnologije omogućuju komunikaciju i prijenos podataka bežičnim putem, odnosno putem EM valova, a pri višoj frekvenciji moguć je brži prijenos. Bežična tehnologija danas je jedna od najbrže rastućih tehnologija u svijetu, a mobilne mreže evoluirale su kroz nekoliko generacija od prve (1G) mreže pa sve do pete generacije (5G mreže).

Prva mobilna mreža (1G) zasniva se na analognom signalu, a radila je na frekvencijskom opsegu između 450 MHz i 900 MHz. Omogućila je bežičnu, isključivo glasovnu komunikaciju među uređajima. Kada se govori o 1G tehnologiji, često se navode njeni glavni nedostaci kao što su: loša kvaliteta prijenosa, veličina mobilnih uređaja, kratko trajanje baterije uređaja i dr. [73]. Danas se 1G tehnologija, potisnuta digitalnom tehnologijom, više ne koristi.

Početkom 90-ih godina prošlog stoljeća uspostavljena je prva digitalna mreža - 2G mreža bazirana na standardu GSM (*eng. Global System for Mobile Communication*), kasnije proširena standardom GPRS (*eng. General Packet Radio Service*). Digitalni signali omogućili su korištenje manjih mobilnih uređaja, sigurniju povezanost, višu kvalitetu povezivanja, veći kapacitet i sl. [73]. Budući da 2G mreža koristi kombinaciju TDMA (*eng. Time Division Multiple Access*) i FDMA (*eng. Frequency Division Multiple Access*), omogućen je istovremeni pristup mreži za više korisnika kojima se pridjeljuje određeni frekvencijski odsječak. GSM mreža aktivna je na frekvencijama između 890 MHz i 960 MHz, te između 1710 MHz i 1880 MHz [74], a prosječne brzine u 2G mreži iznose približno do 14 Kbps (kilobita po sekundi) [75]. GSM nositelji (kanali) zauzimaju širinu frekvencijskog spektra u iznosu od 200 kHz. U frekvencijskom spektru 3G mreže vidljiv je barem jedan kanal konstantan u snazi (*eng. Broadcast Control Channel, BCCH*) koji se često iskorištava pri mjerenju, odnosno ekstrapolaciji razina EM polja. Za razliku od BCCH kanala, prometni kanali (*eng. Traffic Channels, TCH*) emitirani su ovisno o potrebama, odnosno varijaciji u prometnom opterećenju. Uz GSM često se spominje i pojam "*frequency hopping*" koji predstavlja korištenje različitih TCH kanala pri prijenosu podataka ili pak "skakanje" TCH kanala u frekvencijskoj domeni [76]. Pojavom GSM standarda prvi put je bilo omogućeno slanje kratkih tekstualnih poruka među mobilnim uređajima (*eng. Short Message Service, SMS*). U Republici Hrvatskoj GSM tehnologija je još uvijek u upotrebi, a frekvencijski spektar na kojem se trenutno nalazi je između 925 MHz i 960 MHz te između 1805 MHz i 1880 MHz (slike 3.1 i 3.2).

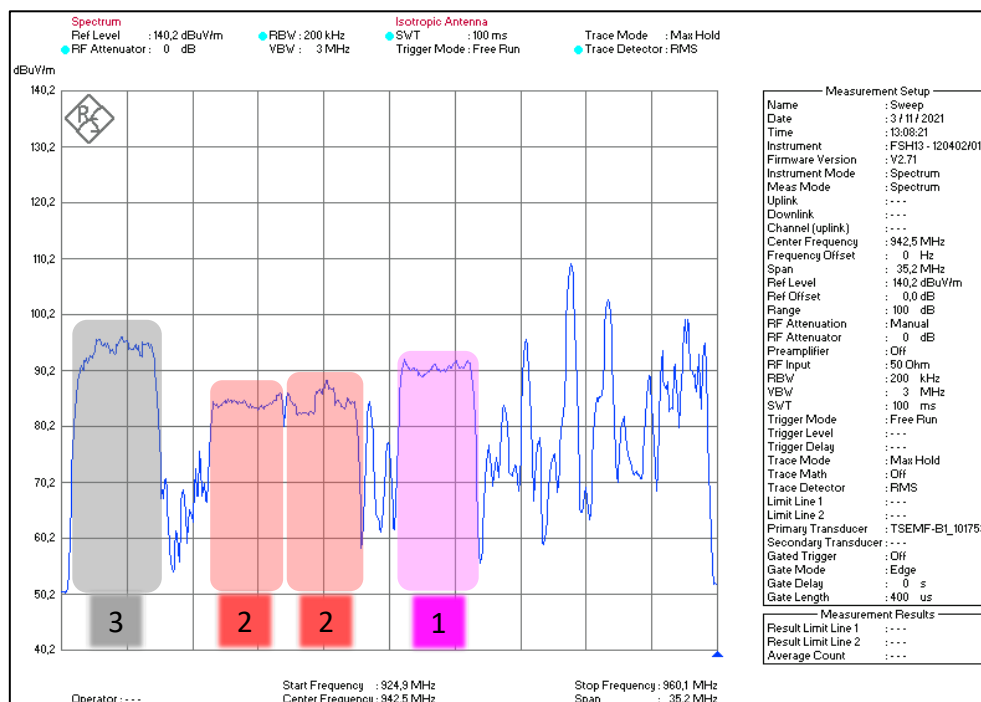


Slika 3.1 Pet frekvencijskih područja između 925 MHz i 960 MHz alociranih za GSM tehnologiju u vlasništvu tri mobilna operatera označenih brojevima 1, 2 i 3. Na frekvencijskom području pod brojem 2 vidljiv je efekt "frequency hopping"

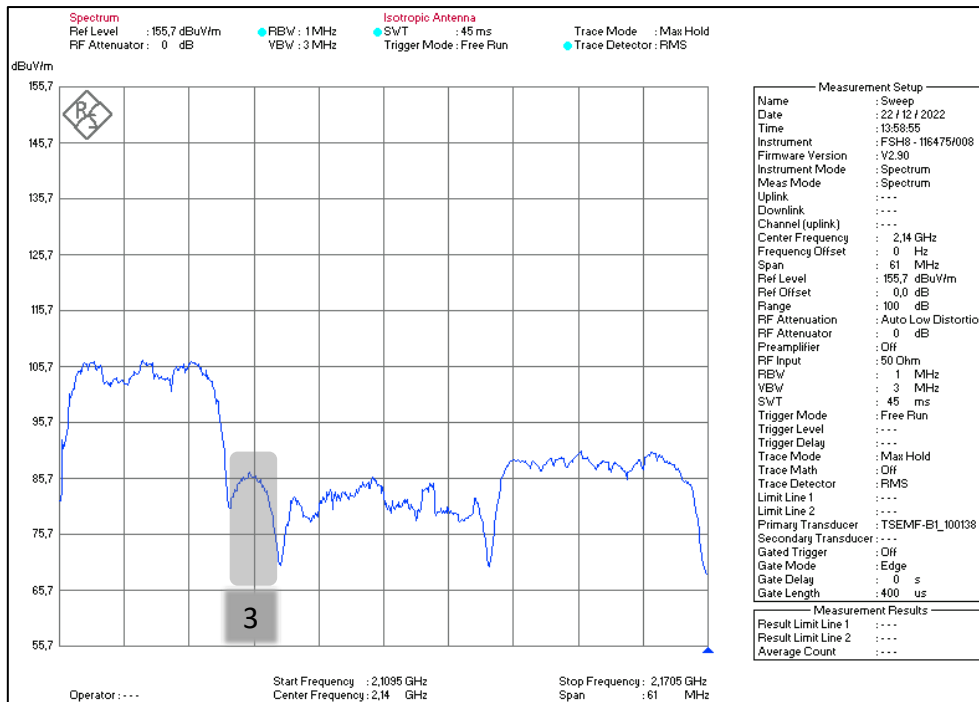


Slika 3.2 Aktivni kanali GSM tehnologije na frekvencijskom spektru između 1845 MHz i 1850 MHz koji pripadaju operateru označenom brojem 3

3G mreža, poznata i pod nazivom UMTS (eng. *Universal Mobile Telecommunications System*), zasnovana je na tehnikama CDMA (eng. *Code Division Multiple Access*) i WCDMA (eng. *Wide Band Code Division Multiple Access*). Nove tehnike omogućile su korištenje istog kanala za više korisnika istovremeno pri čemu je jedinstveni kôd dodijeljen svakom od korisnika. WCDMA tehnika omogućava širenje uskog podatkovnog kanala na širi frekvencijski spektar. UMTS sustav podržava dvojnju komunikaciju između bazne stanice i mobilnog uređaja kroz tzv. TDD (eng. *Time Division Duplex*) ili FDD (eng. *Frequency Division Duplex*) način rada. FDD način rada označava podijeljeni frekvencijski spektar za uzlaznu, odnosno silaznu vezu, dok TDD označava jednaki frekvencijski spektar za uzlaznu i silaznu vezu, ali je samo jedna veza aktivna u određenom vremenskom periodu [26]. UMTS signali sadrže P-CPICH komponentu (eng. *Primary Common Pilot Channel*) konstantne snage koja je od posebnog interesa pri mjerenju razina EM polja. U osnovnim 3G mrežama brzine prijenosa podataka dosežale su razinu do 2 Mbps (megabita po sekundi). Zanimljivo je spomenuti kako se uz 3G mrežu, odnosno točnije HSPA i HSPA+ (eng. *High Speed Packet Access*), prvi put spominje i MIMO tehnika (eng. *Multiple Input Multiple Output*) koja predstavlja koncept više prijemnih i odašiljačkih antena [75], [77]. Uz postizanje većih brzina prijenosa podataka, 4G mrežom bilo je omogućeno uspostavljanje video-poziva i HD prijenosa (eng. *High Definition*) [73]. 3G mreža aktivna je na frekvencijama od približno 950 MHz i 2100 MHz (slike 3.3 i 3.4).



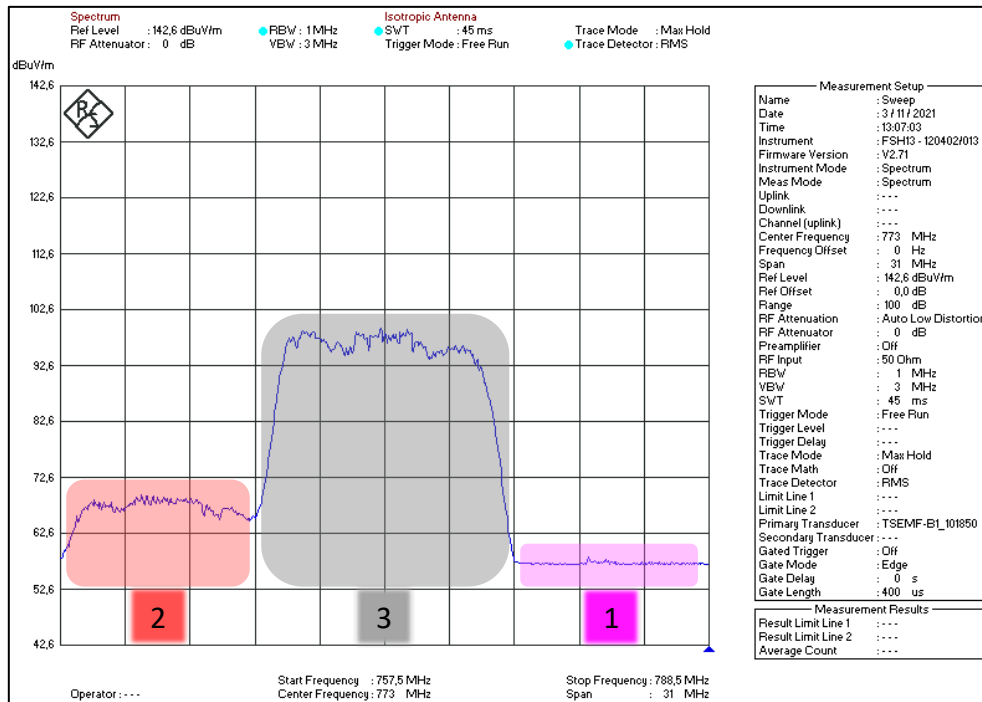
Slika 3.3 Četiri frekvencijska područja između 925 MHz i 960 MHz alocirana za UMTS tehnologiju u vlasništvu tri mobilna operatera označenim brojevima 1, 2 i 3



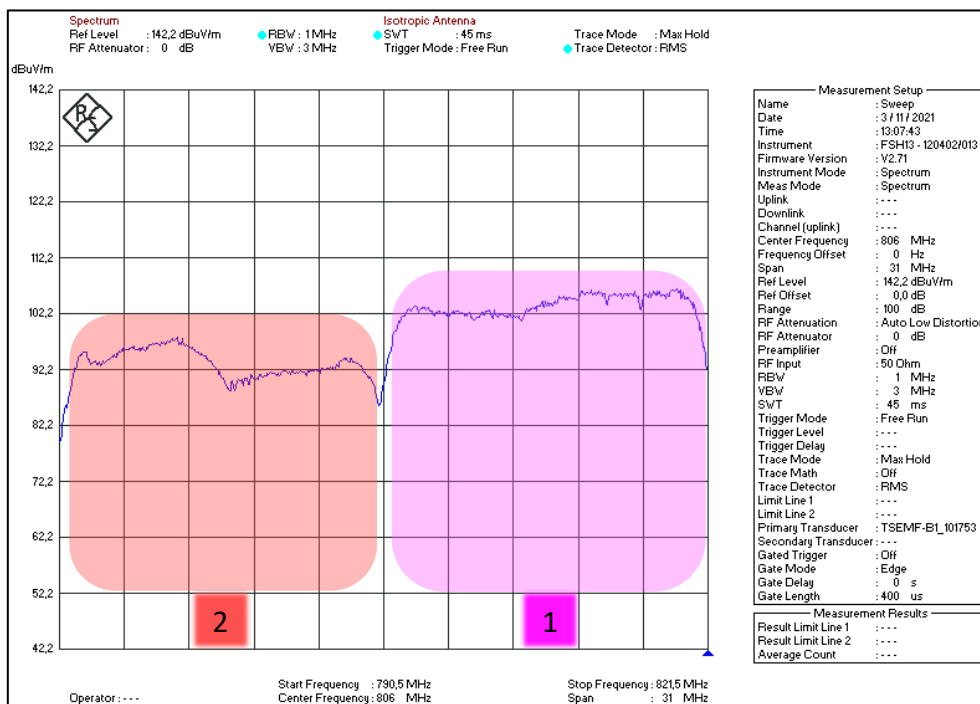
Slika 3.4 Jedan aktivni UMTS kanal na frekvenciji od 2127,5 MHz u vlasništvu operatera označenog brojem 3

Krajem 2000-tih razvila se i u primjenu ušla 4. generacija mobilne mreže poznata i pod nazivom LTE (*eng. Long Term Evolution*). Razvojem 4G mreže omogućeni su višestruki načini bežične komunikacije, uključujući i slanje podataka te usluge internetskog prijenosa. LTE počiva na tehnologiji OFDM (*eng. Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) čime je omogućena velika propusnost podataka otporna na interferencije i refleksije. OFDM označava niz uskopojasnih podnositelja razmaknutih po 15 kHz duž ukupne širine signala u frekvencijskoj domeni, a svaki podnositelj može biti zasebno moduliran. U vremenskoj domeni LTE signal organiziran je u okvire trajanja 10 ms. 1 okvir može biti sastavljen od 10 podokvira od kojih svaki traje po 1 ms. Svaki podokvir podijeljen je na 2 odsječka (svaki trajanja od 0,5 ms), a svaki odsječak sastavljen je od 6 ili 7 simbola. Također, vremenski okvir može biti podijeljen i u dva poluokvira pri čemu svaki traje po 5 ms, a svaki od njih sastavljen je od 5 podokvira pojedinačnog trajanja po 1 ms. Svaki podokvir podijeljen je na 2 odsječka, svaki trajanja od 0,5 ms, osim posebnih podokvira koji nose posebne informacije. I u ovom slučaju svaki odsječak sastavljen je od 6 ili 7 simbola [76]. U frekvencijskoj domeni LTE signal je sastavljen od izvorišnih elemenata (*eng. Resource Element, RE*) koji su grupirani u izvorišne blokove (*eng. Resource Blocks, RB*). U LTE tehnologiji od posebnog su interesa sinkronizacijski signali (primarni i sekundarni) te fizički kanal za emitiranje. U spoju s OFDM tehnologijom LTE tehnologija koristi i već spomenuti MIMO sustav koji uvelike povećava

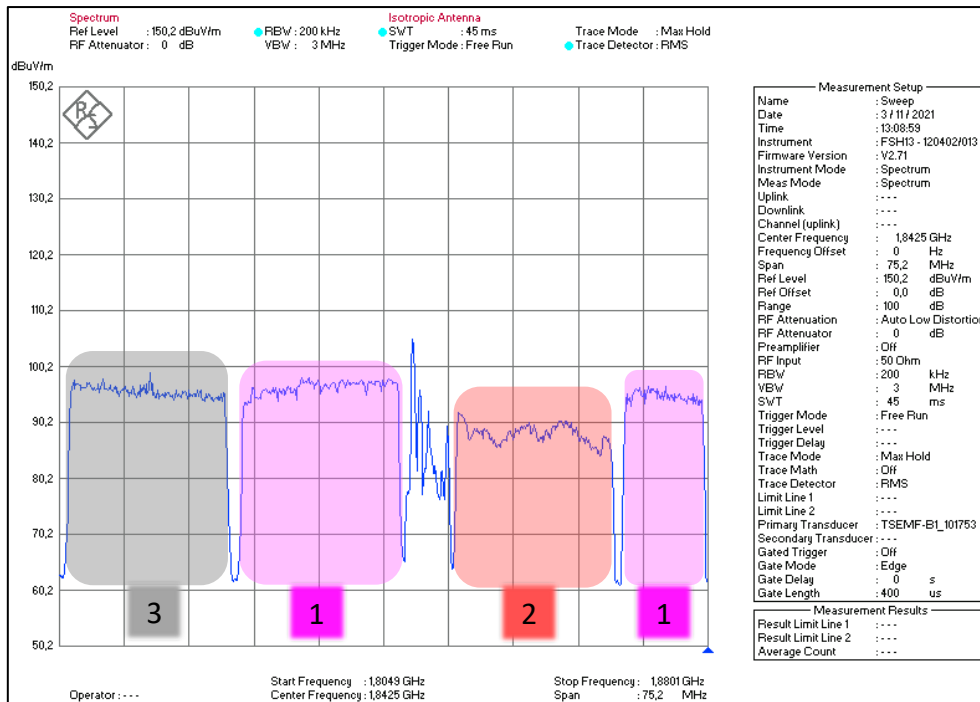
brzinu prijenosa podataka [74]. LTE tehnologija danas je aktivna na frekvencijama od približno 700 MHz, 1800 MHz, 2100 MHz te 2600 MHz (slike 3.5 – 3.9).



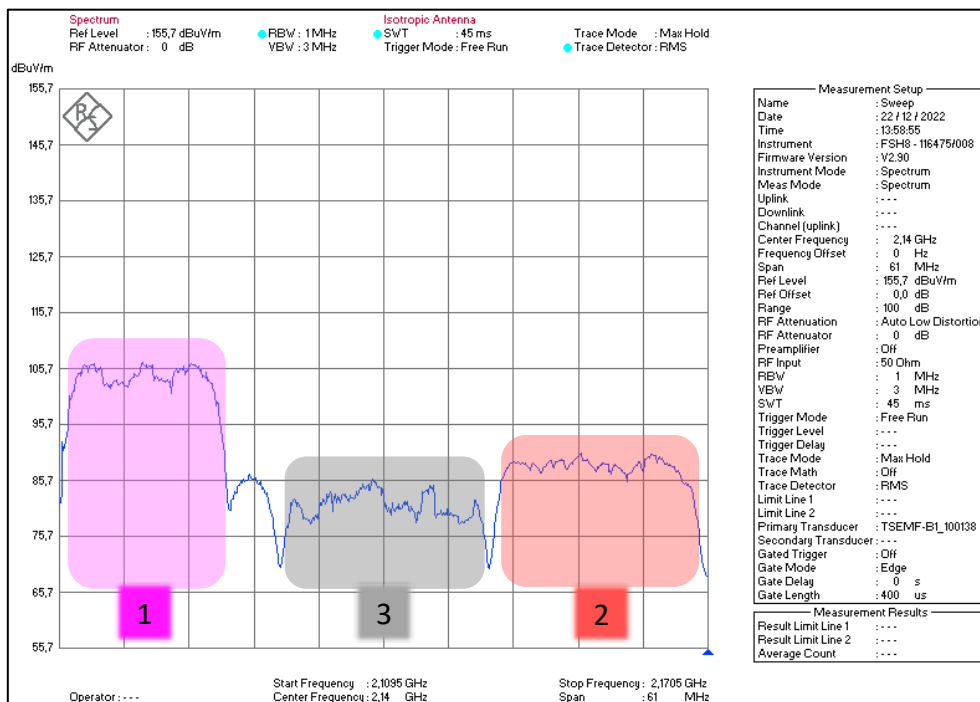
Slika 3.5 Dva aktivna (2 i 3) i jedan neaktivni (1) kanal 4G tehnologije na frekvencijskom spektru između 757,5 MHz i 788,5 MHz dodijeljenom trima operaterima



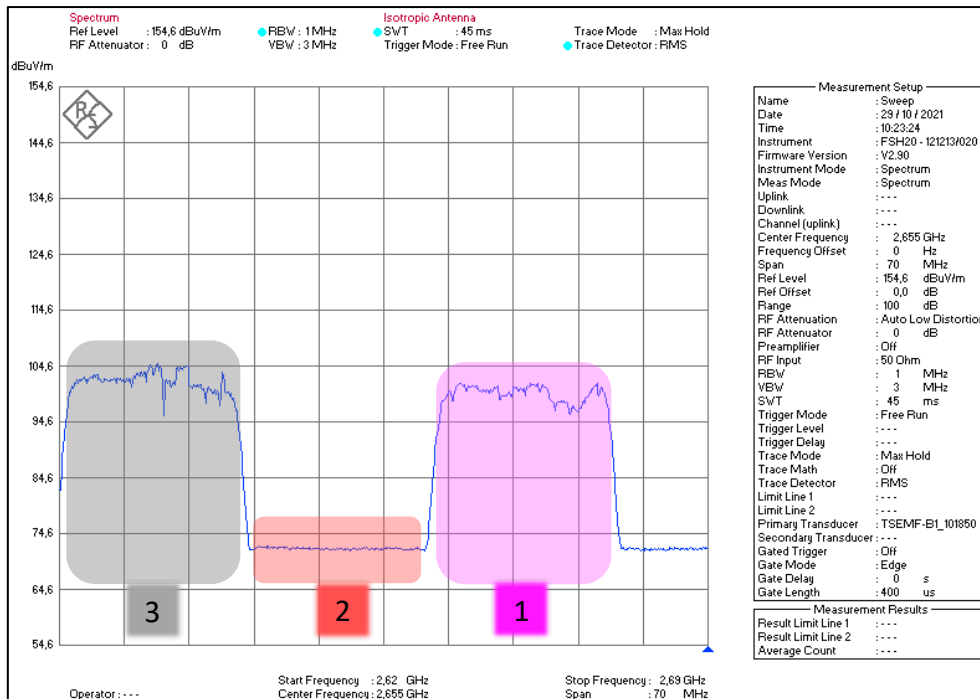
Slika 3.6 Dva aktivna kanala 4G tehnologije na frekvencijskom opsegu između 790,5 MHz i 821,5 MHz dodijeljena dvama operaterima



Slika 3.7 Četiri aktivna kanala 4G tehnologije na frekvencijskom opsegu između 1804,9 MHz i 1880,1 MHz dodijeljena trima operaterima označenima brojevima 1, 2 i 3.



Slika 3.8 Tri aktivna 4G kanala na frekvencijskom opsegu između 2109,5 MHz i 2170,5 MHz dodijeljena trima operaterima (1, 2 i 3)

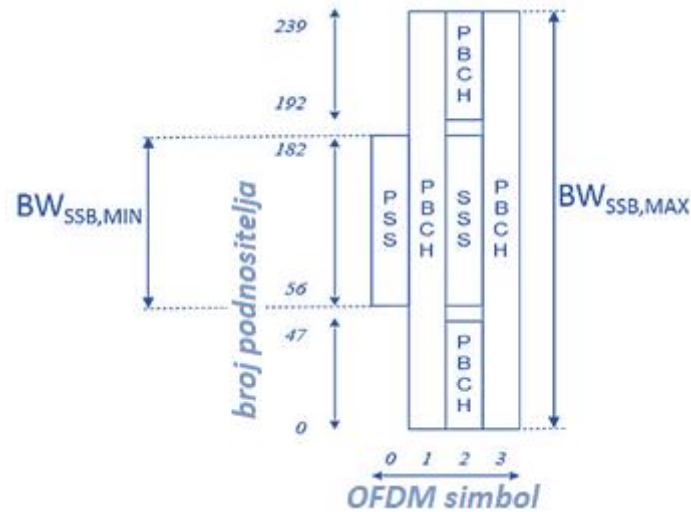


Slika 3.9 Dva aktivna (1 i 3) i jedan neaktivni (2) kanal 4G tehnologije na frekvencijskom opsegu između 2,62 GHz i 2,69 GHz dodijeljena trima operaterima označenim brojevima 1, 2 i 3

Bežična komunikacija do sada je imala cilj međusobno povezivati ljude ili pak povezati ljude s računalima. Vizija 5G tehnologije je hiperkonekcija društva u kojoj će većina elektronskih, pametnih uređaja biti povezana na mrežu. Zbog toga se za 5G tehnologiju koristi izraz: "The Internet of Everything" [31]. 5G tehnologija, poznata i pod nazivom "5G New Radio" (5G NR) nova je generacija bežične mobilne komunikacije, a donijet će veću brzinu prijenosa podataka, veću pouzdanost i znatno nižu razinu kašnjenja u komunikaciji, kao i široku upotrebu u "strojnoj komunikaciji" (eng. *Machine Type Communication*) [78]. 5G tehnologija nije samo nadogradnja postojeće 4. generacije mobilne mreže (4G) već pruža nove mogućnosti po pitanju povezivanja i kapaciteta kroz milimetarsko frekvencijsko područje [19].

Najmanji fizikalni element u 5G tehnologiji je tzv. izvorišni element (eng. *Resource Element, RE*). Izvorišni element dan je jednim podnositeljem u frekvencijskoj domeni, odnosno jednim OFDM simbolom u vremenskoj domeni. 12 uzastopnih izvorišnih elemenata čini jedan izvorišni blok (eng. *Resource Block, RB*) [26], [31], [78],. Jedan od osnovnih blokova 5G signala svakako je sinkronizacijski blok (SSB, negdje označen i kao SS/PBCH). SSB se sastoji od 240 podnositelja u frekvencijskoj domeni, odnosno 4 OFDM simbola u vremenskoj domeni [24], a sadrži PSS (primarni sinkronizacijski signal), SSS (sekundarni sinkronizacijski signal),

PBCH (fizički *broadcast* kanal) i PBCH DM-RS (PBCH demodulacijski referentni signal) (slika 3.10).



Slika 3.10 Struktura SSB-a u frekvencijskoj i vremenskoj domeni [26] PRIJEVOD

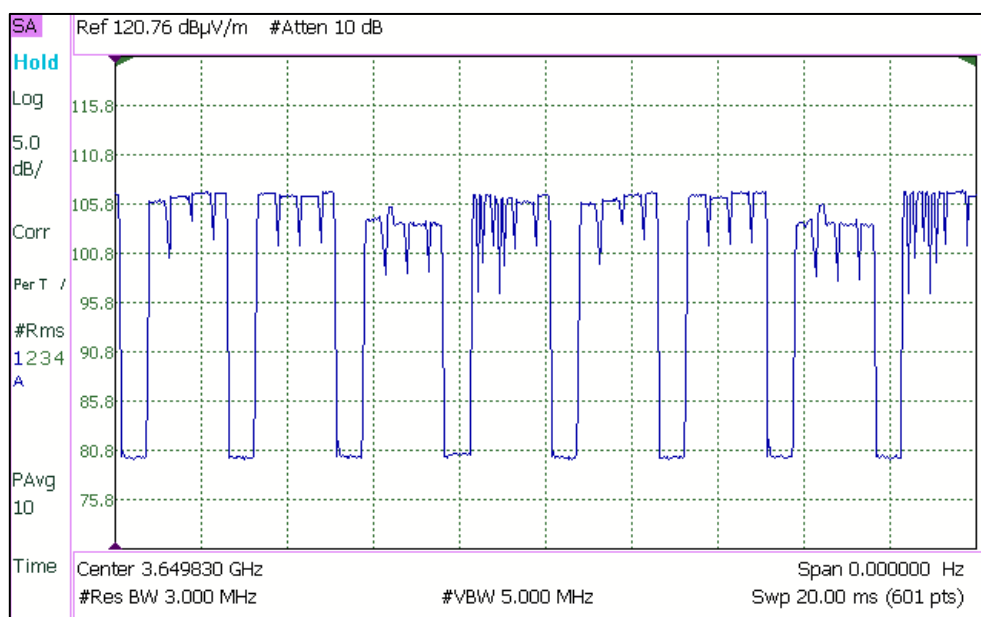
Značajka SSB-a je da se uvijek emitira periodički pri konstantnoj snazi, dok se ostali dijelovi 5G signala emitiraju po potrebi (pri uspostavi prometa) [24], [25], [26], [29]. SSB-ovi su grupirani u nizove (*SS Burst*). Postoji 5 tipova nizova koji se razlikuju po frekvencijskom razmaku podnosioca (15 kHz – 240 kHz) [29]. Ovisno o frekvencijskom području SSB niz može sadržavati do 4 SSB-a pri frekvenciji nižoj od 3 GHz, 8 SSB-ova na frekvenciji između 3 GHz i 6 GHz te 64 SSB-a na frekvencijama većim od 6 GHz [25], [29].

PSS označava primarni sinkronizacijski signal i sastavljen je od 127 elemenata, a smješten je u sredini SSB-a na simbolu 0. SSS označava sekundarni sinkronizacijski signal koji također zauzima 127 elemenata smještenih na sredini SSB-a na simbolu 2. 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, a nalaze se na simbolima 1, 2 i 3 [25]. PBCH DM-RS signali sadrže neke osnovne informacije o baznoj stanici kao i broj SSB-a unutar SSB niza. Korisno je istaknuti kako je korisnički uređaj (mjerni instrument) sposoban detektirati broj SSB-ova s najvišom snagom unutar SSB niza.

U vremenskoj domeni struktura 5G signala organizirana je u okvire (*eng. frames*) koji traju po 10 ms, a svaki okvir podijeljen je na 10 podokvira pojedinačnog trajanja od 1 ms [26]. Svaki podokvir sadrži 2^μ odsječaka gdje je $\mu = 0, 1, 2, 3$ ili 4. Svaki odsječak sastavljen je najčešće od 14 OFDM simbola. Broj simbola sadržanih u podokviru ovisan je dakle o broju μ . Veći μ znači i veći broj simbola u pojedinačnom podokviru [31]. O broju simbola ovisi i frekvencijski

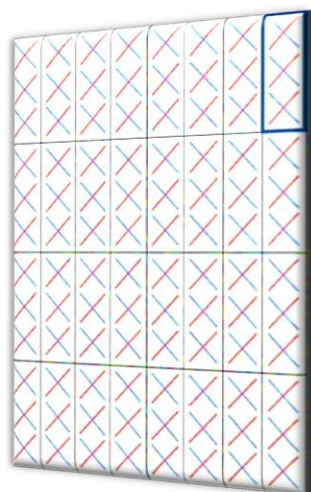
razmak između susjednih podnositelja. Naime, frekvencijski razmak susjednih podnositelja jednak je $2^{\mu} \cdot 15 \text{ kHz}$ [29]. U frekvencijskom području FR1 ($f < 7,125 \text{ GHz}$) razmak podnositelja iznosi 15 kHz, 30 kHz ili 60 kHz, dok je u frekvencijskom području FR2 ($f > 24 \text{ GHz}$) taj razmak jednak 60 kHz, 120 kHz, odnosno 240 kHz [26], [29], [31].

5G tehnologija može raditi u tzv. TDD (*eng. Time Division Duplex*) ili FDD (*eng. Frequency Division Duplex*) modu. FDD način rada označava podijeljeni frekvencijski spektar za uzlaznu, odnosno silaznu vezu. Do danas je mnogo češća implementacija TDD moda u 5G tehnologiji pri kojem su jednaki frekvencijski opsezi dodijeljeni i za uzlaznu i za silaznu vezu, ali je samo jedna veza aktivna u određenom vremenskom periodu [26] (slika 3.11).



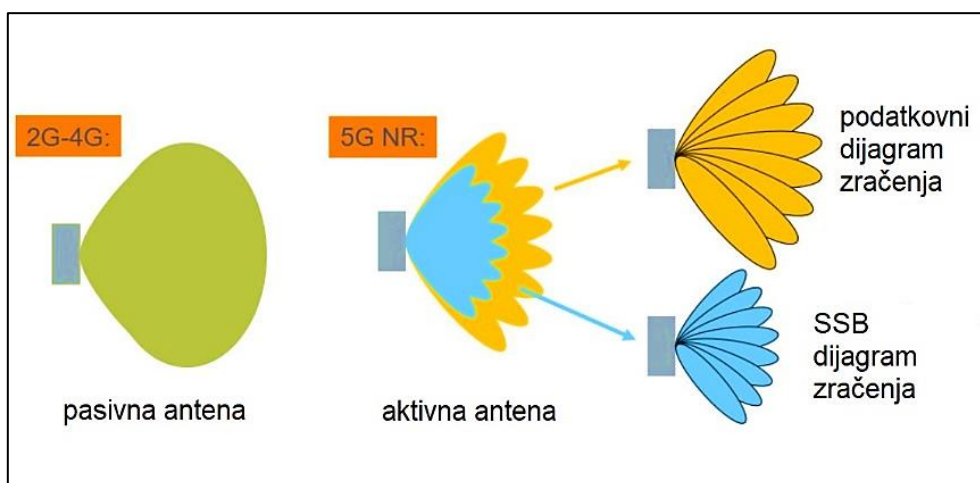
Slika 3.11 Raspodjela silazne i uzlazne veze u TDD modu rada 5G bazne stanice

Jedna od najznačajnijih razlika između dosadašnjih generacija mobilnih mreža i 5G tehnologije je u upotrebi aktivnih antena. 5G antena sastavljena je od odašiljačkih antenskih elemenata organiziranih u podnizove (slika 3.12).



Slika 3.12 Skica 64 TRx MIMO antene (4x8x2) [79]

Aktivne antene omogućuju maksimizaciju efikasnosti iskorištenja frekvencijskog spektra u svrhu poboljšanja mrežnog kapaciteta. Za razliku od dosadašnjih nepromjenjivih antenskih dijagrama zračenja, 5G antenama moguće je mijenjati dijagram zračenja, odnosno prilagoditi ga trenutnim potrebama. Naime, aktivnim antenama moguće je postići konstruktivnu ili destruktivnu interferenciju. Rezultat toga je visoki dobitak antene usmjeren prema korisniku [22], [26], [78] (slika 3.13).



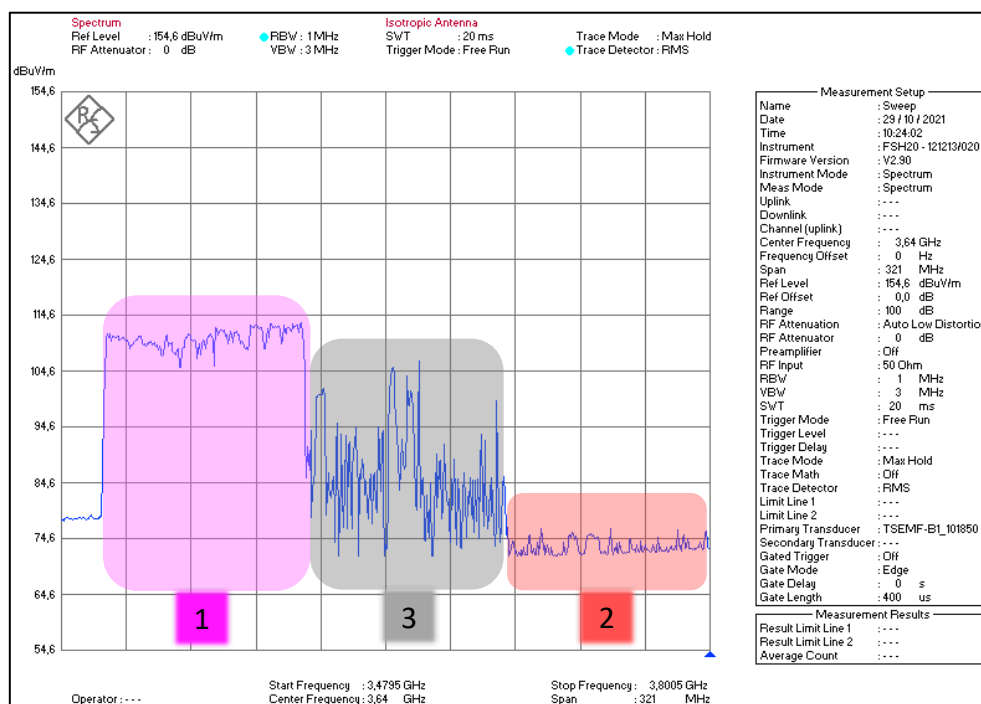
Slika 3.13 Razlika aktivne i pasivne antene [79]

Stoga će stvarna zračena snaga bazne stanice ovisiti, između ostaloga, i o položaju korisnika [21].

Antene s nepromjenjivim dijagramom zračenja imaju dobitak od okvirno 17 dBi, dok antene s MIMO sustavom imaju znatno veći dobitak, približno 24 dBi [32].

Dosadašnje tehnologije radile su na frekvencijskom području ispod 6 GHz (uglavnom do 2,6 GHz). 5G tehnologija biti će operativna na dva frekvencijska područja: između 410 MHz i 7,125 GHz (FR1 područje) te u milimetarskom frekvencijskom području (24 GHz – 50 GHz, FR2 područje) [29], [78]. S obzirom na relativno visoke frekvencije koje su pogodne za velike brzine prijenosa podataka, područje pokrivanja 5G signalom biti će ograničeno zbog slabije mogućnosti prodiranja EM polja u prostoru, odnosno većih gubitaka u prijenosu [31], [80].

5G tehnologija imat će i znatno šire kanale. Naime, u dosadašnjim generacijama mobilne mreže radni kanali široki su do 20 MHz. U novoj generaciji kanali su široki 100 MHz u FR1 području, odnosno do 400 MHz u FR2 području [29], [31], [78], (slika 3.14).



Slika 3.14 Tri frekvencijska područja alocirana za 5G tehnologiju na frekvencijskom području između 3500 MHz i 3800 MHz

5G, kao i 4G tehnologija koristi tzv. ortogonalnu modulacijsku tehniku u frekvencijskoj domeni (eng. *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*, OFDM). OFDM predstavlja tehniku u bežičnoj komunikaciji pri kojoj su prijenosni podaci razmješteni u nekoliko tokova i transmitirani na više uskopojasnih kanala (podnositelja) kako bi se smanjila interferencija, odnosno poboljšala efikasnost prijenosa.

Broj korisnika bežičnih telekomunikacijskih mreža i dalje je u porastu što će posljedično dovesti i do porasta broja baznih stanica. U prilog tome ide i činjenica kako se baznim

stanicama u milimetarskom frekvencijskom području (5G) ne može pokriti široko geografsko područje kao što je to slučaj s 4G, odnosno 3G i 2G tehnologijama [81].

Kada se govori o širinama kanala pojedine tehnologije, s obzirom na trenutno stanje frekvencijskog spektra u Republici Hrvatskoj, korisno je još jednom ponoviti kako su pri 2G tehnologiji kanali široki 200 kHz, a pri 3G tehnologiji do 5 MHz. Širina kanala pri 4G tehnologiji između je 10 MHz i 20 MHz, a pri 5G tehnologiji iznosi 100 MHz. U Republici Hrvatskoj trenutno su u upotrebi mobilne mreže 2G, 3G, 4G i 5G na frekvencijskim opsezima prikazanima u tablici 3.1.

Tablica 3.1 Mobilne mreže na pojedinim frekvencijskim područjima u Republici Hrvatskoj

Frekvencijski opseg (MHz)	Mobilne mreže
758 – 788	4G i 5G
790 – 820	4G
925 – 960	2G i 3G
1805 - 1880	2G i 4G
2110 - 2170	3G, 4G i 5G
2620 - 2690	4G
3400 - 3800	5G

4. Antenski sustavi radio-baznih stanica

Bazna stanica predstavlja centralnu točku povezivanja bežičnih uređaja korištenih za komunikaciju, umrežavanje i prijenos podataka. U praktičnoj izvedbi bazna stanica je fiksirani primopredajnik koji sadrži jednu ili više antena, uglavnom montiranih na stup ili neki drugi nosač u čijem podnožju je obično smještena elektronička oprema (slika 4.1).



Slika 4.1 Bazna stanica

Bazna stanica služi kao glavna komunikacijska točka za jedan ili više bežičnih mobilnih uređaja, odnosno svaki bežični uređaj (mobitel) povezan je s baznom stanicom koja ga dalje povezuje sa drugim mobilnim uređajem ili internetom [81], [82], [83]. Zbog toga se bazna stanica najčešće postavlja na uzvišenje (primjerice visoki antenski stup) kako bi efikasno pokrila određeno geografsko područje te omogućila kvalitetnu komunikacijsku vezu [83].

Veličina bazne stanice ovisi o više parametara kao što su veličina prostora koji se želi "pokriti", broj korisnika usluge, topografija područja pokrivanja i sl. Tri su osnovna tipa baznih stanica koje se razlikuju po veličini, prostoru pokrivanja, topografiji pokrivenog područja i izračenoj snazi: makročelije, mikročelije i femtočelije (pikočelije) [81].

Jedna od osnovnih komponenti bazne stanice svakako je antena koju promatramo kao izvor neionizirajućeg zračenja. Antene većih snaga pokrivaju veće područje te se nazivaju makroćelije (područje pokrivanja promatra se u desecima kilometara, slika 4.2). Sa druge strane, antene slabije snage i manjeg područja pokrivanja nazivaju se mikroćelijama (pokriveno područje je unutar nekoliko kilometara, slika 4.3).



Slika 4.2. Makroćelije



Slika 4.3. Mikroćelije

Iako je područje pokrivanja manje u slučaju mikroćelija, njihov kapacitet je veći u usporedbi s makroćelijama. Piko- odnosno femtoćelije odašilju još nižom snagom, a njihovo područje pokrivanja mjeri se unutar nekoliko stotina, odnosno nekoliko desetaka metara te se stoga uglavnom ugrađuju unutar poslovnih prostora ili drugih objekata [84].

Od velike je važnosti i fizička veličina antene. Naime, klasifikacija zone izvora ovisi ne samo o valnoj duljini EM vala, već i o dimenziji antene. Prema, primjerice, prema [11], [12] s obzirom na udaljenost od antene, postoje tri zone:

1. zona bliskog reaktivnog polja izvora,
2. zona bliskog zračećeg polja izvora te
3. zona daljinskog polja izvora.

Iako se i danas vrše istraživanja na temu određivanja navedenih zona, u praksi prevladava relativno jednostavan način njihove aproksimacije. U tablici 4.1 prikazani su izrazi za različite udaljenosti, odnosno zone izvora EM polja, gdje D označava najveću dimenziju antene (obično promjer ili duljinu antenskog niza (m)), a λ valnu duljinu (m).

Tablica 4.1 Zone (regije) izvora EM polja [12]

	zona bliskog reaktivnog polja	zona bliskog radijacijskog polja	zona daljinskog polja
udaljenost (m)	$0 - \max \left\{ \frac{\lambda}{D}, \frac{D}{4\lambda} \right\}$	$\max \left\{ \frac{\lambda}{D}, \frac{D}{4\lambda} \right\} - \max \left\{ \frac{5\lambda}{5D}, \frac{0.6D^2}{4\lambda} \right\}$	$\max \left\{ \frac{5\lambda}{5D}, \frac{0.6D^2}{4\lambda} \right\} - \infty$
mjerena veličina	E i H	E ili H	E ili H

Antene su također opisane i različitim parametrima, a neki od najznačajnijih su:

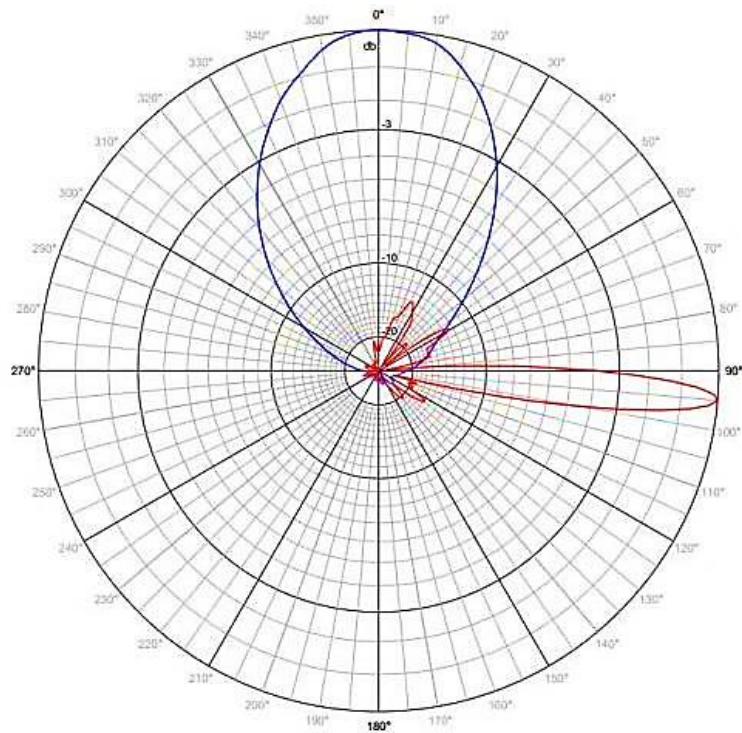
- dijagram zračenja,
- izračena snaga,
- intenzitet zračenja,
- usmjerenost,
- polarizacija,
- dobitak i dr.

Kod odašiljačkih antena dijagram zračenja predstavlja relativnu prostornu raspodjelu neke veličine normalizirane s maksimalnom vrijednošću. U tom smislu koristi se dijagram zračenja polja, snage ili pak dobitka. Kod baznih stanica često se koristi dijagram zračenja dobitka antene koji se može definirati kao omjer intenziteta u danom smjeru i intenziteta zračenja koji bi se dobio kada bi privedena snaga antene bila izračena izotropno:

$$G(\varphi, \theta) = 4\pi \cdot \frac{U(\varphi, \theta)}{P_{in}} \quad (4.1)$$

gdje je P_{in} ulazna snaga antene, a $U(\varphi, \theta)$ intenzitet zračenja.

U praksi se nerijetko dijagram zračenja definira i kao prostorni dijagram gubitaka antene u odnosu na glavni smjer zračenja, odnosno vršnu vrijednost dobitka antene. Dijagram zračenja antene je, dakle, trodimenzionalna veličina. No, jednostavnosti radi, najčešće se prikazuje u dvije dvodimenzionalne ravnine: horizontalnoj i vertikalnoj (slika 4.4).



Slika 4.4 Horizontalni (plava linija) i vertikalni (crvena linija) dijagram zračenja 3G antene [58]

U internacionalnoj literaturi mogu se pronaći i nazivi azimutni, odnosno elevacijski dijagram (eng. *Azimuth/Vertical Plane Pattern*) [85].

Dijagram zračenja najčešće se navodi u specifikacijama antene koje objavljuje proizvođač. Važno je napomenuti kako je dijagram zračenja antene jedna od ključnih informacija pri proračunu i mjerenju razina EM polja. Ponekad se dogodi da prostorni dijagram zračenja nije dostupan. Tada se dobitak antene u točki prostora u daljinskom polju izvora može aproksimirati matematičkom funkcijom ovisnoj o prostoru, odnosno varijablama unutar sfernog koordinatnog sustava (θ, \varnothing) [11]:

$$G_{\theta, \varnothing} = 1.26 \cdot G_{sl} + G \cdot 2^{-\left(\frac{\theta - \gamma - \frac{\pi}{2}}{\theta_{3dB}}\right)^2 - \left(\frac{1.9 \cdot \varnothing}{\varnothing_{3dB}}\right)^2} \quad (4.2)$$

gdje G_{sl} predstavlja dobitak bočnih latica, G vršni dobitak antene, γ električni nagib antene (električni tilt, (rad)), θ_{3dB} kut pri kojem se zračena snaga umanjuje za pola po vertikalnoj ravnini (rad) te \varnothing_{3dB} kut pri kojem se zračena snaga umanjuje za pola po horizontalnoj ravnini (rad). Korisno je istaknuti kako se podaci o dobitcima antene uglavnom zapisuju u decibelima (dBd ili dBi) te ih je prije primjene u izrazu (4.2) potrebno preračunati u apsolutne iznose:

$$G_{realni broj} = 10^{\frac{G_{dB}}{10}} \quad (4.3)$$

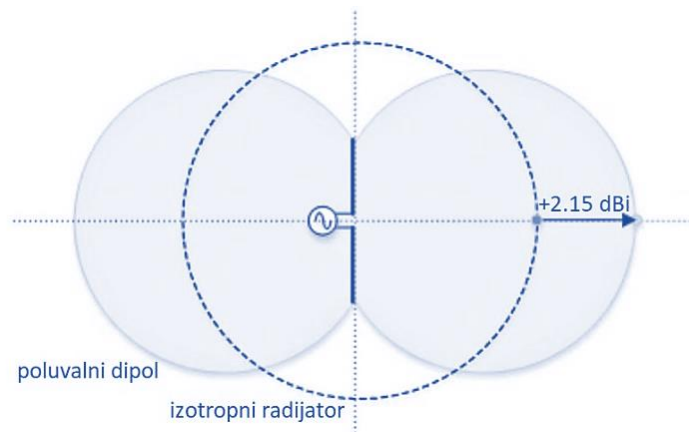
Snaga na ulazu antene jednaka je privedenoj snazi uvećanoj za dobitak pojačala te umanjenoj za gubitke u kabeu, gubitke pri refleksiji zbog razlike u impedanciji generatora signala i antene (eng. *Voltage Standing Wave Ratio*, VSWR), gubitke na konektorima i dr. [86]:

$$P_{AP} = P_{in} - P_{ref} + G_{AP} - G_L \quad (4.4)$$

gdje je P_{in} privedena snaga na priključku (upadna snaga, *dBm* ili *dBW*), P_{ref} snaga reflektirana zbog VSWR-a (*dBm* ili *dBW*), G_{AP} dobitak pojačala (*dB*) te G_L ukupni gubici u kabeu, na konektorima i dr (*dB*).

U tehničkoj dokumentaciji nerijetko se umjesto snage na priključku antene navodi efektivno zračena snaga (eng. *Effective Radiated Power*, *ERP*) ili efektivno zračena snaga izotropnog radijatora (eng. *Effective Isotropic Radiated Power*, *EIRP*). Idealni izotropni radijator zrači snagu u svim smjerovima jednako, dok poluvalni dipol u nekim smjerovima koncentrira, a u nekim smjerovima reducira zračenu snagu. Zbog toga poluvalni dipol u odnosu na izotropni radijator ima za 2,15 dB veći dobitak, odnosno izotropnom radijatoru potrebno je dodati 2,15 dB kako bi zračio snagom jednakom poluvalnom dipolu (slika 4.5) [87]:

$$EIRP = ERP + 2,15 \quad (4.5)$$



Slika 4.5 Dijagram zračenja poluvalnog dipola i izotropnog radijatora [87]

EIRP se može predstaviti integralom gustoće zračene snage (Poyntingovim vektorom) po oplošju referentne sfere (kugle) [56], [88], [89]. Za harmonijski ovisne veličine Poyntingov vektor je oblika:

$$\vec{S} = \text{Re}(\vec{E} \times \vec{H}^*) \quad (4.6)$$

gdje (*) označava konjugirano kompleksnu vrijednost, a zračena snaga antene (P_{rad}) dana je pak integralom gustoće snage po oplošju zamišljene kugle:

$$P_{rad} = \oint_A S d\vec{A} = \oint_A \text{Re}(\vec{E} \times \vec{H}^*) d\vec{A} \quad (4.7)$$

gdje je $d\vec{A}$ diferencijal površine.

U sfernom koordinatnom sustavu zračena snaga bila bi dakle jednaka:

$$P_{rad} = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi S \cdot r^2 \cdot \sin(\theta) d\theta d\phi \quad (4.8)$$

odnosno:

$$P_{rad} = S \cdot 4\pi r^2 \quad (4.9)$$

gdje je r polumjer zamišljene kugle.

Također, gustoća snage u slobodnom prostoru u uvjetima daljinskog polja izvora (u uvjetima ravnog vala) jednaka je:

$$S = \frac{|E|^2}{Z_0} \quad (4.10)$$

gdje je Z_0 impedancija vakuuma i iznosi 120π (Ω).

Iz 4.9 i 4.10 slijedi:

$$\frac{P_{rad}}{4\pi r^2} = \frac{|E|^2}{120\pi} \quad (4.11)$$

odnosno:

$$P_{rad} = \frac{|E|^2}{30} \cdot r^2 \quad (4.12)$$

iz čega slijedi da je efektivna vrijednost električnog polja na udaljenosti r od izotropnog radijatora jednaka:

$$E = \frac{\sqrt{30 \cdot P_{rad}}}{r} \quad (4.13)$$

Za slučaj usmjerene antene dozračena snaga u točki prostora ovisi o prostornom dijagramu zračenja pa slijedi:

$$E = \frac{\sqrt{30 \cdot P_{rad} \cdot G(\theta, \varnothing)}}{r} \quad (4.14)$$

gdje $G(\theta, \varnothing)$ predstavlja tzv. numerički dobitak antene u ovisnosti o položaju iskazan kao numerička vrijednost prema (4.3), a r udaljenost od izvora (m).

Treba napomenuti da se u relacijama 4.6 - 4.14 koriste efektivne vrijednosti. Ukoliko bi se koristile vršne vrijednosti potrebno je dodati faktor $\left(\frac{1}{2}\right)$.

5. Dozimetrija upadnog polja

5.1. Proračun razina EM polja

U posljednjih 30-ak godina razvoj bežične komunikacije doživio je nekoliko generacija: 2G, 3G, 4G te kao najnovija generacija 5G. Shodno tome, 2019. i 2020. godine objavljena su nova i dopunjena izdanja spomenutih smjernica za zaštitu [4], [5].

Prilikom projektiranja bazne stanice potrebno je izraditi proračun očekivanih najviših razina EM polja u njenoj okolini. Tu su od posebne važnosti područja koja su prema [6] svrstana u povećanu osjetljivost (dječji vrtići, škole, obiteljske kuće, stambene zgrade, poslovni objekti i dr.). Osim povećane osjetljivosti definirana su još dva područja: javno područje i područje izloženosti radnika koji obavljaju poslove vezane uz izvore EM polja. Za svako područje zasebno su propisane granične razine EM polja koje ne smiju biti prekoračene.

U slučaju djelovanja više izvora različitih frekvencija uvjet kumulativnog efekta djelovanja svih izvora također mora biti zadovoljen prema relaciji [6]:

$$\sum_{>1MHz}^{300GHz} \frac{E_{i,f}^2}{E_{g,f}^2} \leq 1 \quad (5.1)$$

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

Danas se još uvijek u službenim mjerenjima i proračunima razina EM polja razmatraju slučajevi s teorijski najvećom mogućom izračenom snagom, odnosno najvišom mogućom izmjerenom razinom polja u okolini bazne stanice. Zbog instaliranja novih tehnologija naglašava se problematika nadogradnje postojećih baznih stanica zbog mogućnosti prekoračenja sigurnosnih graničnih razina izloženosti. Ovaj problem posebno je izražen pojavom nove 5G tehnologije i to u urbanim, gusto naseljenim sredinama.

U Republici Hrvatskoj proračun razina EM polja u okolini bazne stanice provodi se prema pravilnicima [6], [7], [8] odnosno prihvaćenim normama, primjerice [11]. Prema izvodima iz

izraza 4.6 – 4.14 u poglavlju 4, razina gustoće snage, odnosno jakosti električnog polja u zoni daljinskog polja antene jednaka je [11]:

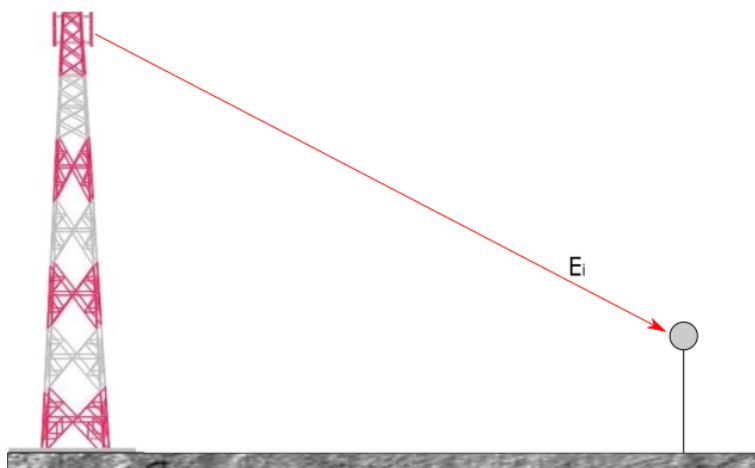
$$S = \frac{P_{rad} \cdot G(\theta, \varnothing)}{4\pi \cdot r^2} \quad (5.2)$$

odnosno:

$$E = \frac{\sqrt{30 \cdot P_{rad} \cdot G(\theta, \varnothing)}}{r} \quad (5.3)$$

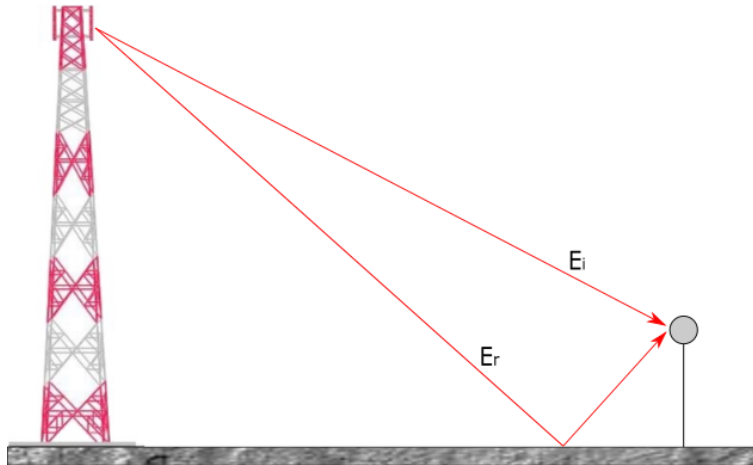
gdje P_{rad} označava izračenu snagu antene (W), $G(\theta, \varnothing)$ tzv. numerički dobitak antene koji proizlazi iz prostornog dijagrama zračenja, a r udaljenost od izvora (m). Numerički dobitak antene umanjuje razinu polja ukoliko se točka promatranja nalazi izvan direktnog snopa zračenja.

Kako se jasno može primijetiti u izrazu (5.3), proračun jakosti električnog polja u obzir uzima isključivo direktni snop zračenja, zanemarujući reflektirane komponente (slika 5.1).



Slika 5.1 Metoda slobodnog prostora u obzir uzima isključivo direktni snop zračenja

Takav pristup proračunu naziva se aproksimacijom slobodnog prostora (eng. *Free Space Approximation*, FS). U obzir se, dakako, mogu uzeti i komponente EM polja reflektirane od podloge (slika 5.2) ili pak susjednih objekata.



Slika 5.2 Skica incidentne i reflektirane komponente električnog polja u točki proračuna

Kada se razmatra utjecaj komponente EM vala reflektirane od podloge na ukupnu razinu polja u točki proračuna slijedi da je:

$$\vec{E} = \vec{E}_i + \vec{E}_r \quad (5.4)$$

odnosno:

$$|\vec{E}| = |\vec{E}_i + \vec{E}_r| \quad (5.5)$$

Prema izrazu (5.3) jakost upadnog električnog polja u točki prostora (θ, \varnothing) jednaka je:

$$E_i = \frac{\sqrt{30 \cdot P_{rad} \cdot G_i(\theta, \varnothing)}}{r_i} \quad (5.6)$$

Komponenta polja reflektirana od podloge oblika je:

$$E_r = \Gamma \cdot \frac{\sqrt{30 \cdot P_{rad} \cdot G_r(\theta, \varnothing)}}{r_r} \quad (5.7)$$

gdje je Γ odgovarajući faktor refleksije od podloge.

U [11] za izračun ukupne jakosti električnog polja može se iskoristiti faktor refleksije jednak 1 za savršeno vodljivu podlogu, odnosno korekcijski (empirijski) faktor 0,6 za konačno vodljivu prema:

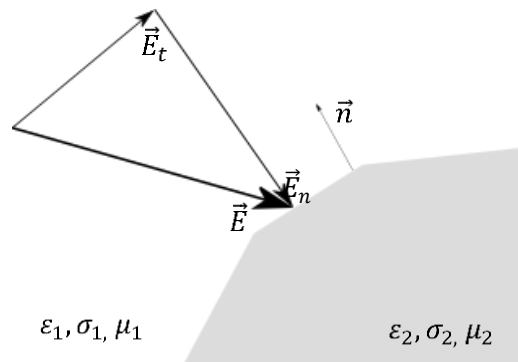
$$S = (1 + |\Gamma|)^2 \cdot \frac{P_{rad} \cdot G(\theta, \emptyset)}{4\pi \cdot r^2} \quad (5.8)$$

odnosno:

$$E = (1 + |\Gamma|) \cdot \frac{\sqrt{30 \cdot P_{rad} \cdot G(\theta, \emptyset)}}{r} \quad (5.9)$$

Postoje razni koeficijenti refleksije, ovisno o aproksimacijama koje se primjenjuju. Često se koriste koeficijenti refleksije koji proizlaze iz modificirane teorije preslikavanja (*eng. Modified Image Theory*, MIT) i Fresnelova aproksimacija ravnog vala. Rigorozni pristup u analizi refleksije i transmisije ravnih valova zasniva se na Sommerfeldovim integralima [90], ali ovaj pristup previše je složen za inženjersku primjenu.

Da bi se dobili koeficijenti refleksije potrebno je primijeniti uvjet za kontinuitet tangencijalnih komponenti električnog i magnetskog polja. Neka ravni val upada na granicu dviju sredina kako je prikazano na slici 5.3.

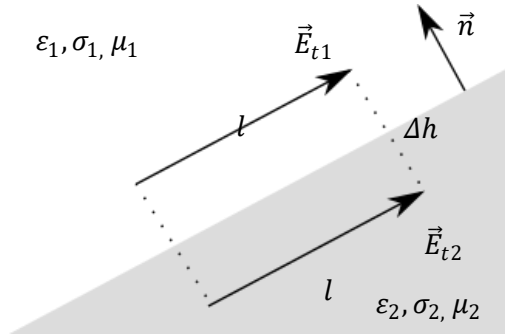


Slika 5.3 Upad ravnog EM vala na granicu dviju sredina

Električno polje \vec{E} sastavljeno je od paralelne komponente \vec{E}_t i komponente okomite na granicu upada \vec{E}_n :

$$\vec{E} = \vec{E}_t + \vec{E}_n \quad (5.10)$$

Ako se razmotri samo jedan mali segment između dvije sredine, može se pretpostaviti da su iznosi polja jednaki u međusobno bliskim točkama. Ako se promotri samo tangencijalna komponenta, zbog simetrije u obje sredine postoje jednake tangencijalne komponente \vec{E}_{t1} i \vec{E}_{t2} čiji se vektori mogu zatvoriti u petlju dimenzija $l \cdot \Delta h$ (slika 5.4).



Slika 5.4 Tangencijalne komponente električnog polja pri upadu vala na granicu dviju sredina

Prema prvoj Maxwelllovoj jednadžbi u integralnom obliku vrijedi:

$$\oint_S \vec{E} d\vec{s} = -\frac{\partial}{\partial t} \int_S \vec{B} d\vec{S} \quad (5.11)$$

Na granici sredina $\Delta h \rightarrow 0$, odnosno površina petlje $S \rightarrow 0$ pa integral (5.11) postaje:

$$\oint_S \vec{E} d\vec{s} = 0 \quad (5.12)$$

odnosno:

$$E_{t1} \cdot l - E_{t2} \cdot l = 0 \quad (5.13)$$

$$E_{t1} = E_{t2} \quad (5.14)$$

Na analogan način mogu se razmotriti i komponente magnetskog polja \vec{H}_{t1} , odnosno \vec{H}_{t2} .

Naime, ako se primijeni drugi Maxwellov zakon u integralnom obliku:

$$\oint_S \vec{H} d\vec{s} = \frac{\partial}{\partial t} \int_S \vec{D} d\vec{S} + I_S \quad (5.15)$$

slijedi da na granici sredina $\Delta h \rightarrow 0$, odnosno površina petlje $S \rightarrow 0$ pa integral (5.15)

postaje:

$$\oint_S \vec{H} d\vec{s} = I_S \quad (5.16)$$

Struja koja teče petljom I_S ne iščezava u potpunosti budući da sužavanjem petlje ($\Delta h \rightarrow 0$) ostaje dio struje koji teče linijom. Ako se razmotri poprečni presjek te linije, jakost struje može se promatrati kao gustoća struje J . U slučaju da se radi o dielektriku ili poluvodljivoj sredini, vrijedi $J = 0$. Konačno slijedi:

$$H_{t1} \cdot l - H_{t2} \cdot l = 0 \quad (5.17)$$

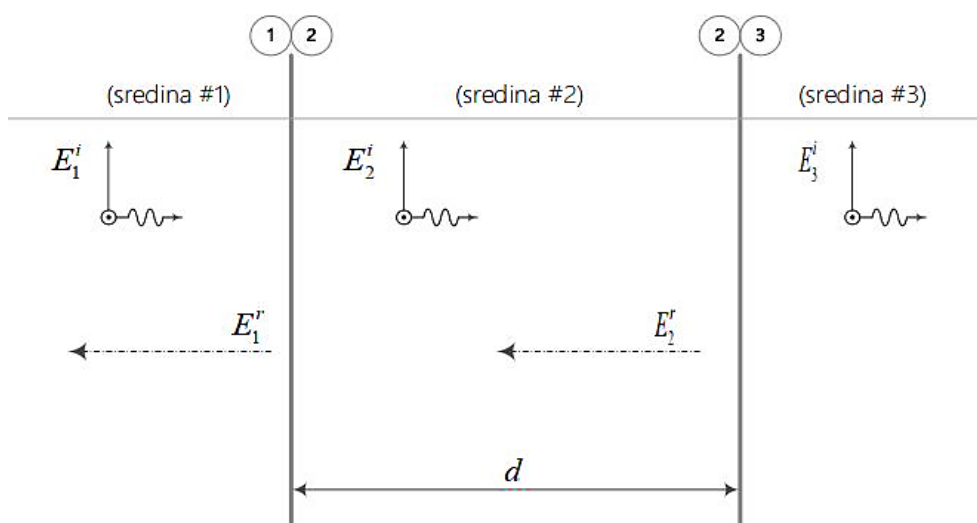
$$H_{t1} = H_{t2} \quad (5.18)$$

U konačnici, važno je istaknuti kako na granici sredina dielektrik – poluvodljivi medij vrijede sljedeći uvjeti:

$$E_{t1} = E_{t1} \quad (5.19)$$

$$H_{t1} = H_{t2} \quad (5.20)$$

U nastavku je dan izvod koeficijenta refleksije za slučaj višeslojne podloge (slika 5.5) zasnovan na prethodno izvedenim graničnim uvjetima.



Slika 5.5 Okomiti upad ravnog vala na višeslojnu podlogu

Općenito vrijedi:

$$E^i + E^r = E^t \quad (5.21)$$

odnosno:

$$1 + \frac{E^r}{E^i} = \frac{E^t}{E^i} \quad (5.22)$$

pa se može zapisati:

$$1 + R = T \quad (5.23)$$

gdje je:

$$R = \frac{E^r}{E^i} \quad (5.24)$$

i:

$$T = \frac{E^t}{E^i} \quad (5.25)$$

Također vrijedi:

$$H^i + H^r = H^t \quad (5.26)$$

odnosno:

$$\frac{E^i}{Z^i} - \frac{E^r}{Z^i} = \frac{E^t}{Z^t} \quad (5.27)$$

Na granici slojeva 1 i 2 prema slici, vrijedi:

$$\frac{E_1^i}{Z_1} - \frac{E_1^r}{Z_1} = \frac{E_2^r}{Z_2} \quad (5.28)$$

Kombiniranjem izraza (5.24), (5.25) i (5.28) slijedi:

$$\frac{1}{Z_1} - \frac{R}{Z_1} = \frac{T}{Z_2} \quad (5.29)$$

Sređivanjem izraza (5.29) uz (5.23) konačno slijedi:

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (5.30)$$

odnosno:

$$T = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (5.31)$$

Prema slici 5.3 i iz izraza (5.24) i (5.25), odnosno (5.30) i (5.31) slijedi:

$$E^r = E_1^r = R_{12} \cdot E_1^i = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \cdot E_1^i \quad (5.32)$$

$$E^t = E_2^i = T_{12} \cdot E_1^i = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \cdot E_1^i \quad (5.33)$$

Analogno se na granici slojeva 2 i 3 sa slike može zapisati:

$$E_3^t = T_{12} \cdot E_1^i e^{-\gamma_2 d} \cdot T_{23} \quad (5.34)$$

i:

$$E_2^r = T_{12} \cdot E_1^i e^{-\gamma_2 d} \cdot R_{23} \quad (5.35)$$

gdje je γ_2 konstanta propagacije a d debljinu sredine 2.

Zgodno je primijetiti da vrijedi:

$$T_{12} = 1 + R_{12} = 1 - R_{21} \quad (5.36)$$

odnosno:

$$R_{12} = -R_{21} \quad (5.37)$$

Za ukupni faktor refleksije na granici slobodnog prostora i višesloja vrijedi:

$$\frac{E_1^{r,tot}}{E_1^i} = R_{12} + T_{12} e^{-\gamma_2 d} R_{23} T_{21} + T_{12} e^{-\gamma_2 d} R_{23} e^{-\gamma_2 d} R_{21} e^{-\gamma_2 d} T_{21} + \dots \quad (5.38)$$

$$\frac{E_1^{r,tot}}{E_1^i} = R_{12} + \frac{T_{12} R_{23} T_{21} e^{-\gamma_2 d}}{1 + R_{12} R_{23} e^{-\gamma_2 d}} \quad (5.39)$$

Ukoliko se koeficijent transmisije prema izrazu (5.36) zamijeni faktorom refleksije u (5.39), slijedi:

$$\frac{E_1^{r,tot}}{E_1^i} = R_{12} + \frac{(1 + R_{12})R_{23}(1 - R_{21})e^{-\gamma_2 d}}{1 + R_{12}R_{23}e^{-\gamma_2 d}} \quad (5.40)$$

Nakon sređivanja izraza (5.40) vrijedi:

$$\frac{E_1^{r,tot}}{E_1^i} = \frac{R_{12} + (R_{12}^2 R_{23} + R_{23} - R_{12}^2 R_{23})e^{-\gamma_2 d}}{1 + R_{12}R_{23}e^{-\gamma_2 d}} \quad (5.41)$$

Ukupni faktor refleksije stoga se može aproksimirati:

$$R^{tot} = \frac{R_{12} + R_{23}e^{-\gamma_2 d}}{1 + R_{12}R_{23}e^{-\gamma_2 d}} \quad (5.42)$$

S obzirom da su impedancija sredine i konstanta propagacije kompleksne veličine pod korijenom:

$$Z_m = \sqrt{\frac{j\mu_0\omega}{\sigma_m + j\epsilon_0\epsilon_m\omega}} \quad (5.43)$$

odnosno:

$$\gamma_m = \sqrt{j\mu_0\omega\sigma_m - \omega^2\mu_0\epsilon_0\epsilon_m} \quad (5.44)$$

gdje μ_0 označava permeabilnost vakuuma ($4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$), pri direktnoj analizi javile bi se značajne poteškoće u primjeni inverzne Laplaceove transformacije. Stoga se uvode koeficijenti refleksije odnosno transmisije koji proizlaze iz modificirane teorije preslikavanja [17]:

$$R_{m,n} = \frac{(\sigma_m + j\omega\epsilon_m) - (\sigma_n + j\omega\epsilon_n)}{(\sigma_m + j\omega\epsilon_m) + (\sigma_n + j\omega\epsilon_n)} \quad (5.45)$$

gdje ω označava kružnu frekvenciju ($\omega = 2\pi f$, gdje je f frekvencija EM vala), σ_m specifičnu vodljivost sredine m , ϵ_0 permitivnost vakuuma ($8,85419 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$), a ϵ_m relativnu permitivnost sredine m . Kako je iz izraza (5.45) vidljivo, koeficijent refleksije u ovom slučaju ovisan je o relativnoj permitivnosti i specifičnoj vodljivosti podloge te frekvenciji vala.

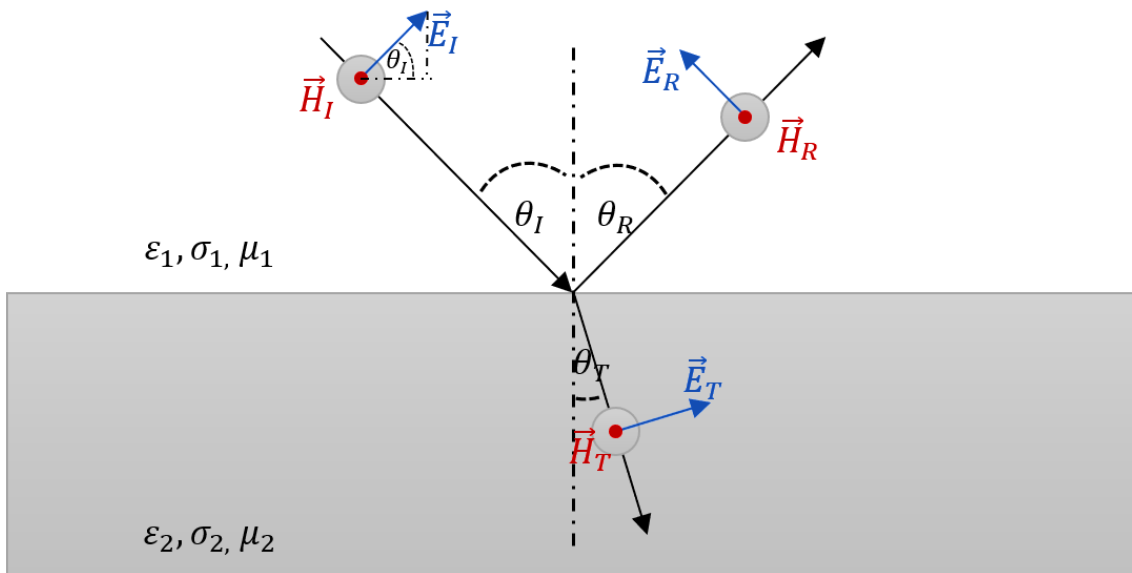
Izraz (5.45) se može zapisati kao:

$$R_{mn} = \frac{\varepsilon_{eff(m)} - \varepsilon_{eff(n)}}{\varepsilon_{eff(m)} + \varepsilon_{eff(n)}} \quad (5.46)$$

gdje je, dakle:

$$\varepsilon_{eff(m,n)} = \varepsilon_{(m,n)}\varepsilon_0 + \frac{\sigma_{(m,n)}}{j\omega} \quad (5.47)$$

Ako EM val na granicu dviju sredina upada pod ostrim kutom, za paralelne (eng. *Transverse Magnetic*, TM) i okomite (eng. *Transverse Electric*, TE) polarizacije, komponente upadnog i reflektiranog pola mogu se izraziti primjenom odgovarajućih faktora refleksije. Za slučaj TM polarizacije vektor magnetskog polja okomit je na smjer širenja vala (slika 5.6).



Slika 5.6 Reflektirana i transmitirana komponenta upadnog EM vala za slučaj TM polarizacije

Sada vrijede uvjeti:

$$H_{t,I} + H_{t,R} = H_{t,T} \quad (5.48)$$

$$E_{t,I} + E_{t,R} = E_{t,T} \quad (5.49)$$

Za tangencijalne komponente električnog polja vrijedi:

$$E_{t,I} = E_I \cdot \cos \theta_I \quad (5.50)$$

$$E_{t,R} = -E_R \cdot \cos \theta_R \quad (5.51)$$

$$E_{t,T} = E_T \cdot \cos \theta_T \quad (5.52)$$

Izraz (5.48) može se zapisati i kao:

$$\frac{E_I}{Z_I} + \frac{E_R}{Z_I} = \frac{E_T}{Z_T} \quad (5.53)$$

Iz (5.49) i (5.50 – 5.52) slijedi:

$$E_I \cdot \cos \theta_I - E_R \cdot \cos \theta_R = E_T \cdot \cos \theta_T \quad (5.54)$$

Kombinacijom izraza (5.53) i (5.54) slijedi:

$$E_I \cdot \cos \theta_I - E_R \cdot \cos \theta_R = \cos \theta_T \left[\frac{Z_T}{Z_I} \cdot E_I + \frac{Z_T}{Z_I} \cdot E_R \right] \quad (5.55)$$

Nakon sređivanja izraza (5.55) konačno se dobije:

$$\Gamma_R = \frac{Z_I \cdot \cos \theta_I - Z_T \cdot \cos \theta_T}{Z_I \cdot \cos \theta_I + Z_T \cdot \cos \theta_T} \quad (5.56)$$

Kako prema slici 5.6 EM val upada iz sredine 1 na sredinu 2, u izrazu (5.56) za Fresnelov koeficijent za refleksiju može se jasnije zapisati:

$$\Gamma_R^{TM} = \frac{Z_1 \cdot \cos \theta_I - Z_2 \cdot \cos \theta_T}{Z_1 \cdot \cos \theta_I + Z_2 \cdot \cos \theta_T} \quad (5.57)$$

U slučaju dvoslojne podloge, analogno kao pri MIT metodi, ukupni koeficijent za refleksiju proizlazi iz [53], [58], [60]:

$$\Gamma_R = \frac{R_{0m} + R_{mn} \cdot e^{-2\gamma l \cdot \cos(\theta_I)}}{1 + R_{0m} \cdot R_{mn} \cdot e^{-2\gamma l \cdot \cos(\theta_I)}} \quad (5.58)$$

U navedenim metodama obično se za izračenu snagu uzima najviša moguća. Međutim, kako je već spomenuto, bazna stanica veći dio vremena odašilje snagom koja je i nekoliko puta manja od najviše moguće. Zbog te činjenice, a i nove tehnologije odašiljanja implementirane u 5G, u nekim se istraživanjima spominje neopravdana, višestruka predimenzioniranost razina

EM polja dobivenih proračunom. Primjerice, prema [19] i [20] proračun razina izloženosti baziran je na prosječnoj zračevoj snazi određenoj mjerenjem unutar 24 h:

$$P_{24h} = \alpha_{24h} \cdot P_{max} \quad (5.59)$$

pri čemu je faktor α_{24h} dobiven mjerenjem stvarne zračene snage:

$$\alpha_{24h} = \frac{1}{24} \sum_{t=1}^{24} \frac{P_t}{P_{max}} \quad (5.60)$$

gdje je P_t stvarna zračena snaga po satu (W), a P_{max} najviša moguća zračena snaga (W).

Proračun prosječnih razina izloženosti EM poljima bazne stanice moguće je provesti i uz pomoć modela očekivanja frakcije ukupne zračene snage $\hat{P}(n, \rho)$ gdje n označava broj korisnika, a ρ razinu iskorištenja sustava. Stoga slijedi da je $\hat{P}(n, \rho) \propto \rho$. Osnovni je dakle parametar u izračunu izloženosti model distribucije korisnika unutar ćelije (područja pokrivanja) što dovodi do višestrukog smanjenja razine izloženosti u odnosu na najvišu moguću. Prema [22] tako određena razina izloženosti iznosi između 7 % i 22 % u odnosu na teorijski najvišu moguću razinu.

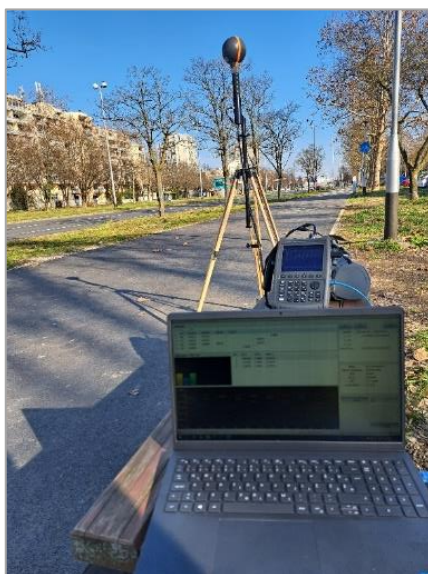
Za izračun prosječne razine izloženosti može se promatrati i vremenski promjenjiv dijagram zračenja bazne stanice. Naime, u [21] predstavljen je vremenski ovisan dobitak antene $G(\theta, \varphi, t)$. Pri položaju $(\theta, \varphi) = (0^\circ, 0^\circ)$ točka promatranja okomita je na antenu, a dobitak je najveći mogući. Kao vrijeme uprosječenja može se uzeti period od 6 min, a varijabilni dijagram zračenja $G(\theta, \varphi, t)$ dobije se mjerenjem gustoće snage ili jakosti električnog polja u točki promatranja. Tako dobiveni prosječni dobitak antene u obzir istovremeno uzima i faktor zbog radnog ciklusa F_{TDD} (detaljnije objašnjeno u poglavlju 5.3). S obzirom na prethodno definirane uvjete odašiljanja, izmjeren je znatno umanjeni dobitak antene u odnosu na teorijski najveći, odnosno može se pretpostaviti kako stvarna zračena snaga antene ne prelazi 32 % od najviše moguće.

Zasada se u službenoj metodologiji za proračun polja 5G bazne stanice može primijeniti faktor ograničenja izračene snage F_{PR} koji predstavlja vremensko uprosječenje zračene snage bazne stanice u određenom vremenskom intervalu [91].

5.2. Mjerna oprema i postupak mjerenja

Mjerenje razina EM polja primarno se provodi u svrhu zaštite od mogućeg štetnog utjecaja na čovjeka, ali i praćenja razina polja čak i kada su izmjerene vrijednosti višestruko niže od propisanih graničnih razina.

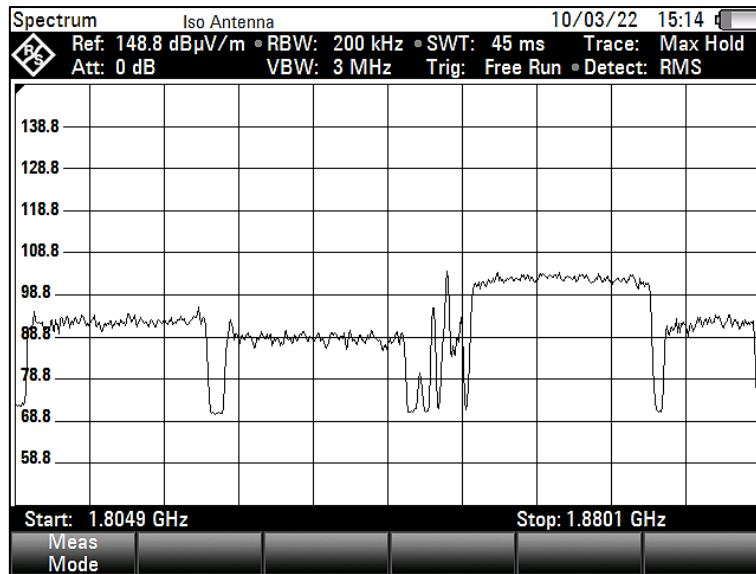
Mjerenje fizikalnih veličina kao što su jakost električnog i magnetskog polja obavlja se pomoću odgovarajuće mjerne opreme koja mora udovoljavati određenim standardima [9], [10], [11], [12], [13], [15], [16], i dr. Mjerna oprema obično se sastoji od analizatora frekvencijskog spektra, prijамne antene, optičkih i/ili koaksijalnih kabela, nevodljivog tronošca te prijenosnog računala (slika 5.7).



Slika 5.7 Osnovni dijelovi mjerne opreme

Korisno je istaknuti kako se jakost električnog polja obično mjeri dipolnim sondama, a jakost magnetskog polja uz pomoć malih sondi u obliku petlji [92].

Na terenu je od pomoći i dodatna oprema, primjerice optički ili laserski daljinomjer, navigacijski uređaj (GPS), fotoaparatus, higrometar i dr. Analizator frekvencijskog spektra (spektralni analizator) po definiciji je uređaj koji mjeri snagu (amplitudu) signala pri različitim frekvencijama. Može se reći da je sličan osciloskopu budući da na zaslonu prikazuje ovojnicu mjerenog signala pri čemu na horizontalnoj ravnini može biti prikazana frekvencija ili vrijeme, a na vertikalnoj ravnini snaga (amplituda) mjerenog signala (slika 5.8).



Slika 5.8 Snimka zaslona analizatora spektra pri širokopojasnom mjerenju u frekvencijskoj domeni

Osim informacija o razinama EM polja, na zaslonu analizatora mogu se očitati i podaci o korištenim mjernim postavkama (rezolucijska širina, vrijeme prebrisa, vrsta detektora, centralna frekvencija, frekvencijski opseg i dr.). Često se u analizator dodaju antenski faktori pa se osim snage signala, na vertikalnoj osi može prikazati i razina električnog ili magnetskog polja. Analizator je u većini slučajeva upravljiv uz pomoć računala, odnosno prikladnog programa što olakšava upravljanje mjernim postavkama, dobivenim rezultatima, ali i antenskim faktorima. Kvalitetni analizatori spektra u mogućnosti su mjeriti razine EM polja u frekvencijskoj i vremenskoj domeni (*eng. Zero Span, ZS*) [76].

Spektralni analizator mjeri primljenu snagu P (dBm ili dBW) koja se antenskim faktorima AF (dB/m) preračunava u jakost električnog polja [26]:

$$E = \frac{1}{\sqrt{20}} \cdot 10^{\frac{P+AF}{20}} \quad (5.61)$$

Prijamna antena obično se montira na nevodljivi tronožac na određenoj visini iznad tla (primjerice 1,5 m) te se pripadajućim kabelima spaja na analizator frekvencijskog spektra. Prijamna antena može biti usmjerena ili izotropna (slike 5.9 i 5.10).



Slika 5.9 Izotropna antena



Slika 5.10 Usmjereni antena

Kod usmjerenih antena (primjerice ljevkastih, log-periodic ili tanjurastih antena) važno je paziti na njihovo usmjerenje i položaj prijamnog elementa, odnosno njegovu polarizaciju, a mjerenje je potrebno provoditi na način kako bi se izmjerile komponente EM polja u sve tri osi (x , y i z). Ukupno polje tada je jednako:

$$E_{total} = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2} \quad (5.62)$$

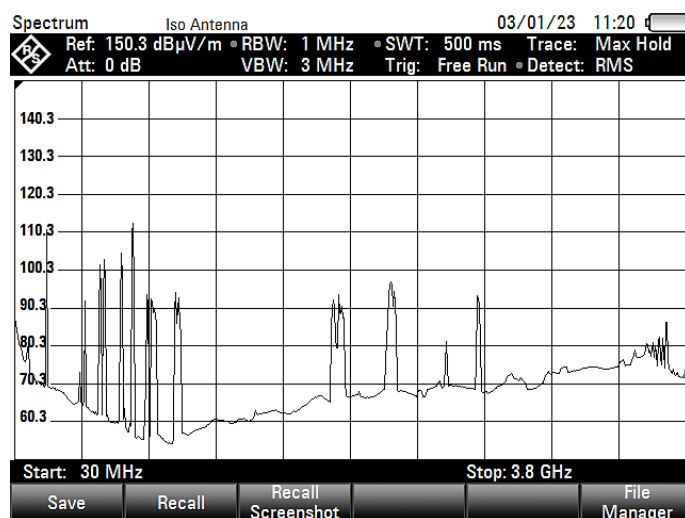
Izotropna prijamna antena u sebi već sadrži ugrađene sve tri prijamne osi, stoga ju u većini slučajeva nije potrebno zakretati što uvelike olakšava i ubrzava proces mjerenja. Može se stoga zaključiti kako je mjerenje usmjerenim antenama složenije od upotrebe izotropnih antena [25]. No, važno je pak istaknuti kako izotropno mjerenje nije primjenjivo kod svih izvora EM polja ili pak kod mjerenja u vremenskoj domeni. Naime, pri mjerenju razina EM polja radara izotropno mjerenje nije prikladno jer se može dogoditi da prebris (skeniranje) kroz sve tri osi traje 100 ms, a rotirajući radar izlaže mjernu točku puno kraće (primjerice 22 ms) [76]. Dakle, vrijeme prebrisa je predugo u odnosu na trajanje izloženosti. Zbog toga je u tim slučajevima potrebno zasebno mjeriti jakost polja na svakoj osi (x , y i z).

U normama su detaljno opisani zahtjevi koji moraju biti udovoljeni za pravilno mjerenje razina EM polja kao i različite mjerne metodologije. Primjerice, u [11] su navedeni temeljni zahtjevi pri mjerenju razina EM polja, a neki od njih su:

- mjerna oprema treba biti propisno umjerena (kalibrirana),
- potrebno je spoznati što više karakteristika prisutnih izvora,

- napraviti proračun očekivanih razina polja korištenjem jednostavnih računskih metoda,
- pravilno postaviti mjerne postavke na instrumentu (analizatoru spektra),
- potrebno je izračunati ukupni doprinos svih prisutnih izvora (*eng. Total Exposure Ratio, TER*).

Jedan od prvih koraka u mjerenju razina EM polja jest identifikacija svih prisutnih radiofrekvencijskih izvora. Mjerenje razina EM polja kao i post-procesiranje izmjerenih rezultata mora obuhvatiti sve prisutne aktivne izvore [11]. Odabir metodologije mjerenja ovisan je o više faktora, a općenito govoreći, postoji metodologija za uskopojasno, odnosno širokopojasno mjerenje. Širokopojasno mjerenje provodi se najčešće za detekciju aktivnih izvora odnosno kanala (slika 5.11), ali i grubu procjenu ukupne razine izloženosti nakon koje se može odlučiti o provođenju točnijeg, ali i mnogo složenijeg uskopojasnog mjerenja [12].



Slika 5.11 Širokopojasno mjerenje razina električnog polja na frekvencijskom području između 30 MHz i 3.8 GHz

Osim toga, širokopojasno mjerenje može pomoći u odabiru mjernih točaka koje su najviše izložene izvoru EM polja (*eng. Point of Interest, PoI*) [11].

Uskopojasno pak mjerenje pruža pouzdanu informaciju o razinama izloženosti EM poljima. Osim mjerenja razina EM polja pojedinačnih izvora (slika 5.12), uskopojasnim mjerenjem moguće je provesti ekstrapolaciju mjernih rezultata na najgori mogući slučaj te odrediti TER [11], [12].



Slika 5.12 Uskopojasno (kanalno) mjerenje s centralnom frekvencijom od 3,75 GHz i širinom aktivnog kanala od 100 MHz

Važno je istaknuti kako proces ekstrapolacije mjernih rezultata nije prikladno provoditi uz širokopojasno mjerenje zbog velike mogućnosti višestrukog predimenzioniranja razina EM polja.

Kako je već spomenuto u poglavlju 4 (tablica 4.1), u zoni bliskog radijacijskog polja izvora potrebno je zasebno mjeriti razinu električnog i magnetskog polja. U ovom području veza između električnog i magnetskog polja je složena [76].

U zonama pak bliskog radijacijskog polja i daljinskog polja izvora dovoljno je mjeriti jednu od spomenutih veličina (E ili H) [11]. Gustoća snage u tom slučaju može se aproksimirati izrazom:

$$S = \frac{E^2}{Z_0} = H^2 \cdot 120\pi \quad (5.63)$$

gdje je $Z_0 = 120\pi$ (Ω) impedancija slobodnog prostora.

U područjima u kojima ne vladaju uvjeti ravnog vala¹ poželjno je provesti i prostorno usrednjavanje veličine od interesa kako bi se izbjeglo predimenzioniranje pri mjerenju izloženosti EM poljima. Prostorno usrednjavanje provodi se mjerenjem razina EM polja u N mjernih točaka na određenim visinama iznad tla koje okružuju mjernu lokaciju, odnosno točku evaluacije. Prostorno usrednjena veličina od interesa u tom je slučaju jednaka [11]:

¹ Ravni val poseban je oblik EM vala (polja) čija je amplituda u kojem u bilo kojem trenutku konstanta na površini okomitoj na smjer njegovog širenja.

$$\bar{A} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N A_i^2}{N}} \quad (5.64)$$

gdje je A mjerena veličina od interesa.

U slučaju više prisutnih izvora, prostorno usrednjavanje potrebno je obaviti zasebno za svaki mjereni izvor (aktivni kanal). U slučaju prostornog mjerenja razina EM polja u okolini 5G bazne stanice koja radi u FR1 frekvencijskom području, prema [28], dovoljno je mjerne lokacije postaviti na razmak od 1 m.

Osim prostornog usrednjavanja mjerene veličine, u važećim normama [11] i mjernim priručnicima [76] često se spominje i vremensko usrednjavanje. Vremensko usrednjavanje primjenjivo je kod izvora EM polja čija zračena snaga ovisi primjerice o prometu, kontroli snage, radnom ciklusu i sl. što će posebno biti važno pri mjerenju razina polja nove, 5G tehnologije. Važno je istaknuti kako se rezultati mjerenja moraju iskazati uz prethodno definiranu proširenu mjernu nesigurnost koja ne smije prelaziti 4 dB [11].

5.3. Mjerne metode u RF području ispod 6 GHz

Implementacija 5G tehnologije popraćena je povećanom zabrinutošću za mogući štetni utjecaj EM polja na zdravlje. Ne samo zbog činjenice da se radi o novoj tehnologiji i višim radnim frekvencijama već i povećanju kumulativnih razina EM polja, odnosno povećanja ukupne razine izloženosti. Zabrinutost javnosti mogla bi, dakle, utjecati na implementaciju 5G baznih stanica. Stoga su mjerenja i proračuni razina EM polja u okolini baznih stanica od velike važnosti po pitanju očuvanja zdravlja, ali i dugoročnog praćenja razina EM polja. Ne treba zaboraviti ni na činjenicu kako će veći broj baznih stanica, ujedno i veći zahtjevi za mjerenjem, u konačnici posljedično uzrokovati povećanje troškova implementacije nove tehnologije [28]. Zbog toga je od iznimne važnosti razviti pouzdanu i ekonomičnu mjernu metodu i praktične mjerne protokole.

Način operativnosti, a samim time i metodologija mjerenja razina električnog polja i gustoće snage 5G baznih stanica uvelike je drugačija u odnosu na dosadašnje mrežne generacije (2G, 3G i 4G). Za izdvojiti je, primjerice, zajedničko djelovanje antenskih elemenata 5G antene, što će predstavljati poseban izazov u proračunu i mjerenju razina EMP [93]. Iako su neke države

već usvojile strategiju mjerenja [94] još uvijek nema jednoznačnog, općeprihvaćenog modela za mjerenje razina EM polja. Ipak, prema brojnim provedenim istraživanjima [21], [25], [26], [29], [30], [31], [78], [94] i mnogi drugi, postoji nekoliko mjernih metoda koje je moguće primijeniti. Mjerenje razina EM polja u 2G, 3G i 4G tehnologiji bazirano je na mjerenju signala koji se emitira konstantnom snagom (tzv. pilot signal (PS) ili izvorišni elementi (RE)), a projekcija izloženosti u uvjetima maksimalnog opterećenja (prometa) vrši se ekstrapolacijom [11]. Općenito govoreći, najviša razina električnog polja procjenjuje se prema relaciji:

$$E^{max} = \sqrt{A} \cdot E_{PS/RE}^{max} \quad (5.65)$$

gdje A predstavlja produkt svih primijenjenih ekstrapolacijskih faktora, a $E_{PS/RE}^{max}$ označava najvišu izmjerenu razinu EM polja pilot signala (tablica 5.1).

Tablica 5.1 "Pilot" signali u generacijama mobilnih mreža [27], [29], [76], [78]

generacija	tehnologija	pilot signal
2G	GSM	BCCH (<i>Broadcast Control Channel</i>)
3G	UMTS	P-CPICH (<i>Primary Common Pilot Channel</i>)
4G	LTE	PSS (<i>Primary Common Pilot Channel</i>) SSS (<i>Secondary Synchronisation Signal</i>) PBCH (<i>Physical Broadcast Channel</i>) RS (<i>Reference Signal</i>)
5G	5GNR	PSS, SSS PBCH-DMRS (<i>PBCH-Demodulation Reference Signal</i>) PDSCH (<i>Physical Downlink Shared Channel</i>)

Vrijednost $E_{PS/RE}^{max}$ zapravo predstavlja snagu na konektoru mjerne opreme $P_{PS/RE}^{max}$ kojoj se pridodaje faktor antene AF , karakteristična impedancija Z_{in} te prigušenje kabela G_c [84]:

$$E_{PS/RE}^{max} = \sqrt{\frac{P_{PS/RE}^{max} \cdot Z_{in}}{G_c}} \cdot AF \quad (5.66)$$

Kod GSM tehnologije mjeri se snaga BCCH kanala, a ekstrapolacija se izvodi prema ukupnom broju kanala (nositelja) n_{TRX} [52]:

$$E_{GSM}^{max} = \sqrt{n_{TRX}} \cdot E_{BCCH} \quad (5.67)$$

gdje je n_{TRX} jednak zbroju BCCH i TCH (eng. *Traffic Channels*) nositelja :

$$n_{TRX} = n_{BCCH} + n_{TCH} \quad (5.68)$$

Pri UMTS tehnologiji pilot signal čija je snaga pogodna za ekstrapolaciju jest tzv. P-CPICH. P-CPICH emitiran je konstantnom snagom neovisno o trenutnom prometu, a obično je alocirano s 4 % do 10 % snage pri maksimalnom opterećenju [12], [76]. Razina polja pri najvećem opterećenju bila bi stoga jednaka [76]:

$$E_{UMTS}^{max} = \sqrt{n_{P-CPICH}} \cdot K_{RBW} \cdot E_{P-CPICH} \quad (5.69)$$

gdje K_{RBW} označava korekcijski faktor u slučaju rezolucijskog pojasa (eng. *Resolution Bandwidth*, RBW) užeg od širine aktivnog kanala (eng. *Channel Bandwidth*, CBW):

$$K_{RBW} = \sqrt{\frac{CBW}{RBW}} \quad (5.70)$$

Razina EM polja LTE tehnologije može se dobiti na dva načina: spektralnim mjerenjem u vremenskoj domeni ili dekodiranjem referentnih signala. Obje metode podrazumijevaju mjerenje razine komponente signala odašiljanog konstantnom snagom te ekstrapolaciju ukupnim pripadnim faktorom (K_{RS}) za slučaj najvišeg opterećenja prema [76], [78]:

$$E_{LTE}^{max} = \sqrt{K_{RS}} \cdot E_{RS} \quad (5.71)$$

Analogan princip moguće je primijeniti i kod nove 5G tehnologije, a ispitivanje pouzdanosti mjernih metoda predmet je mnogih istraživanja [25], [26], [27], [28], [29], [31], [78], [94], [95], [96] i dr.

Prema [26] 5 je osnovnih koraka pri mjerenju razine izloženosti EM poljima 5G bazne stanice:

- I. širokopoljasni pregled spektra u svrhu identificiranja svih aktivnih izvora (kanala),
- II. lociranje prisutnih SSB-ova,
- III. mjerenje razine polja po izvorišnom elementu (dominantnog SSB-a ili podatkovnog podnositelja),
- IV. kanalno mjerenje trenutne (prosječne) izloženosti EM polju izvora tijekom određenog vremena (primjerice 6 min) te
- V. postprocesiranje izmjerenih vrijednosti (ekstrapolacija izmjerenih razina polja i izračun razine izloženosti).

Pri prvom koraku poželjno je rezolucijski pojas postaviti prema najmanjoj širini aktivnog izvora (primjerice 200 kHz). Važno je istaknuti kako se ovakvim mjerenjem ne mogu dobiti vjerodostojne razine EM polja te ovaj korak služi isključivo za indikaciju aktivnih izvora (kanala) [26].

Mjerenje razina EM polja pri najvišem opterećenju bazne stanice ili trenutnih (uprosječenih) razina EM polja kao i mjerenje komponenti signala čija amplituda ne ovisi o prometu u 5G frekvencijskom području moguće je izvesti na nekoliko načina:

- demodulacijom sinkronizacijskih signala (PSS ili češće SSS te PBCH-DMRS),
- *zero span* mjerenjem dijela signala alociranog za silaznu vezu (PDSCH),
- izravnim mjerenjem snage SSB signala u vremenskoj domeni te
- kanalnim mjerenjem uz iniciranje podatkovnog prometa.

Razina izloženosti u mjernoj točki doseći će najvišu vrijednost u trenutku najvećeg opterećenja bazne stanice, odnosno kada cijeli vremenski okvir bude opterećen silaznim podacima. U tom trenutku bazna stanica imat će najveći dobitak (G_{max}) u smjeru mjerne točke. Ako se mjeri snaga izvorišnog elementa (E_{RE}^{max}), ekstrapolacija izmjerenih rezultata biti će jednaka [94]:

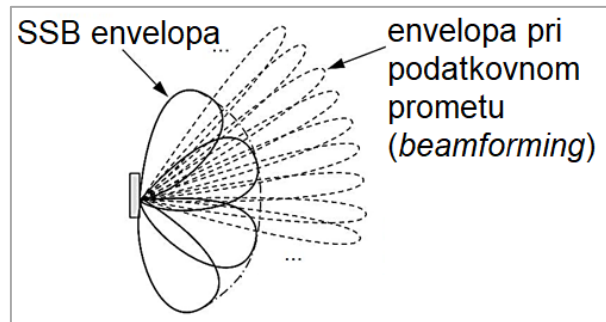
$$E_{5G}^{max} = \sqrt{N_{RE}} \cdot E_{RE}^{max} \quad (5.72)$$

gdje N_{RE} predstavlja ukupan broj podnositelja koji je jednak [31]:

$$N_{RE} = 12 \cdot N_{RB} \leq 3300 \quad (5.73)$$

gdje N_{RB} označava ukupan broj izvorišnih blokova.

Zbog primjene aktivnih antena u 5G tehnologiji dobitak antene pri podatkovnom prometu veći je od dobitka pri SSB signalu (slika 5.13).

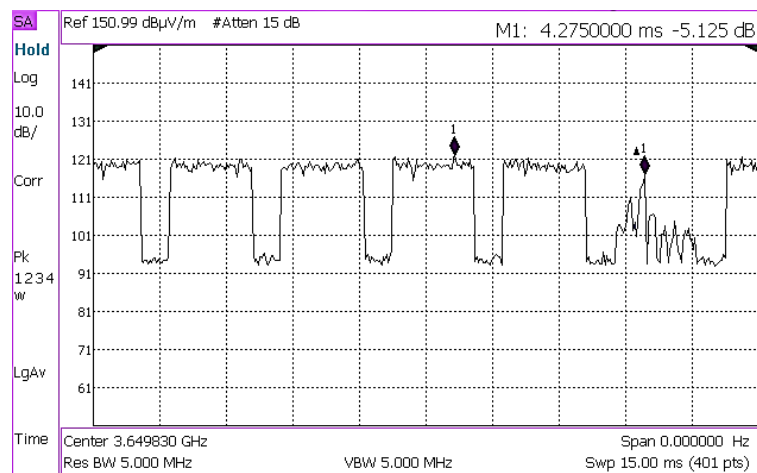


Slika 5.13 Razlika dobitka SSB-a i dobitka antene pri podatkovnom prometu [94]

Stoga je razliku u dobitku potrebno pridodati izmjerenoj vrijednosti polja izvorišnog elementa. Razlika u dobitku definira se kao dodatni faktor ekstrapolacije F_{beam} (negdje označen i kao F_{EIRP}), a jednak je omjeru najvećeg antenskog dobitka u trenutku prijenosa podataka (G_{max}) i dobitka dominantnog SSB-a (G_{SSB}) [26]:

$$F_{beam} = \frac{G_{max}}{G_{SSB}} \quad (5.74)$$

Faktor F_{beam} može se primjerice izračunati uz pomoć dijagrama zračenja 5G antene ili dobiti mjerenjem u vremenskoj domeni pri čemu je potrebno inicirati podatkovni promet upotrebnom mobilnog uređaja koji podržava 5G mrežu (slika 5.14).

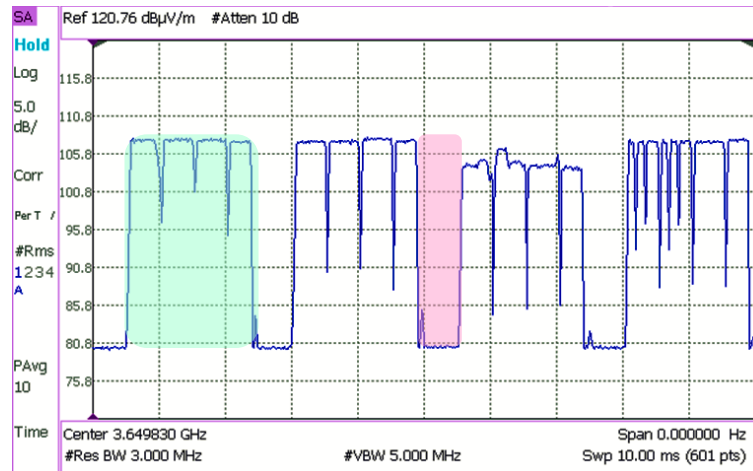


Slika 5.14 Mjerenje razlike snage pri podatkovnom prometu u odnosu na snagu SSB-a [60]

Stoga izraz (5.72) postaje [26]:

$$E_{5G}^{max} = \sqrt{N_{RE} \cdot F_{beam}} \cdot E_{RE}^{max} \quad (5.75)$$

Kako bi ekstrapolacija izmjerenih rezultata bila što točnija, od iznimne važnosti je poznavanje primijenjene komunikacijske tehnike (načina rada) 5G bazne stanice (TDD ili FDD). Naime, pri TDD načinu rada uzlazna i silazna veza dijele jednake frekvencije, ali su vremenski razdvojene (slika 5.15).



Slika 5.15 Prikaz silazne (zelena površina) i uzlazne (crvena površina) veze

U tom slučaju prilikom ekstrapolacije izmjerenih rezultata u proračun razine polja obavezno se uključuje i tzv. faktor radnog ciklusa (F_{TDD} , negdje označen i kao F_{TDC}). Pri TDD načinu rada najviša razina izloženosti treba biti razmjerna dijelu vremena sa silaznom vezom u odnosu na ukupno vrijeme [22], [31], [78]:

$$F_{TDD} = \frac{\frac{DL}{UL}}{\frac{DL}{UL} + 1} \quad (5.76)$$

gdje $\frac{DL}{UL}$ označava omjer vremena silazne veze (eng. *Downlink Transmission Time*) i vremena uzlazne veze (eng. *Uplink Transmission Time*).

Također, faktor radnog ciklusa može se dobiti i iz [31]:

$$F_{TDD} = \frac{N_{DL}}{N_T} \quad (5.77)$$

gdje N_{DL} označava broj piksela dodijeljenih za silaznu vezu, a N_T ukupan broj piksela na zaslonu analizatora [31]. Pretpostavka je da faktor F_{TDD} može biti u rasponu između 0,4 i 0,9 [22], a najčešće vrijednosti faktora F_{TDD} približno su između 0,74 i 0,75 [22], [28], [31], [78].

Konačno, u slučaju TDD načina rada 5G bazne postaje, ekstrapolirana razina EM polja jednaka je [28]:

$$E_{5G}^{max} = \sqrt{N_{RE} \cdot F_{beam} \cdot F_{TDD}} \cdot E_{RE}^{max} \quad (5.78)$$

Neke bazne stanice imaju mogućnost ograničavanja izračene snage, odnosno osiguranja da prosječna izračena snaga ne prijeđe određenu razinu u definiranom vremenskom periodu (primjerice 20 % od najviše moguće zračene snage unutar 30 min). Sukladno tome, ukupna ekstrapolirana razina EM polja može se umanjiti za faktor redukcije F_{PR} čija vrijednost obično iznosi 0,2 – 1 [91]:

$$E_{5G}^{max} = \sqrt{N_{RE} \cdot F_{beam} \cdot F_{TDD} \cdot F_{PR}} \cdot E_{RE}^{max} \quad (5.79)$$

Osim ekstrapolacijom, najvišu moguću razinu izloženosti moguće je dobiti i kanalnim mjerenjem iako se ono češće koristi pri određivanju prosječnih razina polja. Naime, kanalno mjerenje konzervativna je mjerna metoda koja se uvelike koristi u dosadašnjim tehnologijama (2G, 3G i 4G). Bazirana je na frekvencijskom mjerenju cijelog jednog aktivnog kanala uz poznavanje središnje frekvencije kanala, njegove širine i dr. Budući da je 5G tehnologija još uvijek u procesu implementacije i broj korisnika najčešće nije dovoljno velik, pri kanalnom mjerenju koristi se 5G mobilni uređaj za dugotrajniju inicijalizaciju prometa [60].

Procjena pak prosječne razine izloženosti može se dobiti kanalnim mjerenjem trenutnih razina EM polja aktivnog kanala. Prema ICNIRP-ovim smjernicama vrijeme usrednjavanja jednako je 6 min [26], iako se u praksi pokazalo da se i mnogo kraćim mjerenjem (primjerice 1 min) mogu dobiti potpuno usporedive vrijednosti.

5.4. Demodulacija signala sinkronizacijskog bloka (kodna domena)

Osnovna ideja pri mjerenju razina EM polja u 5G frekvencijskom području demodulacijom jest mjerenje snage stabilnog dijela signala (SSB signala) te primjena ekstrapolacijskih faktora (koeficijenata) za određivanje najviše razine izloženosti, a provodi se u tzv. kodnoj domeni (eng. *Resource Code Domain*) [78]. Zračena snaga baznih stanica modernih mobilnih mreža ovisi o nekoliko faktora, uključujući prijenos podataka i mogućnost upravljanja snagom. Stoga je procjena najviše moguće razine vremenski promjenjivog izvora moguća promatranjem

komponente signala koja je zračena konstantnom snagom, a koja se uzima kao referentna vrijednost u postupku ekstrapolacije. Budući da je SSB emitiran konstantnom snagom, moguće je mjeriti razinu jednog od njegovih sastavnih komponenti: PSS, SSS ili pak PBCH-DMRS (slika 5.16).

Cells	Cell=0	Cell=1	-	-	-	-	-	-
Frequency	3.650 GHz	3.650 GHz	-	-	-	-	-	-
PCI (C-S-G)	39-2-12	253-1-84	-	-	-	-	-	-
SSB Index	5	4	-	-	-	-	-	-
RSRP (dBm)	-117.350	-125.725	-	-	-	-	-	-
RSRQ (dB)	-22.310	-24.098	-	-	-	-	-	-
RSR (dBm)	-82.030	-88.617	-	-	-	-	-	-
SINR (dB)	-1.447	-7.289	-	-	-	-	-	-
PSS (dBm)	-115.284	-125.154	-	-	-	-	-	-
SSS (dBm)	-115.902	-123.705	-	-	-	-	-	-
DMRS (dBm)	-119.543	-129.634	-	-	-	-	-	-
Freq Error (Hz)	2090.535	-2065.026	-	-	-	-	-	-
Time Offset (us)	3464.323	3107.422	-	-	-	-	-	-

Slika 5.16. Demodulacija signala unutar SSB-a

Metoda demodulacije prikladna je i zbog činjenice da se razina snage SSB-a može mjeriti zasebno za svaku ćeliju (sektor). Problem doprinosa susjednih ćelija moguć je pri demodulaciji PSS-a ukoliko ćelije imaju jednak ID, stoga je preporučeno demodulirati SSS ili pak PBCH-DMRS [25], [78].

Demodulacija PBCH-DMRS signala detaljno je objašnjena u [24], [31], [78], gdje je razina izloženosti za slučaj najvećeg opterećenja ekstrapolirana preko:

$$E_{RE}^{max} = \frac{E_{RE}^{PBCH-DMRS}}{\sqrt{R}} \quad (5.80)$$

gdje se, zbog utjecaja prostornog prebrisa SSB-ova (eng. *Beam Sweeping Effect*), faktor R također mjeri u kodnoj domeni, a jednak je [31]:

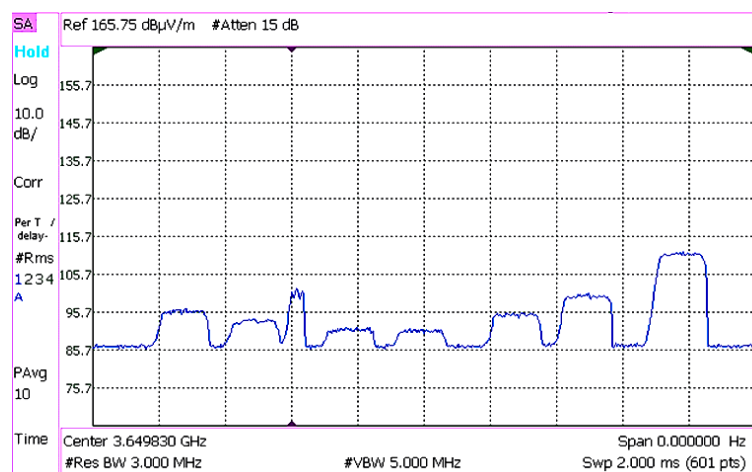
$$R = \frac{\bar{P}_{SSB}}{P_{SSB-max}} \quad (5.81)$$

gdje \bar{P}_{SSB} predstavlja prosječnu zračenu snagu prisutnih SSB-ova, a $P_{SSB-max}$ zračenu snagu najjačeg SSB-a unutar SSB niza. U izraz (5.80), ovisno o izvedbi 5G antene, dodaju se i faktori ekstrapolacije F_{beam} , odnosno F_{TDD} .

Kako je prethodno pokazano, demodulacija signala nije neuobičajena u dosadašnjim generacijama mobilne mreže, no 5G tehnologija ipak je kudikamo složenija zbog vremenske i prostorne tehnike multipleksiranja (TDD, prebris snopovima i MIMO sustav) [78]. Stoga su mjerne metode, ali i ekstrapolacijski faktori još uvijek predmet istraživanja. Također, nerijetko se vodi i polemika oko predimenzioniranja razina izloženosti, budući da je vrlo mala vjerojatnost da bazna stanica bude potpuno opterećena i da svu snagu usmjeri u jedan snop zračenja tijekom dužeg vremenskog perioda (npr. 6 min) [26]. Sukladno tome u nekim istraživanjima nastoji se odrediti stvarna najviša razina EM polja koja u obzir uzima i iskoristivost bazne stanice, odnosno prostornu raspodjelu zračene snage [19], [20], [21], [22] [26] i dr.

5.5. Izravno mjerenje snage (*zero span* domena)

Snagu SSB signala moguće je i izravno mjeriti u vremenskoj domeni u tzv. *zero span* modu [28], (slika 5.17).



Slika 5.17 Mjerenje snage dominantnog SSB-a u vremenskoj domeni [84]

Mjerenjem u *zero span* modu lokalni oscilator ne čini prebris, već ostaje fiksiran na zadanoj frekvenciji [31]. Time je omogućeno praćenje mjerene veličine kao funkcije vremena.

Slično kao kod metode demodulacije, i mjerenje u *zero span* domeni zahtijeva ekstrapolaciju izmjerenih rezultata. Uz TDD način rada, prema [28], [78] ekstrapolacija se računa iz:

$$E_{5G}^{max} = \sqrt{N_{RE} \cdot F_{TDD} \cdot F_{beam} \cdot \frac{SCS}{RBW}} \cdot E_{SSB}^{max} \quad (5.82)$$

gdje faktor $\frac{SCS}{RBW}$ označava omjer frekvencijskog razmaka susjednih podnositelja i korištenog rezolucijskog pojasa (RBW). Faktori F_{TDD} i F_{beam} također se mogu dobiti postupcima opisanim u poglavlju 5.4.

Do sada opisane mjerne metode izvode se uz uvjet poznavanja dijagrama zračenja 5G antene ili pak uz dodatno mjerenje snage pri SSB-u, odnosno podatkovnom prometu. Stoga je za valjanu ekstrapolaciju nužno doći do faktora F_{beam} . No, mjerenje razina EM polja 5G bazne stanice u *zero span* modu može se provesti i bez poznavanja dijagrama zračenja antene, odnosno izravnim mjerenjem snage PDSCH dijela signala (*eng. Physical Downlink Shared Channel*), tj. kanala rezerviranog za prijenos podataka kojeg je moguće pobuditi primjerice mobilnim uređajem koji podržava 5G mrežu. Primjerice, uz pomoć vektorskog analizatora i posebnim postprocesiranjem izmjeri se snaga po izvorišnom elementu unutar PDSCH odsječaka. Uz primjenu antenskih faktora i gubitaka u kabelu računa se ukupna razina polja $E_{RE,PDSCH}$ koja u sebi sadrži sve tri osi (x, y, z), a ekstrapolacija se vrši preko [27]:

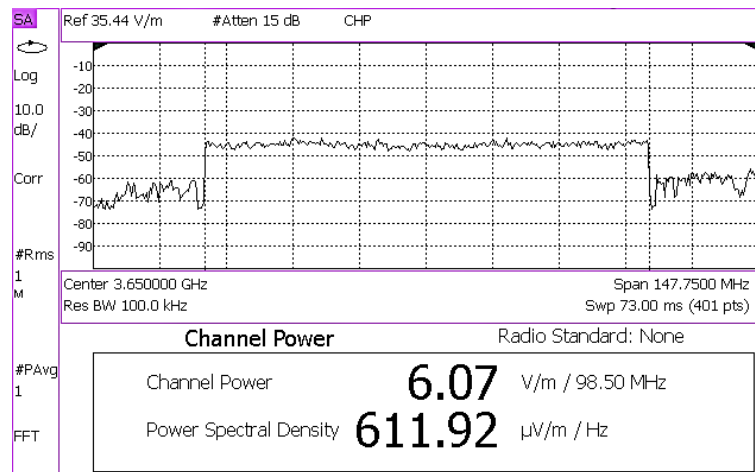
$$E_{5G}^{max} = \sqrt{12 \cdot N_{RB}} \cdot E_{RE,PDSCH} \quad (5.83)$$

Kako je iz izraza (5.83) vidljivo, ovakva metoda mjerenja ne uključuje ekstrapolacijske faktore F_{beam} i F_{TDD} budući da se izravno mjeri snaga podatkovnih podnositelja.

5.6. Kanalno mjerenje (frekvencijska domena)

Kanalno, tj. uskopojasno mjerenje provodi se u frekvencijskoj domeni poznavajući centralnu frekvenciju mjerenog izvora i širinu kanala. Posebnu pozornost treba posvetiti definiranju mjernih postavki, a jedna od najbitnijih stavki je širina rezolucijskog pojasa (RBW) koja ne smije biti šira od mjerenog kanala. Video-rezolucija (VBW) se obično postavlja na širinu od nekoliko širina RBW-a, primjerice $VBW = 3 \cdot RBW$. Vrijeme prebrisa ne smije biti kraće od trajanja radnog ciklusa mjernog kanala (što je izrazito bitno ukoliko se, primjerice, mjeri

impulsni izvor). Kanalnim mjerenjem može se mjeriti efektivna (eng. *Root Mean Square*, RMS) ili vršna vrijednost snage izvora (eng. *Peak Value*), a obično se bilježe najviša i prosječna izmjerena razina (slika 5.18).



Slika 5.18 Kanalno mjerenje 5G signala pri uspostavljenom podatkovnom prometu

Budući da zračena snaga 5G bazne stanice uvelike ovisi o opterećenosti (podatkovnom prometu), razina izloženosti dobivena trenutnim kanalnim mjerenjem u mjernoj točki može biti i znatno niža od teorijski najviše moguće. Najviša izloženost u mjernoj točki mogla bi se očekivati isključivo u slučaju da bazna stanica opskrbljuje samo jednog korisnika (u ovom slučaju mjeritelja) [24]. No, sa druge pak strane, upotreba aktivnih odašiljačkih antena čini gotovo nemogućim scenarij da najveća zračena snaga bude koncentrirana u jedan snop zračenja usmjeren prema korisniku duži vremenski period [25]. To potvrđuju i istraživanja koja navode kako je u 95% slučajeva opterećenje bazne stanice i nekoliko puta niže od najvećeg mogućeg [19], [20], [21], [22], [25]. Iz navedenog slijedi kako bi kanalno mjerenje bilo prikladnije u svrhu određivanja prosječnih razina izloženosti umjesto teorijski najviših mogućih razina.

5.7. Mjerenje prosječnih razina EM polja

U postojećim generacijama mobilne mreže (2G, 3G i 4G) mjerenjem se težilo dobiti najveće moguće razine EM polja u okolini baznih stanica. Takav pristup, promatrajući dugotrajno vrijeme izloženosti, dovodi do predimenzioniranja stvarnih razina EM polja. Ukoliko se takva mjerna metodologija preslika i na novu 5G tehnologiju, implementacija 5G baznih stanica

mogla bi biti usporena ili čak i neostvariva na nekim lokacijama. S obzirom na naprednu tehnologiju baznih stanica (MIMO sustav i formiranje snopova zračenja prema korisniku) prema [19] i [20] izloženost najvišim mogućim razinama EM polja čini se potpuno nerealističnom. Zbog toga se u nekim istraživanjima predlaže statistički pristup u određivanju stvarnih mogućih razina izloženosti EM polja [21], [22].

Mjerenje prosječnih razina EM polja moguće je primjenom demodulacije u kodnoj domeni, odnosno kanalnim mjerenjem u frekvencijskoj domeni na način da se umjesto najviših zabilježenih, razmatraju prosječne izmjerene razine polja.

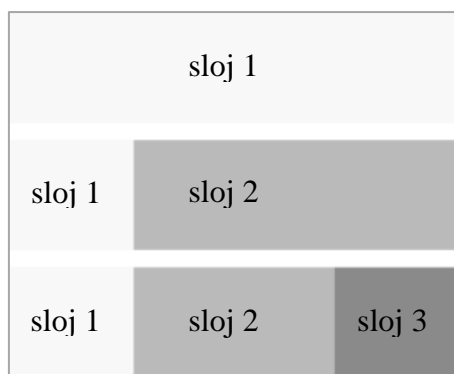
6. Dozimetrija unutarnjeg polja

Pod dozimetrijom unutarnjeg polja podrazumijeva se određivanje polja induciranih unutar tijela ili neke druge veličine koja proizlazi iz vanjskog polja. U gigahertznom frekvencijskom području najčešće se radi o gustoći apsorbirane snage, odnosno gustoći transmitirane snage.

6.1. Modeliranje tijela za proračun dozimetrije unutarnjeg polja

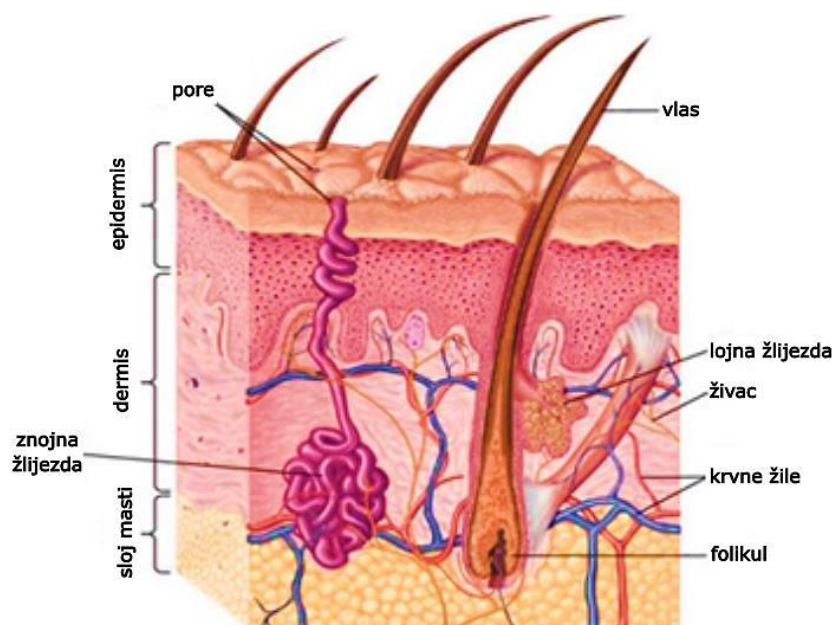
S obzirom na činjenicu kako EM polja u RF spektru utječu na povišenje temperature tijela izloženog zračenju, u istraživanju toplinskih učinaka posebna pozornost posvećena je modeliranju tijela, odnosno tkiva čovjeka. Analiza izloženosti ljudi poljima visokih frekvencija odnosi se na čitavo tijelo samo ako se čovjek nalazi dovoljno daleko od izvora zračenja, tj. u daljinskom polju pri čemu se mogu koristiti jednostavni modeli ljudskog tijela u obliku paralelepipeda ili cilindra. U bliskom pak polju izvora obično se analizira samo dio tijela izložen zračenju [64]. Osim modela (oblika) ljudskog tijela, potrebno je definirati dielektrična svojstva tkiva te debljinu pojedinog sloja. 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.

Pri toplinskom modeliranju u vremenskom području nerijetko se koristi metoda konačnih diferencija (eng. *Finite Difference Time Domain Method*, FDTD) [71], [72]. No, budući da FDTD u 3 dimenzije zahtijeva značajne računalne resurse, često se pribjegava alternativnoj, jednostavnijoj jednodimenzionalnoj (1D) varijanti [71]. 1D model prikladan je zbog činjenice da se difuzija topline odvija do svega nekoliko centimetara ispod površine kože, a predstavljen je poluvodljivom površinom izloženom upadnom ravnom valu. Može se, ovisno o zahtjevima istraživanja, modelirati kao jednoslojna ili višeslojna sredina [97] (slika 6.1).



Slika 6.1 Model jednoslojnog, dvoslojnog i troslojnog tkiva

Tkivo čovjeka sastoji se od slojeva kože, masti, mišića i kostiju [98]. Površina kože aproksimira se kao poluvodljiva ravna površina, a sastoji se od dva osnovna sloja: epidermisa i dermisa, a ponegdje se posebno izdvaja i sloj hipodermisa [66] (slika 6.2).



Slika 6.2 Struktura kože [44]

Apsorpcija EM energije ovisi o sadržaju vode pojedinog sloja tkiva. Dok rožnati sloj sadrži jako malo vode, sloj epidermisa i dermisa sadrže podjednaku količinu pa se često mogu razmatrati kao jedan, zajednički sloj. Prema [41] ukupni sadržaj vode unutar dermisa i epidermisa iznosi između 65 % i 70 %, dok hipodermis sadrži jako malo vode. Sadržaj vode u masnom tkivu može varirati, odnosno ovisi od osobe do osobe (životna dob, fiziološka kondicija i dr.) [66].

Neki od parametara potrebnih za modeliranje tkiva su frekvencijski ovisna relativna permitivnost, specifična vodljivost, specifična gustoća, debljina modeliranog sloja, geometrija

kože i sl. [43], [99]. Iako dielektrična svojstva tkiva nisu dovoljno istražena, mnogi se pozivaju na istraživanja nekoliko istaknutih znanstvenika na tu temu: Fostera, Ziskina, Gabrielea i Sasakija.

Posebna pozornost u mnogim istraživanjima dozimetrije unutarnjeg polja posvećena je upravo ispitivanju relativne permitivnosti tkiva koja je ovisna o sadržaju vode, a različiti slojevi kože i potkožnog tkiva sadrže različite količine vode. Uz permitivnost, usko je povezan i indeks loma (refrakcije) EM vala. Naime, prema [43] indeks refrakcije za pojedini sloj tkiva može se odrediti iz:

$$n_i = \sqrt{\varepsilon'_i - j\varepsilon''_i} \quad 6.1$$

gdje su ε'_i i ε''_i realni, odnosno imaginarni dio kompleksne permitivnosti:

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad 6.2$$

Prema Debyeovoj relaciji kompleksna permitivnost kože jednaka je:

$$\varepsilon_i^* = \varepsilon_{\infty i} + \frac{\Delta\varepsilon_i}{1 + j\omega\tau} + \frac{\sigma_i}{j\omega\varepsilon_0} \quad 6.3$$

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) [43], [66].

Dielektrična svojstva biološkog tkiva proizlaze iz interakcije EM polja s konstituentima na staničnoj, odnosno molekularnoj razini. Poznato je da relativna permitivnost tkiva može doseći vrijednosti i do 10^6 , odnosno 10^7 pri frekvencijama do 100 Hz, a povišenjem frekvencije relativna permitivnost opada [100]. Osim relativne permitivnosti, specifična vodljivost također je ovisna o frekvenciji te raste s porastom frekvencije [98].

Debljina kože je različita i ovisna o dijelu tijela koja se promatra. Prema [66] prosječna debljina epidermisa kod muškarca iznosi 0,141 mm, a kod žene 0,124 mm. Neke studije pak govore o debljini epidermisa između 0,1 mm i 0,7 mm, ovisno o dijelu tkiva [41]. 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 [66]. Druga istraživanja [101] navode debljinu epidermisa između 0,06 i 0,1 mm, a dermisa između 1,2 i 2,8 mm. U [41] 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.

6.2. Razina specifične apsorpcije (SAR) i gustoća transmitirane snage (TPD)

U frekvencijskom području ispod 6 GHz za kvantifikaciju izloženosti pogodno je promatrati razinu specifične apsorpcije (eng. *Specific Absorption Rate*, SAR) koja je jedna od osnovnih veličina definiranih za ograničenje izloženosti RF EM poljima [4], [5], [70]. Izračun SAR-a temelji se na modeliranju tkiva čovjeka u svrhu analize (mjerenjem ili proračunom) razine apsorbirane energije.

Proračun SAR-a spada u područje teorijske dozimetrije koju se obično naziva dozimetrijom unutarnjeg polja (eng. *Internal Field Dosimetry*) [64]. SAR se definira kao promjena disipirane snage u tkivu po jedinici mase uslijed zračenja te je proporcionalna porastu temperature [4], [5], [37], [64], [102]:

$$SAR = \frac{\partial P}{\partial m} = \frac{\partial}{\partial m} \frac{\partial W}{\partial t} = C \frac{\partial T}{\partial t} \quad (6.4)$$

gdje je C specifični toplinski kapacitet tkiva ($\frac{J}{kg \cdot K}$), T temperatura (K), a t vrijeme (s).

SAR, dakle, po definiciji predstavlja po masi usrednjenu disipiranu snagu. Drugim riječima, toplinski učinci visokofrekvencijskih EM polja mogu se kvantificirati preko gustoće snage Q_{EM} [65]:

$$Q_{EM} = \sigma \cdot |E|^2 \quad (6.5)$$

gdje je $[E]$ efektivna vrijednost električnog polja.

Gustoća snage Q_{EM} izravno je povezana sa SAR-om preko gustoće tkiva:

$$Q_{EM} = \rho \cdot SAR \quad (6.6)$$

odnosno:

$$SAR = \frac{\partial P}{\partial m} = \frac{\partial P}{\rho \partial V} = \frac{\sigma}{\rho} |E|^2 \quad (6.7)$$

gdje je E efektivna vrijednost jakosti unutarnjeg električnog polja $\left(\frac{V}{m}\right)$, ρ gustoća $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$, a σ specifična vodljivost tkiva $\left(\frac{S}{m}\right)$ iz čega proizlazi da je jedinica za SAR $\left(\frac{W}{kg}\right)$ [70].

Kako je istaknuto u [4], u svrhu izbjegavanja izloženosti potencijalno štetnim razinama EM polja u frekvencijskom području ispod 6 GHz, definira se:

1. SAR za cijelo tijelo (SAR_{WB}) i
2. SAR uprosječen po kubnoj masi od 10 g (SAR_{10g}).

SAR_{WB} usrednjava se prema ukupnoj tjelesnoj masi i opisuje razinu izloženosti cijelog tijela. Lokalna pak razina izloženosti određena je u vidu SAR-a uprosječenog po točno određenom dijelu mase koji u ovom slučaju iznosi 10 g [4], [102]. Iako je u prijašnjim sigurnosnim standardima (primjerice IEEE Std C95.1-1999) lokalni SAR uprosječen po masi od 1 g (SAR_{1g}), danas se više prikladnim smatra uprosječenje SAR-a po masi od 10 g [4], [5].

Za određivanje najgoreg slučaja izloženosti nužno je varirati definirane varijable koje značajno utječu na razinu SAR-a kao što su dimenzije tijela, parametri tkiva, parametri bazne stanice (frekvencija, izračena snaga, širina snopa zračenja, udaljenost i dr.) [103].

Širina snopa zračenja bazne stanice (antene) uvelike utječe na razinu apsorbirane energije, odnosno na razinu SAR-a. Pa će tako uži snop zračenja rezultirati višom razinom SAR-a. Također, manji volumen tijela rezultirat će višom razinom SAR_{WB} -a. U zoni zračećeg bliskog polja propagacija EM vala cilindričnog je oblika te gustoća snage opada proporcionalno udaljenosti od izvora. U zoni daljinskog polja izvora propagacija EM vala sfernog je oblika, a gustoća transmitirane snage opada sa kvadratom udaljenosti što izravno utječe na razinu SAR-a [37].

U vezu sa SAR-om često se dovodi promjena temperature tkiva, odnosno tijela, što se može predstaviti Pennesovom biotoplinskom jednadžbom [39], [104]:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k\nabla T) + w_b c_b (T_a - T) + q_m + \rho SAR \quad (6.8)$$

gdje je c specifični toplinski koeficijent tkiva, k specifična toplinska vodljivost, T_a arterijska temperatura, $w_b c_b$ produkt volumne brzine perfuzije i specifičnog toplinskog kapaciteta krvi, a q_m gustoća toplinskih izvora uslijed metaboličkih procesa.

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, što se daje izraziti preko rubnog uvjeta na površini kože [105]:

$$-k \frac{dT_{koža}}{dz} = h(T_{koža} - T_{zrak}) \quad (6.9)$$

gdje je z normala na površinu, a h konvekcijski toplinski koeficijent.

Promjena temperature na površini kože ovisi dakle o parametrima kao što su prokrvljenost, toplinska vodljivost te koeficijent prijenosa (prolaska) topline. Veća prokrvljenost dovodi do pojačanog efekta hlađenja na što dodatno utječu i veća vodljivost 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 [106].

Dozimetrijska veličina koja se koristi u ovom radu je gustoća transmitirane snage (eng. *Transmitted Power Density*, TPD). Ova dozimetrijska veličina donekle predstavlja alternativu za gustoću apsorbirane snage (S_{ab}) koja je prema ICNIRP-u relevantna za izloženost zračenju pri frekvencijama višim od tranzijentne frekvencije od 6 GHz. Naime, kako je već istaknuto, pri višim frekvencijama ($f > 6$ GHz) umjesto promjene temperature u volumenu tkiva, prikladnije je razmatrati zagrijavanje na samoj površini tkiva, budući da pri višim frekvencijama dubina penetracije EM energije eksponencijalno opada.

TPD se definira relacijom [46]:

$$TPD = \int_0^r \sigma |E(\vec{r})|^2 dr \quad (6.10)$$

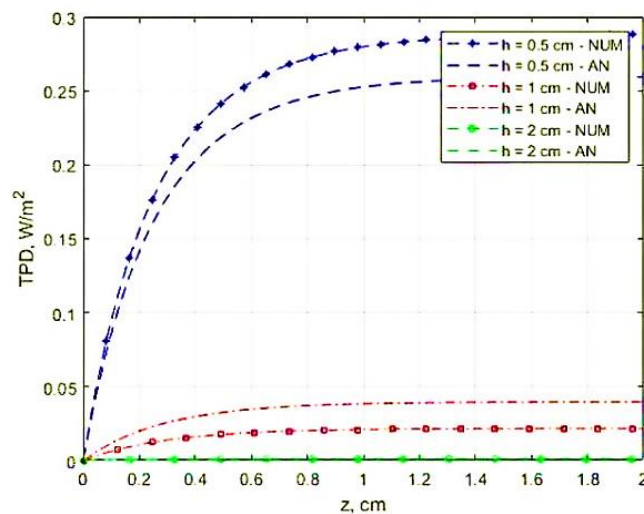
gdje je $E(\vec{r})$ efektivna vrijednost električnog polja, a mjerna jedinica za TPD je $\frac{W}{m^2}$.

Prema izrazima 6.7 i 6.10 slijedi:

$$TPD = \rho \int_0^z SAR dz \quad (6.11)$$

gdje je z dubina tkiva [47].

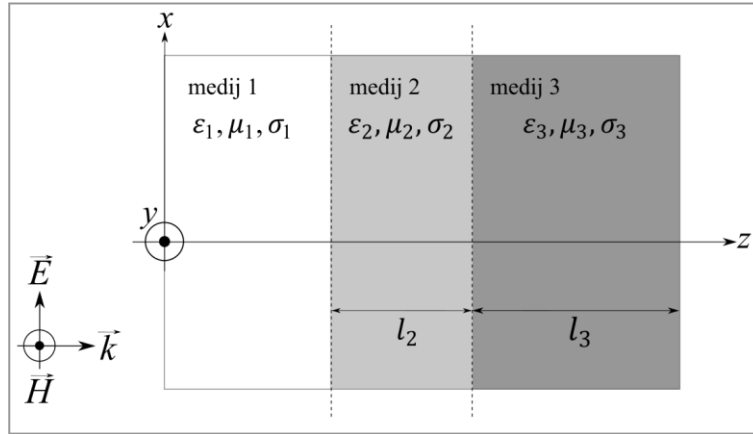
Budući da SAR ima tendenciju eksponencijalnog pada s obzirom na dubinu tkiva, za očekivati je kako veličina TPD u jednom dijelu tkiva dopijeva u zasićenje zbog ograničenog prodora EM u tkivo pri visokim frekvencijama kako je vidljivo sa slike 6.3 [47].



Slika 6.3 Analitički (AN) i numerički (NUM) rezultati za TPD na dubini tkiva (z) pri frekvenciji od 6 GHz [47]

6.3. Određivanje SAR-a i TPD-a u dvoslojnom tkivu

U ovoj disertaciji razvijena je analitička metoda izračuna TPD-a unutar dvoslojnog vodljivog tkiva opisanog relativnom permitivnosti, specifičnom vodljivošću i debljinom slojeva kako je prikazano na slici 6.4.



Slika 6.4 Dvoslojno tkivo izloženo upadnom EM valu

Pretpostavljeno je da upadno polje dolazi iz zraka (medij 1, $\mu_1 = 1$, $\varepsilon_1 = 1$, $\sigma_1 = 0$) okomito. Prvi sloj tkiva (medij 2) predstavlja kožu debljine l_2 , relativne permitivnosti ε_2 i specifične vodljivosti σ_2 . Potkožno tkivo (medij 3) predstavljeno je slojem masti, odnosno slojem mišića ($l_3, \varepsilon_3, \sigma_3$). Stohastička kolokacija iskorištena je kako bi se nesigurnosti ulaznih varijabli propagirale na izlaznu veličinu, odnosno izračun TPD-a. U konačnici, izračunata je srednja vrijednost i interval pouzdanosti TPD-a, a analizom osjetljivosti (ANOVA) istražena je razina utjecaja ulaznih veličina.

Refleksijski koeficijent proizlazi iz dielektričnih svojstava tkiva, oblika površine tijela, kuta incidencije te polarizacije upadnog EM vala. Korisno je istaknuti kako se pri TE (transverzalnom električnom) upadnom valu najviša transmisija događa pri kutu okomitom na upadnu površinu. Pri TM upadnom valu najviša transmisija događa se pri tzv. Brewsterovom kutu upada [4].

Električno polje iznad površine tkiva (medij 1) sastoji se od upadnog polja i polja reflektiranog od tkiva:

$$E_1 = E_1^+ \cdot e^{-j\gamma_1 z} + E_1^- \cdot e^{j\gamma_1 z} \quad (6.12)$$

gdje su E_1^+ i E_1^- amplitude upadne, odnosno reflektirane komponente EM polja, γ_1 kompleksna konstanta propagacije u vakuumu ($\gamma = \sqrt{j\omega\mu\sigma - \omega^2\mu\varepsilon}$), a z pretpostavljeni smjer širenja vala.

Analogno vrijedi i za površinsko tkivo (*medij 2*), odnosno potkožno tkivo (*medij 3*)

$$E_2 = E_2^+ \cdot e^{-j\gamma_2 z} + E_2^- \cdot e^{j\gamma_2 z} \quad (6.13)$$

$$E_3 = E_3^+ \cdot e^{-j\gamma_3 z} \quad (6.14)$$

Indeksi "+" označavaju amplitude upadnog i polja transmitiranog u medije 2 i 3, odnosno indeksi "-" amplitude polja reflektiranih na granicama medija 1 i 2, odnosno 2 i 3.

Izrazi za magnetsko polje u odgovarajućim sredinama su:

$$H_1 = \frac{E_1^+}{Z_1} \cdot e^{-j\gamma_1 z} - \frac{E_1^-}{Z_1} \cdot e^{j\gamma_1 z} \quad (6.15)$$

$$H_2 = \frac{E_2^+}{Z_2} \cdot e^{-j\gamma_2 z} - \frac{E_2^-}{Z_2} \cdot e^{j\gamma_2 z} \quad (6.16)$$

$$H_3 = \frac{E_3^+}{Z_3} \cdot e^{-j\gamma_3 z} \quad (6.17)$$

gdje Z_i predstavlja impedanciju i -te sredine.

Na granici dviju sredina m, n moraju biti ispunjeni uvjeti kontinuiranosti tangencijalnih komponenti polja pa slijedi:

$$\vec{n} \times (\vec{E}_m - \vec{E}_n) = 0 \quad (6.18)$$

$$\vec{n} \times (\vec{H}_m - \vec{H}_n) = 0 \quad (6.19)$$

Stoga na granici medija 1 i 2 ($z = 0$) vrijedi:

$$E_1 = E_2 \quad (6.20)$$

i:

$$H_1 = H_2 \quad (6.21)$$

Analogno vrijedi i za granicu između medija 2 i 3 ($z = l$):

$$E_2 = E_3 \quad (6.22)$$

i:

$$H_2 = H_3 \quad (6.23)$$

Iz izraza 6.20 i 6.21 te uvjeta $z = 0$ slijedi da je:

$$E_1^+ + E_1^- = E_2^+ + E_2^- \quad (6.24)$$

$$\frac{E_1^+}{Z_1} + \frac{E_1^-}{Z_1} = \frac{E_2^+}{Z_2} - \frac{E_2^-}{Z_2} \quad (6.25)$$

Analogno iz izraza 6.22 i 6.23 te uvjeta $z = l$ slijedi da je:

$$E_2^+ \cdot e^{-\gamma_2 l} + E_2^- \cdot e^{\gamma_2 l} = E_3^+ \cdot e^{-\gamma_3 l} \quad (6.26)$$

$$\frac{E_2^+}{Z_2} \cdot e^{-\gamma_2 l} + \frac{E_2^-}{Z_2} \cdot e^{\gamma_2 l} = \frac{E_3^+}{Z_3} \cdot e^{\gamma_3 l} \quad (6.27)$$

Sada se kombinacijom izraza 6.26 i 6.27 dobije:

$$E_2^+ \cdot e^{-\gamma_2 l} + E_2^- \cdot e^{\gamma_2 l} = \frac{Z_3}{Z_2} \cdot E_2^+ \cdot e^{-\gamma_2 l} + \frac{Z_3}{Z_2} \cdot E_2^- \cdot e^{\gamma_2 l} \quad (6.28)$$

Sređivanjem izraza 6.28 slijedi:

$$E_2^+ = E_2^- \cdot \frac{Z_3 + Z_2}{Z_3 - Z_2} \cdot e^{2\gamma_2 l} \quad (6.29)$$

Izraz 6.28 može se sada kombinirati s izrazom 6.24 te uz uvjet $E_1^+ = E_0$, gdje je E_0 vanjsko (upadno) polje, slijedi:

$$E_0 + E_1^- = E_2^- \cdot \frac{Z_3 + Z_2}{Z_3 - Z_2} \cdot e^{2\gamma_2 l} + E_2^- \quad (6.30)$$

Sređivanjem izraza 6.30 konačno se dobije:

$$E_2^- = E_0 \cdot \frac{2 \cdot Z_2 \cdot (Z_3 - Z_2)}{(Z_1 + Z_2) \cdot (Z_3 + Z_2) \cdot e^{2\gamma_2 l} + (Z_3 - Z_2) \cdot (Z_2 - Z_1)} \quad (6.31)$$

Uvrštavanjem izraza 6.30 u 6.29 slijedi:

$$E_2^+ = E_0 \cdot \frac{Z_3 + Z_2}{Z_3 - Z_2} \cdot e^{\gamma_2 l} \cdot \frac{2 \cdot Z_2 \cdot (Z_3 - Z_2)}{(Z_1 + Z_2) \cdot (Z_3 + Z_2) \cdot e^{2\gamma_2 l} + (Z_3 - Z_2) \cdot (Z_2 - Z_1)} \quad (6.32)$$

Nakon sređivanja izraza 6.32 dobije se:

$$E_2^+ = E_0 \cdot \frac{2 \cdot Z_2 \cdot (Z_3 + Z_2)}{(Z_1 + Z_2) \cdot (Z_3 + Z_2) + (Z_3 - Z_2) \cdot (Z_2 - Z_1) \cdot e^{-2\gamma_2 l}} \quad (6.33)$$

Sada se izrazi 6.30 i 6.32 mogu vratiti u izraz 6.26 pa slijedi:

$$\begin{aligned} E_2^+ \cdot e^{-\gamma_2 l} &= \\ &= E_0 \cdot \frac{2 \cdot Z_2 \cdot (Z_3 + Z_2)}{(Z_1 + Z_2) \cdot (Z_3 + Z_2) + (Z_3 - Z_2) \cdot (Z_2 - Z_1) \cdot e^{-2\gamma_2 l}} \cdot e^{-\gamma_2 l} + E_0 \\ &\cdot \frac{2 \cdot Z_2 \cdot (Z_3 - Z_2)}{(Z_1 + Z_2) \cdot (Z_3 + Z_2) \cdot e^{2\gamma_2 l} + (Z_3 - Z_2) \cdot (Z_2 - Z_1)} \cdot e^{\gamma_2 l} \end{aligned} \quad (6.34)$$

Sređivanjem izraza 6.34 dobije se:

$$E_3^+ = E_0 \cdot \frac{4 \cdot Z_2 \cdot Z_3 \cdot e^{-(\gamma_2 - \gamma_3)l}}{(Z_1 + Z_2) \cdot (Z_3 + Z_2) + (Z_3 - Z_2) \cdot (Z_2 - Z_1) \cdot e^{-2\gamma_2 l}} \quad (6.35)$$

Preostalo je još izvesti konačan zapis za E_1^- pa se u izraz 6.24 mogu uvrstiti izrazi 6.31 i 6.33:

$$\begin{aligned} E_0 + E_1^- &= E_0 \cdot \frac{2 \cdot Z_2 \cdot (Z_3 + Z_2)}{(Z_1 + Z_2) \cdot (Z_3 + Z_2) + (Z_3 - Z_2) \cdot (Z_2 - Z_1) \cdot e^{-2\gamma_2 l}} + E_0 \\ &\cdot \frac{2 \cdot Z_2 \cdot (Z_3 - Z_2)}{(Z_1 + Z_2) \cdot (Z_3 + Z_2) \cdot e^{2\gamma_2 l} + (Z_3 - Z_2) \cdot (Z_2 - Z_1)} \end{aligned} \quad (6.36)$$

Sređivanjem se konačno dobije:

$$E_1^- = E_0 \cdot \frac{(Z_2 + Z_3) \cdot (Z_2 - Z_1) + (Z_3 - Z_2) \cdot (Z_2 + Z_1) \cdot e^{-2\gamma_2 l}}{(Z_1 + Z_2) \cdot (Z_2 + Z_3) + (Z_3 - Z_2) \cdot (Z_2 - Z_1) \cdot e^{-2\gamma_2 l}} \quad (6.37)$$

Nakon dobivenih konačnih izraza za sve pripadajuće komponente električnih polja, može se pristupiti izračunu dozimetrijskih veličina (SAR-a i TPD-a) u pojedinom sloju tkiva (mediju):

$$SAR(z) = \frac{\sigma(z)}{\rho(z)} \cdot |E(z)|^2 \quad (6.38)$$

odnosno TPD iz:

$$TPD(z) = \int_0^{z_{end}} \rho(z) SAR(z) dz \quad (6.39)$$

gdje z_{end} predstavlja dubinu tkiva do koje se vrši integracija (l_2 , odnosno $l_2 + l_3$).

Za površinski sloj kože (medij 2) slijedi:

$$SAR_2 = \frac{\sigma_2}{\rho_2} |E_2|^2 \quad (6.40)$$

Uvrštavanjem izvedenih izraza za E_2^+ i E_2^- u 6.40 slijedi:

$$\begin{aligned} SAR_2 &= \\ &= \frac{\sigma_2}{\rho_2} \cdot E_0^2 \cdot \left| \frac{2 \cdot Z_2 \cdot (Z_3 + Z_2)}{(Z_1 + Z_2) \cdot (Z_3 + Z_2) + (Z_3 - Z_2) \cdot (Z_2 - Z_1) \cdot e^{-2\gamma_2 l}} \cdot e^{-\gamma_2 z} \right. \\ &\quad \left. + \frac{2 \cdot Z_2 \cdot (Z_3 - Z_2)}{(Z_1 + Z_2) \cdot (Z_3 + Z_2) \cdot e^{2\gamma_2 l} + (Z_3 - Z_2) \cdot (Z_2 - Z_1) \cdot e^{\gamma_2 z}} \right|^2 \end{aligned} \quad (6.41)$$

Prema 6.41 slijedi:

$$\begin{aligned} TPD_2 &= \\ &= \sigma_2 \cdot E_0^2 \cdot \\ &\cdot \int_0^l \left| \frac{2 \cdot Z_2 \cdot (Z_3 + Z_2)}{(Z_1 + Z_2) \cdot (Z_3 + Z_2) + (Z_3 - Z_2) \cdot (Z_2 - Z_1) \cdot e^{-2\gamma_2 l}} \cdot e^{-\gamma_2 z} \right. \\ &\quad \left. + \frac{2 \cdot Z_2 \cdot (Z_3 - Z_2)}{(Z_1 + Z_2) \cdot (Z_3 + Z_2) \cdot e^{2\gamma_2 l} + (Z_3 - Z_2) \cdot (Z_2 - Z_1) \cdot e^{\gamma_2 z}} \right|^2 dz \end{aligned} \quad (6.42)$$

Za slučaj potkožnog tkiva (medij 3) vrijedi:

$$SAR_3 = \frac{\sigma_3}{\rho_3} |E_3|^2 \quad (6.43)$$

odnosno:

$$\begin{aligned} SAR_3 &= \frac{\sigma_3}{\rho_3} \cdot E_0^2 \cdot \left| \frac{4 \cdot Z_2 \cdot Z_3 \cdot e^{-(\gamma_2 - \gamma_3)l}}{(Z_1 + Z_2) \cdot (Z_3 + Z_2) + (Z_3 - Z_2) \cdot (Z_2 - Z_1) \cdot e^{-2\gamma_2 l}} \right. \\ &\quad \left. \cdot e^{-j\gamma_3 z} \right|^2 \end{aligned} \quad (6.44)$$

Analogno izrazu 6.42 za medij 3 izraz za TPD glasi:

$$\begin{aligned}
 TPD_3 &= TPD_2 + \sigma_3 \cdot E_0^2 \\
 &\cdot \int_l^z \left| \frac{4 \cdot Z_2 \cdot Z_3 \cdot e^{-(\gamma_2 - \gamma_3)l}}{(Z_1 + Z_2) \cdot (Z_3 + Z_2) + (Z_3 - Z_2) \cdot (Z_2 - Z_1) \cdot e^{-2\gamma_2 l}} \right. \\
 &\cdot \left. e^{-2\gamma_3 z} \right|^2 dz
 \end{aligned} \tag{6.45}$$

Ovakav jednostavan, deterministički pristup može se proširiti i na model tkiva koji sadrži više od dva sloja.

7. Stohastičko modeliranje

7.1. Kvantifikacija nesigurnosti

Stohastičkim modeliranjem uzima se u obzir nesigurnost ulaznih parametara u analizi dozimetrije upadnog i unutarnjeg polja.

Kvantifikacijom nesigurnosti daje se uvid u pouzdanost i odstupanje dobivenih rezultata od interesa. Kvantifikacija nesigurnosti izlazne veličine od interesa zasniva se na dva osnovna koraka:

- kvantifikacija nesigurnosti ulaznih varijabli i
- propagacija nesigurnosti od ulaznih varijabli do izlazne veličine.

Propagacija nesigurnosti označava izbor i implementaciju stohastičke metode kojom se rješava stohastički model [107].

Prvi korak u stohastičkom dijelu analize je modeliranje ulaznih varijabli γ koje su zapravo elementi funkcije čiji se izračun traži:

$$\gamma = [\gamma^1, \gamma^2, \dots, \gamma^n] \quad (7.1)$$

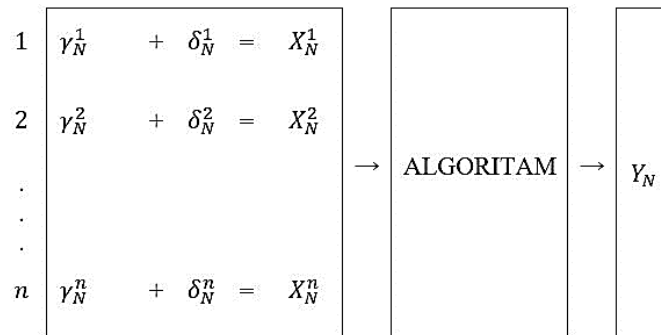
gdje je n ukupan broj ulaznih varijabli (parametara).

Primjerice, u modelu proračuna razina EM polja ulazne varijable od interesa mogu biti visina antene, dielektrična svojstva podloge iznad koje se događa refleksija EM vala i sl. Svaka ulazna varijabla X može se prikazati preko srednje vrijednosti γ i mogućeg odstupanja δ , uz danu vjerojatnost pojavljivanja:

$$X_N^n = \gamma_N^n + \delta_N^n \quad (7.2)$$

Time se nesigurnost ulaznih varijabli propagira do izlazne veličine od interesa.

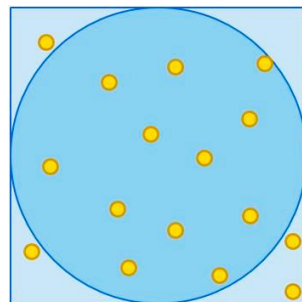
Pretpostavka je da su ulazne varijable međusobno neovisne. Za svaki skup ulaznih varijabli N izvodi se proračun kojim se generira po jedna izlazna varijabla. Ukupan broj izlaznih varijabli odgovara ukupnom broju ulaznih varijabli (slika 7.1).



Slika 7.1 Dijagram izvođenja proračuna jakosti električnog polja u ovisnosti o ulaznim varijablama

Stohastički momenti izlaznih vrijednosti (srednja vrijednost, odnosno očekivanje, varijanca i standardna devijacija) mogu se računati pomoću dviju stohastičkih metoda: Monte Carlo (MC) i stohastička kolokacija (eng. *Stochastic Collocation*, SC).

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 [108]. Monte Carlo relativno je jednostavna metoda zasnovana na statističkoj analizi velikog broja determinističkih slučajeva, a služi za rješavanje različitih problema u matematici, fizici, kemiji, financijama i dr. Najjednostavnije se ova metoda može objasniti kroz primjer aproksimacije broja π [109]. Naime, ako unutar kvadrata duljine stranica $2r$ umetnemo krug promjera $2r$, dobit ćemo dva geometrijska lika kao na slici 7.2.



Slika 7.2 Primjer aproksimacije broja π Monte Carlo metodom

Površina kvadrata jednaka je $A_{\square} = 4r^2$, a površina kruga $A_{\circ} = r^2\pi$ 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:

$$\frac{\pi}{4} = \frac{\text{broj točaka unutar kruga}}{\text{ukupan broj točaka}} \quad (7.3)$$

S dovoljnim brojem točaka mogli bismo približno odrediti broj π :

$$\pi = 4 \cdot \frac{\text{broj točaka unutar kruga}}{\text{ukupan broj točaka}} \quad (7.4)$$

Srednja vrijednost i varijanca izlazne veličine od interesa određuju se iz relacija [50]:

$$\mu(Y) \approx \frac{1}{N_{MC}} \sum_{i=1}^{N_{MC}} Y_i \quad (7.5)$$

$$V(Y) \approx \frac{1}{N_{MC} - 1} \sum_{i=1}^{N_{MC}} (Y_i - \mu)^2 \quad (7.6)$$

gdje je N_{MC} ukupan broj determinističkih slučajeva, a Y_i i -ta realizacija determinističkog slučaja.

Konvergencija MC metode ne ovisi o stohastičkoj dimenzionalnosti već isključivo o ukupnom broju determinističkih slučajeva, odnosno ukupnom broju realizacija. Stoga broj determinističkih slučajeva nerijetko treba biti reda 10^4 ili viši, što može predstavljati problem u vidu dugog vremena izračuna.

MC metoda dosta se često primjenjuje u analizi nesigurnosti. Primjerice, u [49] istražen je utjecaj elektromagnetskih polja na djecu i odrasle osobe u pogledu povišenja tjelesne temperature. Pri tome, ispitan je 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.

Stohastička kolokacija u svojoj osnovi vrlo je bliska MC metodi. Karakterizira ju jednostavnost implementacije, a zasniva se na metodi uzorkovanja, odnosno ponavljanju simulacijskog algoritma određeni broj puta s promijenjenim vrijednostima ulaznih parametara [110]. SC metoda počiva na polinomnoj aproksimaciji izlazne varijable za N ulaznih parametara pri čemu se unaprijed definira broj tzv. kolokacijskih točaka.

Izlazna varijabla definirana je pomoću relacije [50]:

$$\hat{Y}(\mathbf{X}) = \sum_{i=1}^{N_{SC}} L_i(\mathbf{X}) \cdot Y^{(i)} \quad (7.7)$$

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

Ako se broj uzoraka u jednoj dimenziji označi s n (Gauss-Legendre quadrature points), ukupan broj simulacijskih točaka, a time i broj izlaznih determinističkih uzoraka jednak je:

$$N_{SC} = n^4 \quad (7.8)$$

Srednja vrijednost, odnosno varijanca izlazne varijable određuju se iz relacija [50]:

$$\mu(Y) \approx \sum_i^n Y_i \cdot \omega_i \quad (7.9)$$

$$V(Y) \approx \sum_i^n (Y_i)^2 \cdot \omega_i - \mu^2(Y) \quad (7.10)$$

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

$$\omega_i = \int_{\mathbf{X}} L_i(\mathbf{X}) \cdot pdf(\mathbf{X}) d\mathbf{X} \quad (7.11)$$

gdje $pdf(\mathbf{X})$ označava funkciju gustoće vjerojatnosti (eng. *Probability Density Function*, PDF).

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

Iz rezultata dobivenih MC i SC metodom može se odrediti standardna devijacija koja je potrebna u određivanju intervala pouzdanosti izlazne veličine od interesa. Neovisno o stohastičkoj metodi, standardna devijacija jednaka je drugom korijenu varijance:

$$\sigma_Y = \sqrt{V(Y)} \quad (7.12)$$

Kada se govori o intervalu pouzdanosti, posebno je zanimljivo promotriti dvostruku, odnosno trostruku standardnu devijaciju koja daje interval pouzdanosti u iznosu od 95 %, odnosno 99 %:

$$CI = \mu(Y) \pm 2\sigma_Y \quad (7.13)$$

$$CI = \mu(Y) \pm 3\sigma_Y \quad (7.14)$$

Analizom 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 skupova ulaznih varijabli.

7.2. Analiza osjetljivosti

U svrhu procjene utjecaja svakog od ulaznih parametara (varijabli) na izlaznu veličinu od interesa, odnosno na širinu intervala pouzdanosti, provodi se analiza osjetljivosti.

Jedan od jednostavnijih pristupa je tzv. "*One-At-a-Time*" (OAT) pri kojem se ispituju jednodimenzionalni slučajevi, odnosno varijance svake od ulaznih varijabli. Dakle, mijenja se samo po jedna varijabla na ulazu dok se ostale varijable uzimaju kao konstante vrijednosti. Osim vrijednosti varijanci, mogu se dakako ispitivati i vrijednosti standardnih devijacija.

Prednost OAT pristupa svakako je omogućavanje brzog rangiranja parametara s obzirom na iznos varijanci, odnosno standardnih devijacija. Kada se vrijednosti varijanci određuju pri stohastičkoj kolokaciji (SC), OAT metoda prilično je brza i jednostavna, u usporedbi sa MC stohastičkom metodom. Naime, kod SC metode pri jednodimenzionalnim slučajevima zahtijeva se samo nekoliko determinističkih vrijednosti dok MC metoda uvijek podrazumijeva ukupan broj simulacija (N_{MC}) [58].

Međutim, OAT metoda ne može pružiti informaciju o skupnom utjecaju dviju ili više ulaznih varijabli na izlaznu veličinu. Stoga se uz OAT često koristi i tzv. analiza varijance (eng. *Analysis of Variance*, ANOVA). ANOVA se temelji na izračunu Sobolovg indeksa, a pruža informaciju o skupnom utjecaju dvije ili više ulaznih varijabli. Osim toga, moguće je dobiti i informaciju o utjecaju pojedinog parametra u interakciji sa svim ostalim ulaznim parametrima [50].

Indeks prvog reda $S_1(X_k)$ pokazuje pojedinačni utjecaj ulazne varijable k na ukupnu varijancu višedimenzionalnog stohastičkog modela [111]:

$$S_1(X_k) = \frac{V_{X_k}[\mu_{X \sim k}(Y|X_k)]}{V[Y|(X_1, X_2, \dots, X_d)]} \quad (7.15)$$

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

gdje znak " \sim " označava "sve osim", a X_k ulaznu varijablu. $\mu_{X \sim k}(Y|X_k)$ označava srednju vrijednost (očekivanje) izlazne veličine od interesa. Naime, takvih je $n - 1$ očekivanja, a k -ti ulazni parametar održava se na konstantnoj vrijednosti. Nakon izračuna $n - 1$ srednjih vrijednosti računa se njihova varijanca V_{X_k} . Izraz $V[Y|(X_1, X_2, \dots, X_d)]$ pak označava varijancu za n -dimenzionalni slučaj (ukupnu varijancu).

Indeks drugog reda $S_2(X_i, X_j)$ pokazuje zbirni utjecaj ulaznih varijabli i i j [50]:

$$S_2(X_i, X_j) = \frac{V_{X_i X_j}[\mu_{X \sim i, j}(Y|X_i, X_j)] - V_{X_i}[\mu_{X \sim i}(Y|X_i)] - V_{X_j}[\mu_{X \sim j}(Y|X_j)]}{V[Y|(X_1, X_2, \dots, X_d)]} \quad (7.16)$$

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

Indeksi višeg reda ($S_3(X_k)$, $S_4(X_k)$, ...) mogu predstavljati složeni računski problem stoga je nerijetko prikladno izračunati ukupni indeks osjetljivosti $S_T(X_k)$ varijable k u interakciji sa svim ostalim varijablama [111]:

$$S_T = 1 - \frac{V_{X \sim k}[\mu_{X_k}(Y|X \sim k)]}{V[Y|(X_1, X_2, \dots, X_d)]} \quad (7.17)$$

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

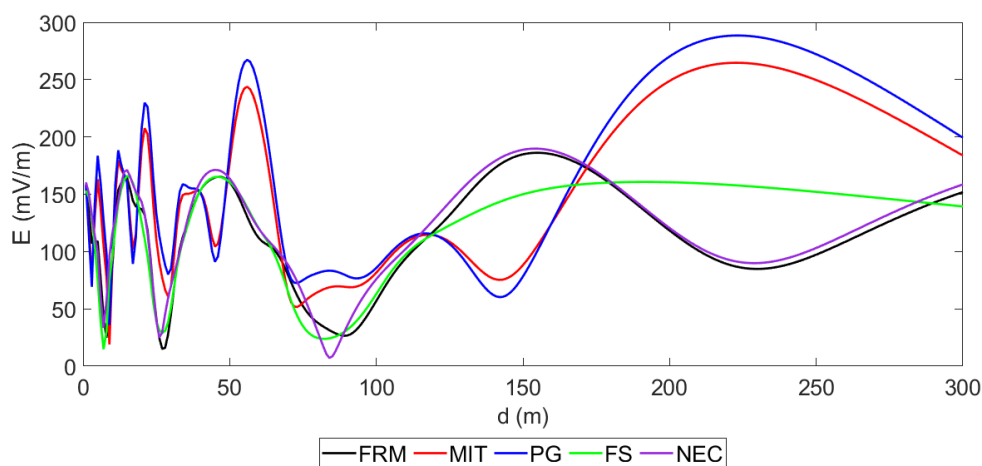
Korisno je izdvojiti poseban slučaj analize osjetljivosti kada vrijedi $S_1(X_k) = ST$ koji predstavlja beznačajan utjecaj interakcije pojedine varijable X_k sa svim ostalim varijablama. U protivnom, potrebno je ispitivati indekse višeg reda ($S_2(X_k)$, $S_3(X_k)$, ...) kako bi se odredio utjecaj pojedine varijable u interakciji s ostalim ulaznim parametrima na izlaznu veličinu.

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 [51].

8. Rezultati

8.1. Deterministički slučajevi proračuna razina EM polja

Jednostavnim analitičkim metodama moguće je proračunati razine EM polja u okolini bazne stanice. Kako je u prethodnim poglavljima već opisano, razine polja mogu se računati uz aproksimaciju slobodnog prostora koja u obzir uzima isključivo direktni snop zračenja zanemarujući komponente EM polja reflektirane od podloge ili okolnih objekata. Također, u obzir se može uzeti i refleksija od podloge koja može biti idealno ili konačno vodljiva. Na idealno vodljivoj podlozi komponenta EM polja koja pada na tlo u potpunosti se reflektira pri čemu je faktor refleksije jednak 1. U realističnijem slučaju podloga je homogena/nehomogena konačno vodljiva sredina, a uz poznavanje vodljivosti, permitivnosti i debljine slojeva zemlje moguće je izračunati refleksijske koeficijente pomoću različitih metoda (Fresnelova aproksimacija za ravni val, modificirana metoda preslikavanja i dr.). S obzirom da se za proračun razina EM polja najčešće primjenjuje pojednostavnjena aproksimacija slobodnog prostora, od interesa je uzeti u obzir reflektirano polje te utjecaj pojedinih varijabli uključenih u proračun polja. U tu svrhu razmatra se dvoslojna podloga iznad koje dolazi do refleksije EM vala, a refleksijski koeficijent dobiven je primjenom dva postupka opisana u poglavlju 5.1. Modeli proračuna polja validirani su usporedbom s rezultatima dobivenim simulacijom u *Numerical Electromagnetics Codu* (NEC) [55], [56], [112], (slika 8.1).



Slika 8.1 Usporedba metoda proračuna i simulacije raspodjele električnog polja korištenjem NEC-a za slučaj $\epsilon_1 = 10$, $\sigma_1 = 0,01 \text{ S/m}$, i $A_h = 20 \text{ m}$ [55], [56], [112]

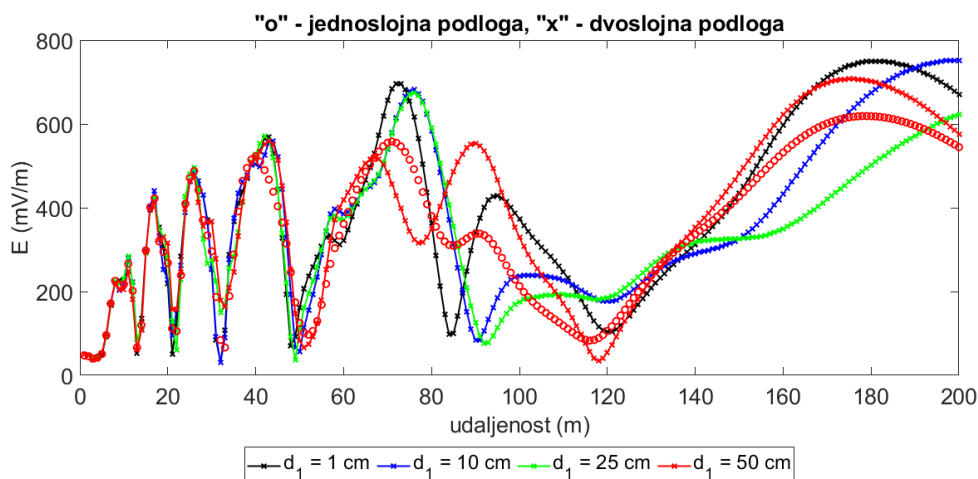
Za jednostavni deterministički slučaj izračuna jakosti EM polja pretpostavljen je antenski sustav koji se sastoji od 8 dipola ukupne duljine 2 m, postavljen na antenski stup na visini od 20 m iznad tla. Pretpostavljeno je da antena odašilje EM val frekvencije 936,8 MHz snagom od 1000 W. S obzirom na valnu duljinu i dimenziju antene, prema tablici 4.1 iz poglavlja 4, ustanovljena je zona daljinskog polja, a razine električnog polja izračunate su u rasponu od 0 m do 200 m od podnožja antenskog stupa s korakom od 1 m, na visini od 2 m iznad tla.

Slojevi podloge iznad koje se događa refleksija opisani su parametrima prikazanim u tablici 8.1.

Tablica 8.1 Karakteristike modelirane dvoslojne podloge

σ_1 (mS/m)	1	10	100	1000
ε_1	5	10	20	50
d_1 (cm)	1	10	25	50
σ_2 (mS/m)	50			
ε_2	4			

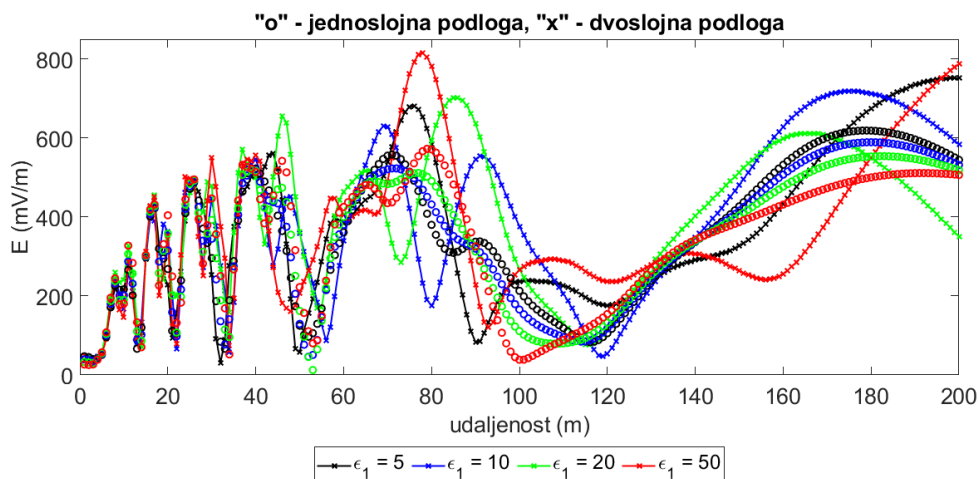
Prvi skup prikazanih rezultata dobiven je uz Fresnelov koeficijent refleksije za ravni val (FRM). Na slici 8.2 prikazano je ukupno električno polje u ovisnosti o debljini prvog sloja tla. Ostali ulazni parametri su: $\sigma_1 = 1$ mS/m, $\varepsilon_1 = 5$, $\sigma_2 = 50$ mS/m i $\varepsilon_2 = 4$.



Slika 8.2 Utjecaj debljine gornjeg sloja podloge na ukupnu razinu polja pri FRM metodi izračuna refleksijskog koeficijenta

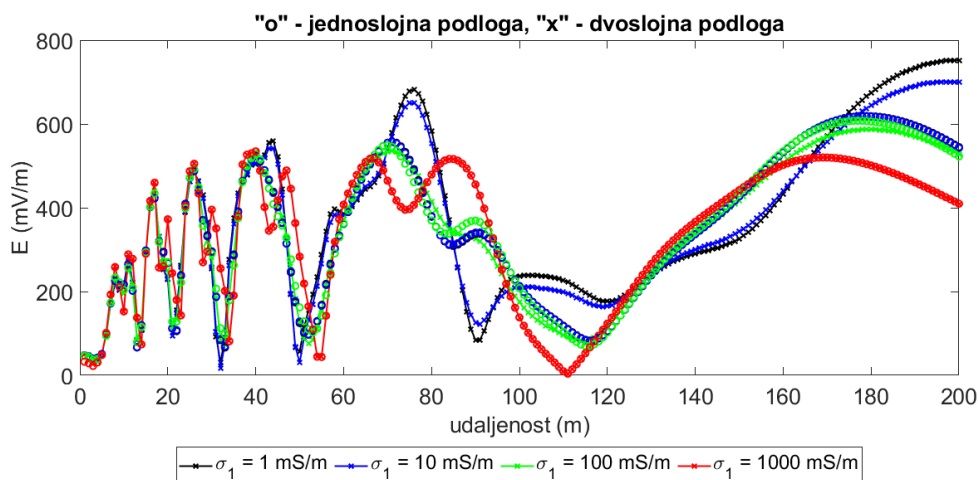
Zanimljivo je uočiti kako već pri debljini gornjeg sloja podloge u iznosu od 1 cm reflektirajuća podloga može značajno utjecati na ukupnu razinu polja, što je posebno istaknuto na većim horizontalnim udaljenostima od bazne stanice ($l > \sim 50 \text{ m}$). Pri debljini gornjeg sloja podloge od 50 cm razine ukupnog polja u točkama proračuna teže scenariju s jednoslojnom reflektirajućom podlogom.

U drugom slučaju analizira se utjecaj relativne permitivnosti gornjeg sloja podloge (ϵ_1) na ukupnu razinu polja. Pri dvoslojnoj podlozi pretpostavljena je debljina gornjeg sloja u iznosu od $d_1 = 10 \text{ cm}$ i specifična vodljivost od $\sigma_1 = 1 \text{ mS/m}$. Iz slike 8.3 vidljiva je razlika u razinama polja ukoliko se reflektirajuća podloga modelira kao jednoslojna, odnosno dvoslojna sredina.



Slika 8.3 Utjecaj relativne permitivnosti gornjeg sloja podloge na ukupnu razinu polja pri FRM metodi izračuna refleksijskog koeficijenta

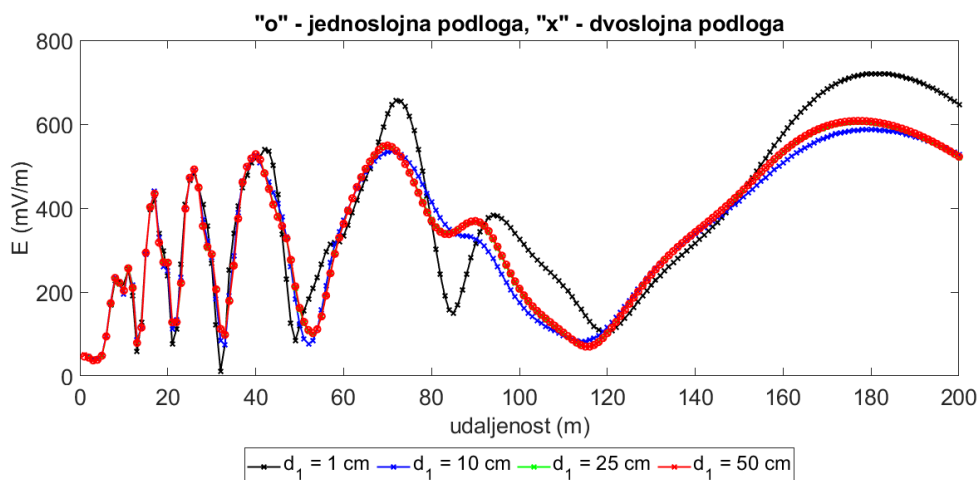
U trećem slučaju analizira se utjecaj specifične vodljivosti gornjeg sloja podloge (σ_1) na ukupnu razinu polja. Pri dvoslojnoj podlozi pretpostavljena je debljina gornjeg sloja u iznosu $d_1 = 10 \text{ cm}$ i specifična vodljivost od $\epsilon_1 = 5$ (slika 8.4).



Slika 8.4 Utjecaj relativne permitivnosti gornjeg sloja podloge na ukupnu razinu polja pri FRM metodi izračuna refleksijskog koeficijenta

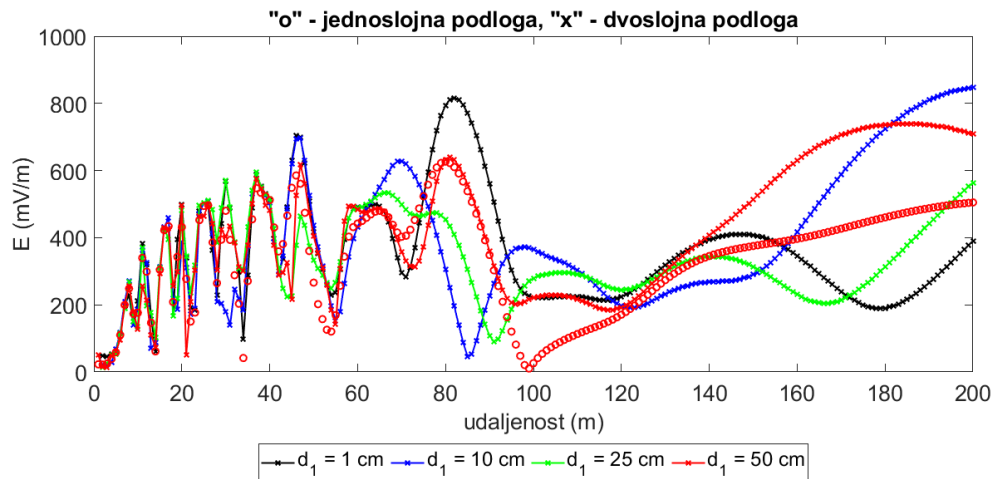
Za slučaj $\sigma_1 = 1$ mS/m, odnosno $\sigma_1 = 10$ mS/m vidljiv je utjecaj dvoslojne podloge na ukupnu razinu polja. Međutim, pri $\sigma_1 = 100$ mS/m, odnosno $\sigma_1 = 1000$ mS/m, dvoslojna podloga može se zanemariti, odnosno reflektirajuća podloga može se pojednostaviti kao jednoslojna.

Zanimljivo je promotriti scenarije pri različitim varijacijama električnih veličina (σ_1 , ϵ_1) i debljine gornjeg sloja podloge (d_1). Primjerice, ukoliko bi se specifična vodljivost gornjeg sloja podloge (σ_1) povećala na 100 mS/m, utjecaj dvoslojne podloge mogao bi se potpuno zanemariti već pri debljini gornjeg sloja u iznosu od 10 cm (slika 8.5), odnosno reflektirajuća podloga može se predstaviti jednim slojem.



Slika 8.5 Električno polje pri specifičnoj vodljivosti gornjeg sloja od 100 mS/m

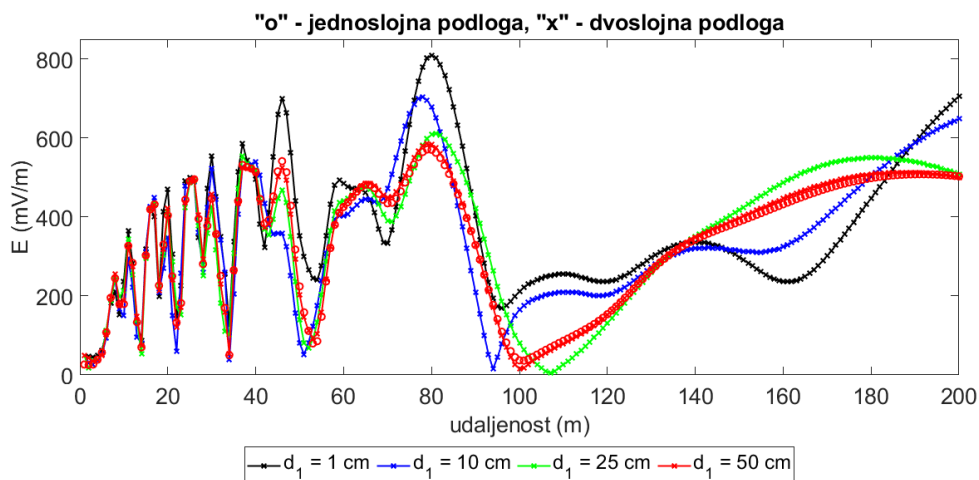
Naime, krivulje koje opisuju razine električnog polja pri $d_1 = 10\text{ cm}$, $d_1 = 25\text{ cm}$ i $d_1 = 50\text{ cm}$ gotovo se savršeno preklapaju sa krivuljom koja opisuje slučaj refleksije iznad jednoslojne podloge opisane parametrima $(\sigma_1, \varepsilon_1)$. Također, za slučaj povećanja relativne permitivnosti gornjeg sloja podloge ($\varepsilon_1 \rightarrow 100$), donji sloj pokazuje tendenciju gubitka utjecaja na ukupnu razinu polja pri većim debljinama gornjeg sloja ($d_1 \geq 25\text{ cm}$, slika 8.6).



Slika 8.6 Električno polje ($\varepsilon_1 \rightarrow 100$)

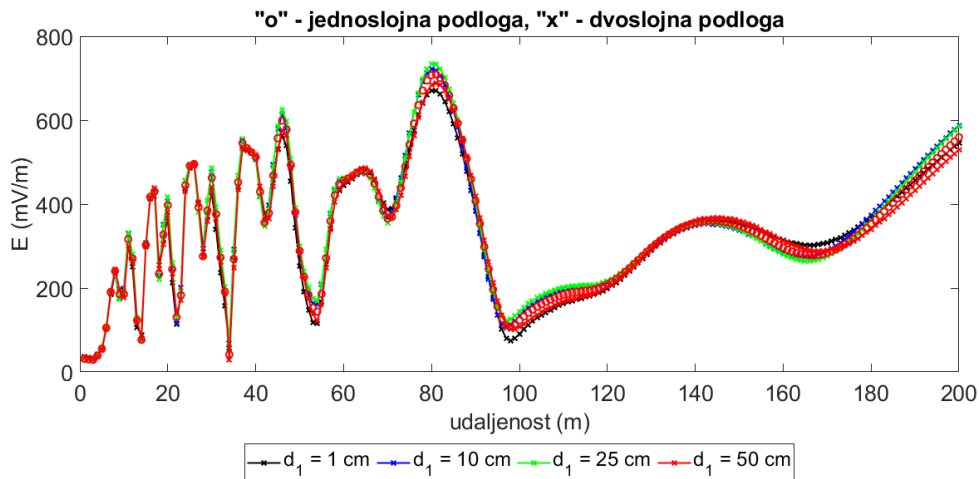
Pa ipak, za značajna povišenja relativne permitivnosti gornjeg sloja podloge ($\varepsilon_1 \rightarrow \infty$), reflektirajuća podloge može se modelirati kao jednoslojna, homogena sredina.

Kada bi gornji sloj reflektirajuće podloge bio opisan parametrima $\sigma_1 = 100\text{ mS/m}$ i $\varepsilon_1 = 50$, pri debljinama sloja $d_1 \geq 25$ donji sloj reflektirajuće podloge mogao bi se zanemariti (slika 8.7).



Slika 8.7 Jakost električnog polja pri $\sigma_1 = 100\text{ mS/m}$ i $\varepsilon_1 = 50$

U drugom slučaju analiziraju se utjecaji identičnih parametara uz izračun koeficijenta refleksije preko MIT metode. Na slici 8.8 prikazan je utjecaj debljine gornjeg sloja podloge na ukupnu razinu polja dok su ostali parametri držani nepromijenjenima: $\sigma_1 = 1 \text{ mS/m}$, $\varepsilon_1 = 5$, $\sigma_2 = 50 \text{ mS/m}$ i $\varepsilon_2 = 4$.

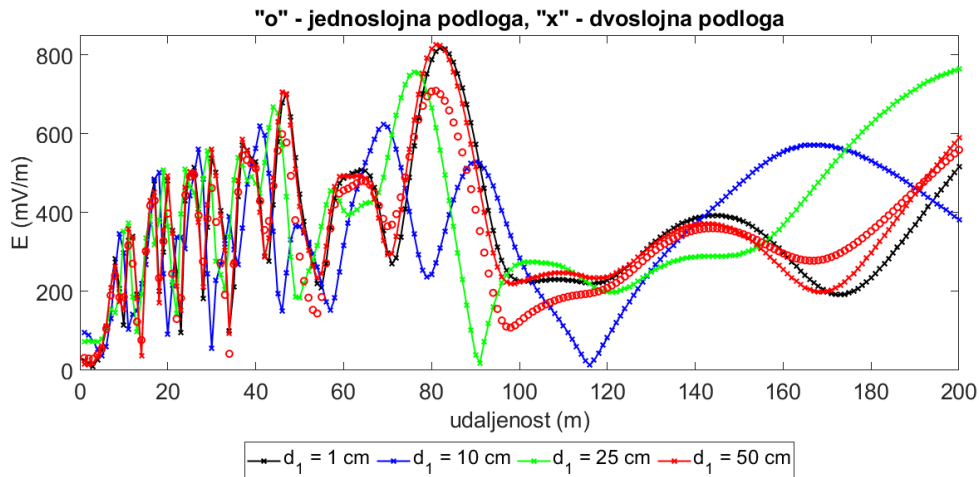


Slika 8.8 Utjecaj debljine gornjeg sloja podloge na ukupnu razinu polja pri MIT metodi izračuna refleksijskog koeficijenta

Za dane ulazne parametre može se zaključiti kako pri MIT metodi izračuna koeficijenta refleksije, krivulje koje opisuju jakost električnog polja poprimaju vrlo sličan oblik, uz određena odstupanja u točkama lokalnih minimuma, odnosno maksimuma. Korisno je istaknuti kako gornji sloj tla pri debljini od 1 cm nema značajan utjecaj na ukupnu razinu električnog polja kao što je to bio slučaj pri FRM metodi proračuna. Dapače, postojanje dvoslojne podloge u ovom slučaju može se zanemariti, tj. podloga se može modelirati kao homogena, jednoslojna sredina.

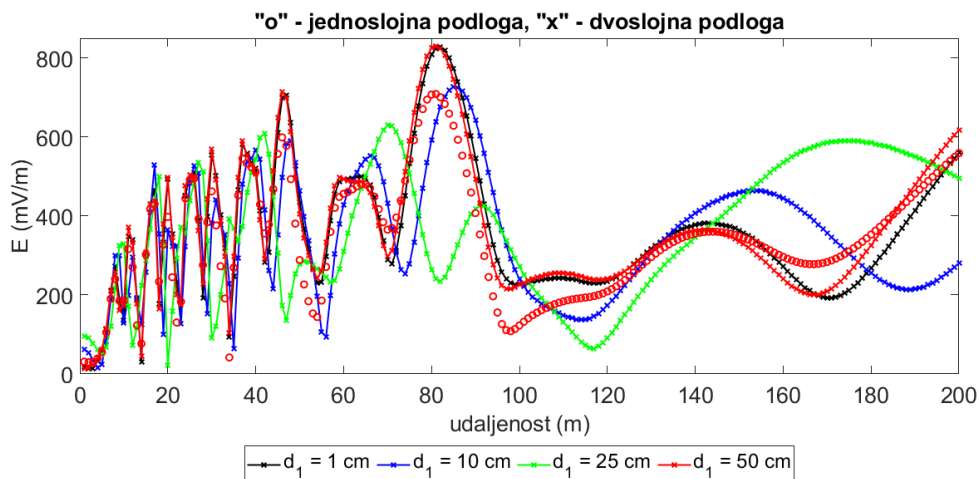
Budući da pri odabranim dielektričnim parametrima (σ_1 , ε_1 , σ_2 i ε_2) iz tablice 8.1 dvoslojna podloga ne pokazuje utjecaj na ukupnu razinu polja bez obzira na pretpostavljenu debljinu gornjeg sloja d_1 , zanimljivo je istražiti slučaj kada će dvoslojna podloga ipak doći do izražaja.

Prvo se analizira utjecaj promjene parametara donjeg sloja podloge na ukupnu razinu polja (σ_2 i ε_2). Neka se u prvom slučaju vrijednost specifične vodljivosti σ_2 povisi na 1000 mS/m . Ostali parametri zadržani su prema: $\sigma_1 = 1 \text{ mS/m}$, $\varepsilon_1 = 5$ i $\varepsilon_2 = 4$. Iz slike 8.9 vidljivo je raspršenje dobivenih rezultata u odnosu na rezultate prikazane na slici 8.8.



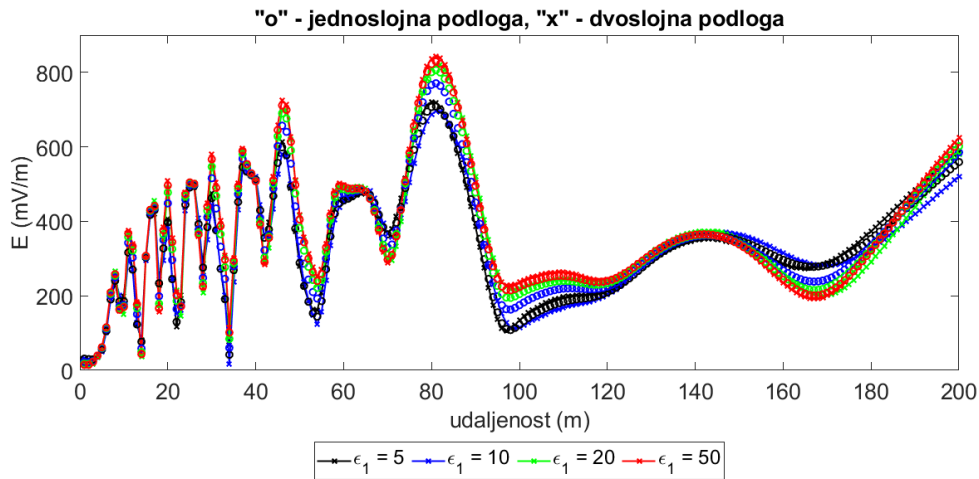
Slika 8.9 Električno polje pri $\epsilon_1 = 5$, $\sigma_1 = 1 \text{ mS/m}$, $\epsilon_2 = 4$ i $\sigma_2 = 1000 \text{ mS/m}$

U drugom slučaju vrijednost relativne permitivnosti ϵ_2 povišena je na iznos 100. Ostali parametri zadržani su prema: $\sigma_1 = 1 \text{ mS/m}$, $\sigma_2 = 0,05 \text{ mS/m}$ i $\epsilon_2 = 4$. Iz slike 8.10 također je vidljivo raspršenje dobivenih rezultata u odnosu na rezultate prikazane na slici 8.8.



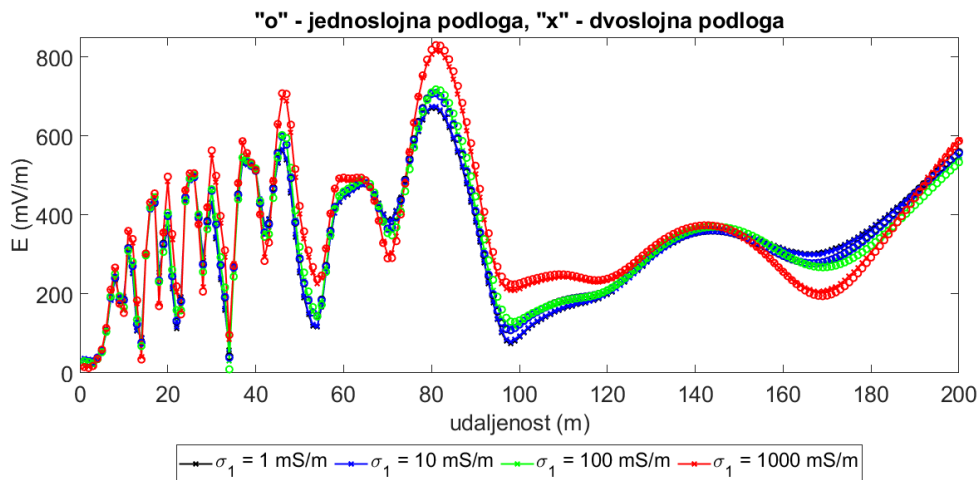
Slika 8.10. Električno polje pri $\epsilon_1 = 5$, $\sigma_1 = 1 \text{ mS/m}$, $\epsilon_2 = 100$ i $\sigma_2 = 50 \text{ mS/m}$

Ako bi se pak mijenjala relativna permitivnost gornjeg sloja (ϵ_1) pri ostalim parametrima postavljenima prema: $\sigma_1 = 1 \text{ mS/m}$, $\sigma_2 = 0.05 \text{ S/m}$ i $\epsilon_2 = 4$ te $d_1 = 10 \text{ cm}$, došlo bi do izraženijih razlika u razinama polja, posebno u točkama lokalnih minimuma, odnosno maksimuma (slika 8.11). Povećanjem vrijednosti ϵ_1 mogu se očekivati više razine polja, ali u ovom slučaju podloga se može aproksimirati kao homogeni, jednoslojni medij.



Slika 8.11 Električno polje pri promjeni parametra ϵ_1 uz $\sigma_1 = 1 \text{ mS/m}$, $\epsilon_2 = 4$ i $\sigma_2 = 50 \text{ mS/m}$

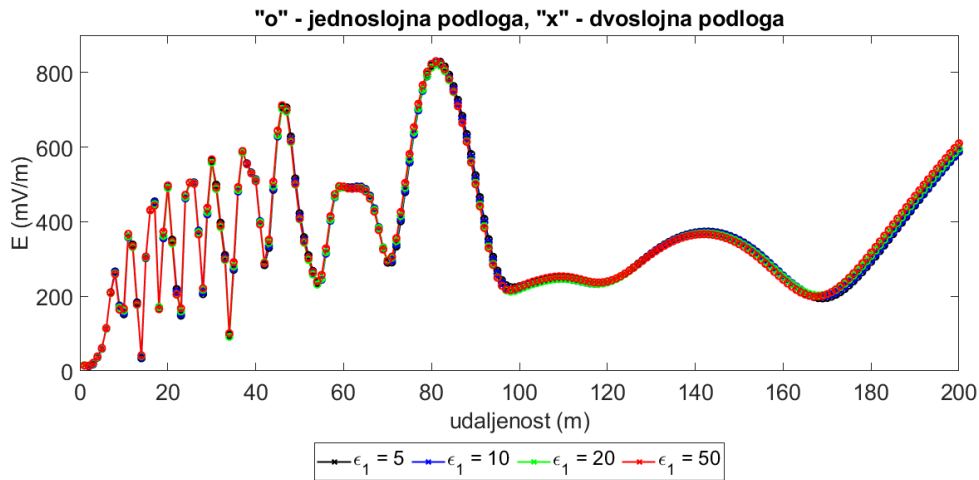
Iako se do sada mogao stvoriti dojam o utjecaju specifične vodljivosti gornjeg sloja podloge (σ_1) na ukupnu razinu polja, zanimljivo je detaljnije promotriti promjene nastale povišenjem specifične vodljivosti do $\sigma_1 = 1000 \text{ mS/m}$. Na slici ispod vidljivo je povišenje razina polja, a može se zaključiti i kako se reflektirajuća podloga može modelirati kao jednoslojna (slika 8.12).



Slika 8.12 Električno polje pri promjeni parametra σ_1 uz $\epsilon_1 = 5$, $\epsilon_2 = 4$ i $\sigma_2 = 50 \text{ mS/m}$

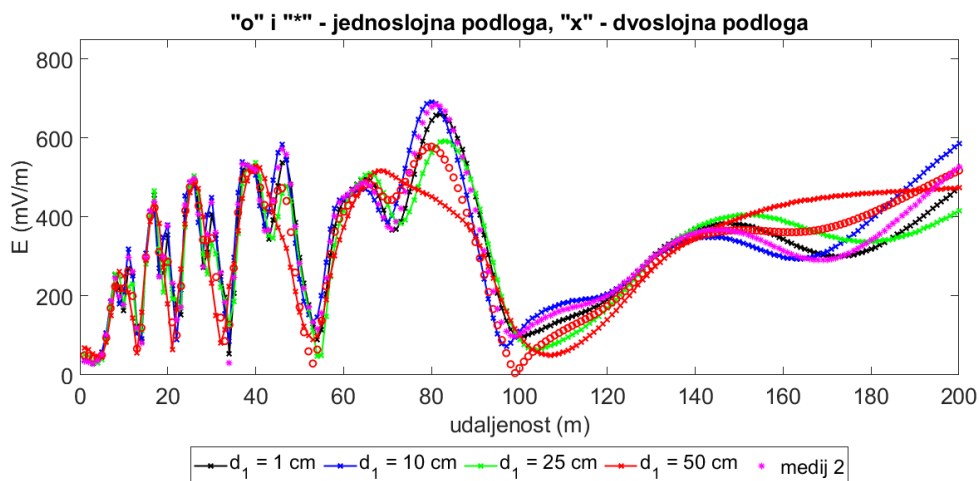
Zanimljivo je još razmotriti i specifične slučajeve pri promjeni električnih svojstava gornjeg sloja podloge (σ_1 , ϵ_1). Primjerice, povišenjem vrijednosti specifične vodljivosti ($\sigma_1 = 1000 \text{ mS/m}$) pri ostalim parametrima postavljenima prema: $\sigma_2 = 50 \text{ mS/m}$ i $\epsilon_2 = 4$ te $d_1 = 10 \text{ cm}$, utjecaj dvoslojne podloge bio bi potpuno zanemariv, bez obzira na vrijednost relativne

permitivnosti ϵ_2 . Kao i u prethodnom slučaju, reflektirajuća podloga može se aproksimirati kao homogeni, jednoslojni medij (slika 8.13).



Slika 8.13 Električno polje pri promjeni parametra ϵ_1 uz $\sigma_1 = 1000 \text{ mS/m}$, $\epsilon_2 = 4$ i $\sigma_2 = 50 \text{ mS/m}$ pri $d_1 = 10 \text{ cm}$

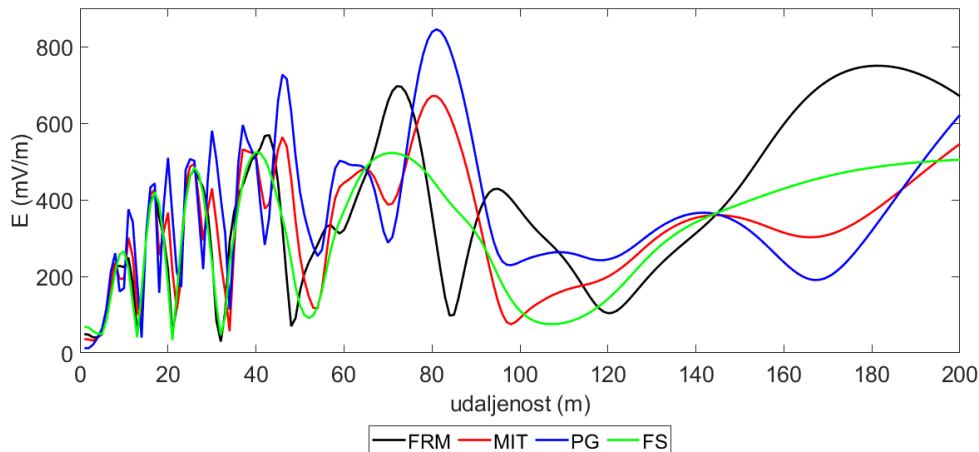
Ako se pak pretpostavi smanjenje vrijednosti relativne permitivnosti s $\epsilon_1 = 4$ na $\epsilon_1 = 2$, a ostali parametri zadrže prema: $\sigma_1 = 1 \text{ mS/m}$, $\sigma_2 = 50 \text{ mS/m}$ i $\epsilon_2 = 4$, vidljivo je da pri debljinama gornjeg sloja podloge $d_1 = 1 \text{ cm}$ i $d_1 = 10 \text{ cm}$ dominantni utjecaj na razinu polja ima donji sloj podloge. Ako se pak debljina gornjeg sloja podloge poveća na $d_1 = 25 \text{ cm}$, odnosno $d_1 = 50 \text{ cm}$ dominantni utjecaj na razinu polja preuzima gornji sloj podloge (slika 8.14).



Slika 8.14 Električno polje pri $\epsilon_1 = 2$, $\sigma_1 = 1 \text{ mS/m}$, $\epsilon_2 = 4$ i $\sigma_2 = 50 \text{ mS/m}$

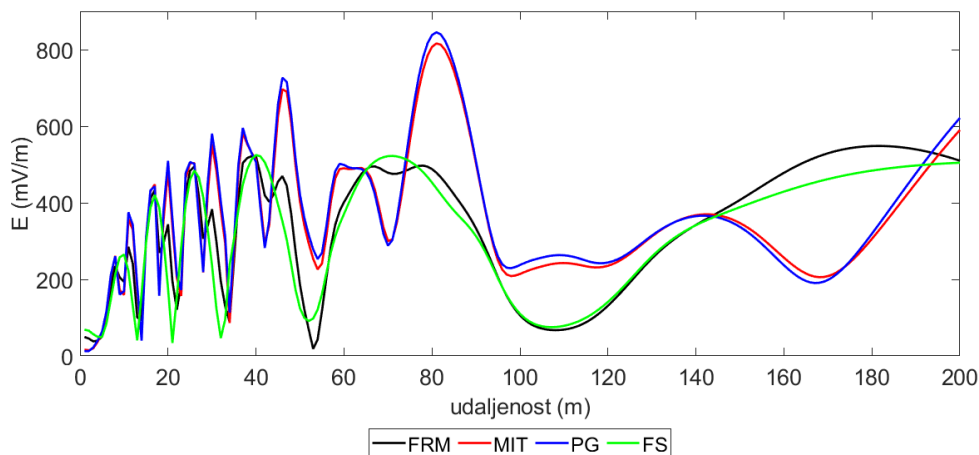
Na kraju, zanimljivo je razmotriti raspodjelu razina polja dobivenih različitim metodama proračuna: Fresnelov model za ravni val (FRM), modificirana metoda preslikavanja (MIT), metoda savršeno vodljive podloge (PG) te metoda slobodnog prostora (FS).

U prvom slučaju dielektrična svojstva reflektirajuće podloge postavljena su prema: $\sigma_1 = 1 \text{ mS/m}$, $\epsilon_1 = 5$, $\sigma_2 = 50 \text{ mS/m}$ i $\epsilon_2 = 4$. Debljina gornjeg sloja dvoslojne podloge postavljena je na $d_1 = 1 \text{ cm}$ (slika 8.15).



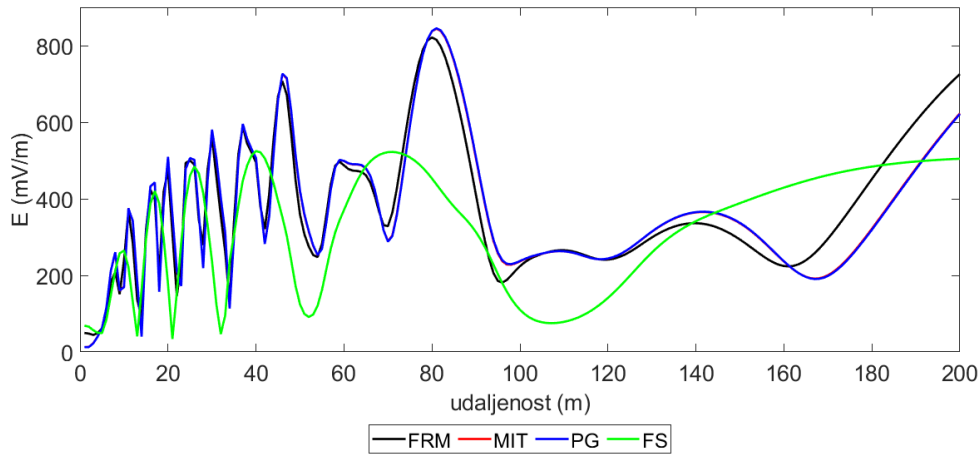
Slika 8.15 Električno polje dobiveno različitim modelima proračuna pri $\epsilon_1 = 5$, $\sigma_1 = 1 \text{ mS/m}$, $\epsilon_2 = 4$ i $\sigma_2 = 50 \text{ mS/m}$ i $d_1 = 1 \text{ cm}$

U drugom slučaju dielektrična svojstva reflektirajuće podloge postavljena su prema: $\sigma_1 = 1000 \text{ mS/m}$, $\epsilon_1 = 5$, $\sigma_2 = 0.05 \text{ mS/m}$ i $\epsilon_2 = 4$. Debljina gornjeg sloja dvoslojne podloge postavljena je na $d_1 = 1 \text{ cm}$ (slika 8.16).



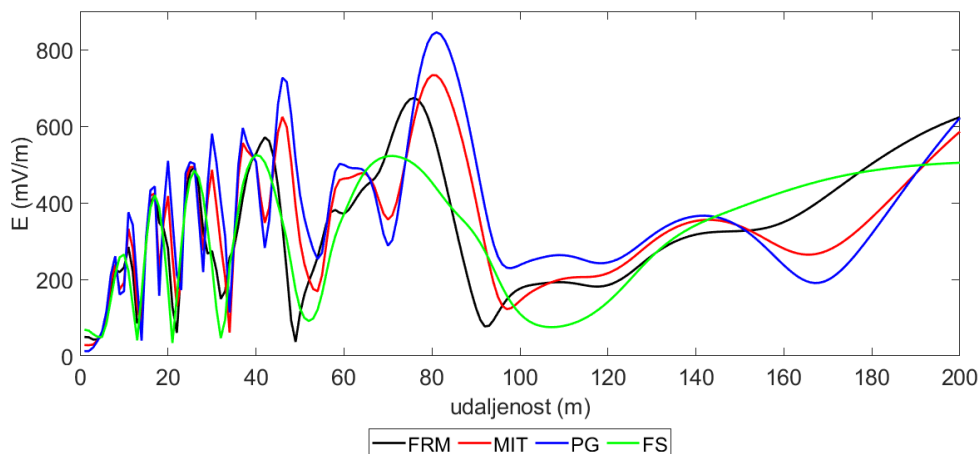
Slika 8.16 Električno polje dobiveno različitim modelima proračuna pri $\epsilon_1 = 5$, $\sigma_1 = 1000 \text{ mS/m}$, $\epsilon_2 = 4$ i $\sigma_2 = 0.05 \text{ mS/m}$ i $d_1 = 1 \text{ cm}$

U trećem slučaju dielektrična svojstva reflektirajuće podloge postavljena su prema: $\sigma_1 = 1 \text{ mS/m}$, $\varepsilon_1 = 50$, $\sigma_2 = 50 \text{ mS/m}$ i $\varepsilon_2 = 4$. Debljina gornjeg sloja dvoslojne podloge postavljena je na $d_1 = 1 \text{ cm}$ (slika 8.17).



Slika 8.17 Električno polje dobiveno različitim modelima proračuna pri $\varepsilon_1 = 50$, $\sigma_1 = 1 \text{ mS/m}$, $\varepsilon_2 = 4$ i $\sigma_2 = 50 \text{ mS/m}$ i $d_1 = 1 \text{ cm}$

U četvrtom slučaju dielektrična svojstva reflektirajuće podloge postavljena su prema: $\sigma_1 = 1 \text{ mS/m}$, $\varepsilon_1 = 5$, $\sigma_2 = 50 \text{ mS/m}$ i $\varepsilon_2 = 4$. Debljina gornjeg sloja dvoslojne podloge postavljena je na $d_1 = 25 \text{ cm}$ (slika 8.18).



Slika 8.18 Električno polje dobiveno različitim modelima proračuna pri $\varepsilon_1 = 5$, $\sigma_1 = 1 \text{ mS/m}$, $\varepsilon_2 = 4$ i $\sigma_2 = 50 \text{ mS/m}$ i $d_1 = 25 \text{ cm}$

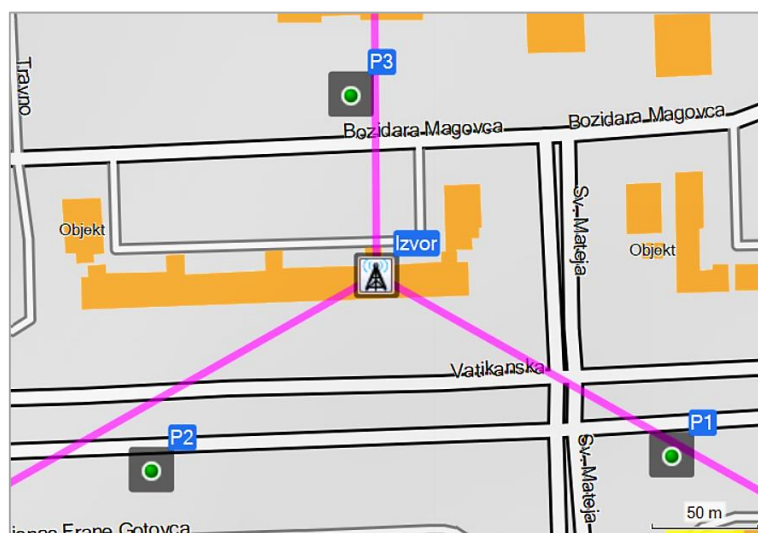
Iz prikazanih determinističkih slučajeva vidljiv je utjecaj električnih parametara reflektirajuće podloge na ukupnu razinu polja. Stoga se daju izdvojiti slučajevi u kojima se dvoslojna podloga

može aproksimirati homogenom, jednoslojnom sredinom. Također, ispitivanjem različitih metoda za izračun koeficijenta refleksije, ukazano je na varijabilnosti ukupne razine električnog polja u ovisnosti o izboru metode proračuna.

8.2. Deterministički slučajevi mjerenja razina EM polja 5G tehnologije

Kako je već spomenuto u poglavlju 5.2, mjerenje razina EM polja od iznimne je važnosti s ciljem zaštite od mogućeg štetnog utjecaja na čovjeka te kontinuiranog, višegodišnjeg praćenja razina EM polja u okolini baznih stanica. Mjerenje jakosti električnog polja bazne stanice moguće je provesti na više načina opisanih u poglavljima 5.3 – 5.7. Iako su tehnike mjerenja razina polja baznih stanica 2., 3. i 4. generacije mobilne mreže poznate i jasne, kod 5G tehnologije još uvijek se vode rasprave i istraživanja na tu temu.

U nastavku su prikazani rezultati mjerenja razina električnog polja 5G bazne stanice dobiveni primjenom aktualnih mjernih metoda. Mjerenje razina EM polja 5G bazne stanice obavljeno je više puta u tri mjerne točke kako je prikazano na slici 8.19.



Slika 8.19 Položaj bazne stanice i mjernih točaka u odnosu na sektore pokrivanja

Bazna stanica pokriva tri sektora usmjerena prema 0° , 120° i 240° u odnosu na sjever². Osnovni parametri 5G antena opisani su u tablici 8.2.

² Sektor (ćelija) bazne stanice, kao i položaj mjerne točke u odnosu na izvor, izražava se u ($^\circ$), gdje je smjer sjevera označen s 0° , a orijentacija ide u smjeru kazaljke na satu.

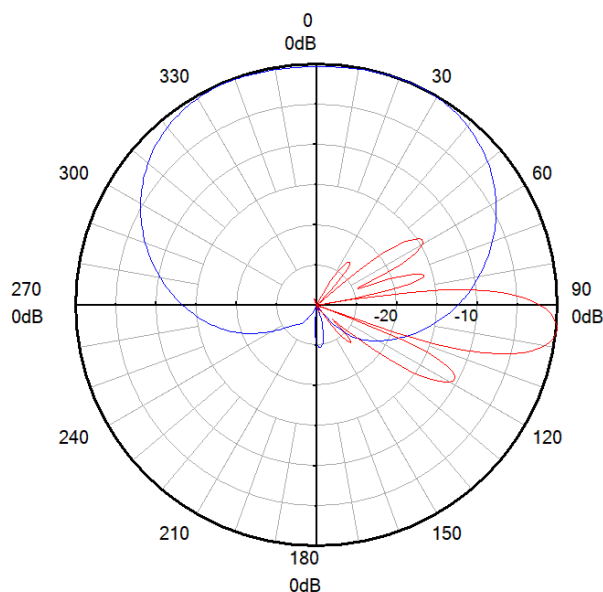
Tablica 8.2 Osnovni parametri antene nužni za izradu proračuna razina EM polja u okolini bazne postaje

sektor (°)	0	120	240
centralna frekvencija (MHz)	3650	3650	3650
tip antene	AAU5339	AAU5339	AAU5339
mehanički nagib (°)	0	0	0
električki nagib (°)	5	5	7
visina (m)	34,7	34,7	34,7
EIRP (dBm)	77,91	77,91	77,91

Važno je napomenuti kako je nadmorska visina bazne stanice i mjernih točaka u ovom slučaju jednaka.

Mjerna točka P1 od izvora je udaljena 162 m u smjeru (azimutu) od 122° u odnosu na smjer sjevera u točki izvora. S obzirom na visinu 5G antene iznad tla i visinu točke proračuna u iznosu od 1,5 m, izračunata je horizontalna udaljenost točke P1 od izvora u iznosu od 159 m, a elevacija točke naspram izvora iznosi 11°. Analogno tome, između izvora i mjerne točke P2 optička udaljenost iznosi 141 m, odnosno horizontalne udaljenosti 137 m. Točka P2 nalazi se na 229° u odnosu na smjer sjevera u točki izvora, s elevacijom od 14°. Mjerna točka na lokaciji P3 od izvora je udaljena 91 m, odnosno 86 m pri horizontalnoj udaljenosti te se nalazi 352° u odnosu na smjer sjevera u točki izvora, s elevacijom od 19°.

Prema definiranom položaju mjernih točaka u odnosu na izvor (azimut i elevacija) moguće je očitati relativne numeričke dobitke iz dijagrama zračenja (slika 8.20).



Slika 8.20 Horizontalni (plavo) i vertikalni (crveno) dijagram zračenja antene AAU5339 pri električnom nagibu od 5°

Uz aproksimaciju slobodnog prostora, prema izrazu (5.6) iz poglavlja 5, izračunata je jakost električnog polja u točkama P1, P2 i P3:

P1	P2	P3
6,57 (V/m)	7,57 (V/m)	1,51 (V/m)

Kada se u obzir uzme faktor radnog ciklusa (F_{TDD}) u iznosu od 0,74 dobije se:

P1	P2	P3
5,65 (V/m)	6,51 (V/m)	1,30 (V/m)

Kod nekih baznih stanica postoji mogućnost upravljanja zračenom snagom kako je objašnjeno u poglavlju 5.3. Prema dostupnim podacima, na promatrani izvor moguće je primijeniti korekcijski faktor snage u iznosu od 0,2. Time se osigurava da prosječna zračena snaga, u postavljenom vremenskom intervalu, neće prijeći 20 % od najviše moguće zračene snage. Prema tome, na izračunatu vrijednost polja može se primijeniti faktor korekcije zračene snage pa prosječne razine električnog polja, u postavljenom vremenskom intervalu, u mjernim točkama neće biti više od:

P1	P2	P3
2,53 (V/m)	2,91 (V/m)	0,58 (V/m)

Ukoliko bi se u obzir uzela komponenta EM vala reflektirana iznad dvoslojne vodljive podloge definirane parametrima prikazanim u tablici 8.3, razine električnog polja u točki proračuna iznosile bi kako je prikazano u tablici 8.4.

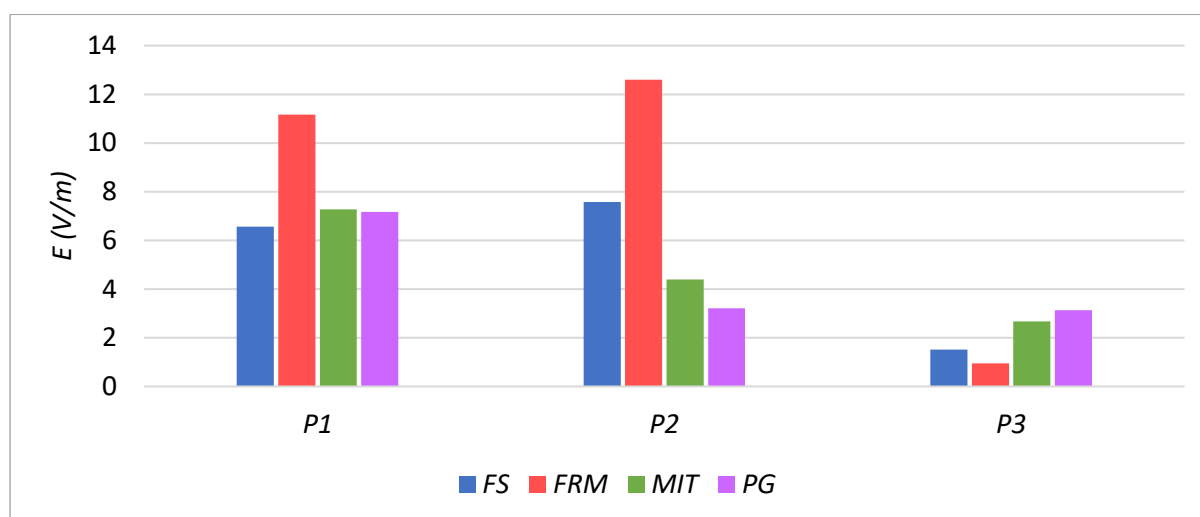
Tablica 8.3 Svojstva dvoslojne podloge iznad koje se događa refleksija EM vala za promatrani slučaj

parametar	oznaka	iznos
debljina prvog sloja podloge	d_h (cm)	5
relativna permitivnost prvog sloja	$\epsilon_{r,1}$	7
specifična vodljivost prvog sloja	$\sigma_{r,1}$ (mS/m)	1
relativna permitivnost drugog sloja	$\epsilon_{r,2}$	4
specifična vodljivost drugog sloja	$\sigma_{r,2}$ (mS/m)	5

Tablica 8.4 Razine električnog polja u točkama proračuna s obzirom na doprinos komponente EM vala reflektirane iznad modelirane podloge

	FRM	MIT	PG
E_{P1} (V/m)	11,17	7,27	7,17
E_{P2} (V/m)	12,60	4,39	3,21
E_{P3} (V/m)	0,95	2,67	3,13

Konačno, rezultati proračuna razina električnog polja u odabranim točkama dobiveni različitim postupcima uspoređeni su na slici 8.21.



Slika 8.21 Usporedba rezultata proračunatih razina električnog polja dobivenih različitim postupcima

Mjerenje razina električnog polja u definiranim mjernim točkama provedeno je postupcima opisanim u poglavlju 5, odnosno:

- I. demodulacijom sinkronizacijskog signala (kodna domena),
- II. mjerenjem snage aktivnog kanala (frekvencijska domena) i
- III. izravnim mjerenjem snage SSB-a (vremenska domena).

Sva mjerenja provedena su koristeći analizator frekvencijskog spektra Keysight FieldFox N9934B (9 kHz – 6,5 GHz) i izotropnu antenu AGOS ARIA (SDIA) 6000 (30 MHz – 6 GHz). Izotropna antena montirana je na nevodljivi tronožac i spojena koaksijalnim kabelom s analizatorom. Analizator spektra upravljan je preko računala spojenog LAN kabelom (slika 8.22).



Slika 8.22 Korištena mjerna oprema (analizatora frekvencijskog spektra, izotropna prijamna antena, nevodljivi tronožac, prijenosno računalo te koaksijalni i LAN kabel)

Pri svakoj mjernoj metodi mjerenje je provedeno između 5 i 20 puta kako bi se dobila realističnija slika o stvarnim izmjerenim razinama električnog polja.

Demodulacijom sinkronizacijskog bloka (SSB-a) moguće je istovremeno odrediti najvišu i prosječnu zabilježenu snagu. Upotrebom programa direktno se očitavaju izmjerene vrijednosti (eng. *Reference Signal Received Power*, RSRP) na koje se postprocesiranjem dodaju ekstrapolacijski faktori kako je objašnjeno u poglavlju 5.3.

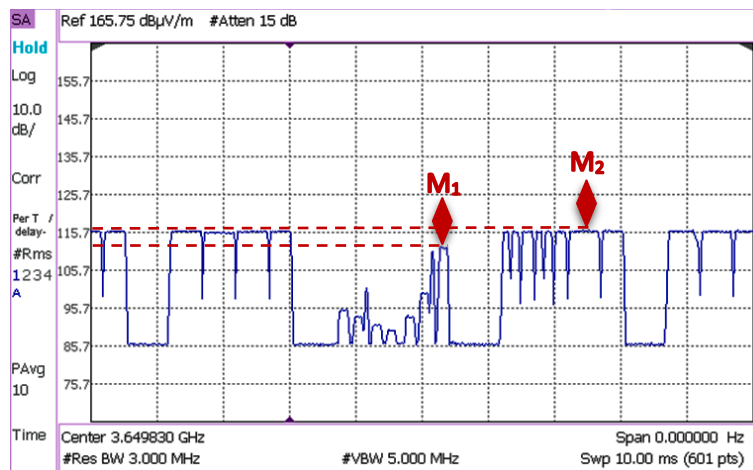
Kanalnim mjerenjem također je moguće izravno odrediti najvišu i prosječnu razinu polja. Međutim, budući da vrijeme mjerenja nije moguće sinkronizirati s radom bazne stanice, prosječne razine polja određene su postprocesiranjem izmjerenih vrijednosti. Naime, zbog još uvijek nedovoljno učestalog korištenja 5G mreže, bazna stanica ne odašilje snagu dovoljno dugo kako bi se mjerenje provelo na adekvatan način. Stoga bi prosječne razine polja bile znatno niže od najviših zabilježenih. Zbog toga je promet na baznoj stanici iniciran upotrebom mobilnog uređaja koji podržava rad 5G mreže, a trajanje mjerenja prilagođeno je trajanju uspostavljenog prometa. Pri tome je u mjernim točkama zabilježena najviša brzina prijenosa podataka u iznosu od približno 1,5 Gbps (slika 8.23) dok je prosječna zabilježena brzina iznosila približno 1,3 Gbps.



Slika 8.23 Najviša zabilježena brzina prometa (Mbps) u mjernoj točki P1

Izravno mjerenje snage (jakosti polja) u vremenskoj domeni složeniji je proces koji zahtijeva više vremena. Naime, pri vremenskoj domeni potrebno je zasebno mjeriti razine polja na svakoj osi antene (x , y i z). Ukupna izmjerena razina polja SSB-a dobije se prema izrazu (5.85) iz poglavlja 5.5.

Pri ekstrapolaciji izmjerenih rezultata (kodna i vremenska domena) posebnu je pozornost potrebno posvetiti određivanju ekstrapolacijskih faktora koji uvelike utječu na konačnu razinu polja. Od ekstrapolacijskih faktora opisanih u poglavlju 5.3, najutjecajniji faktor svakako je F_{beam} . F_{beam} faktor predstavlja razliku zračene snage pri odašiljanju SSB-ova u odnosu na zračenu snagu pri podatkovnoj vezi. Moguće ga je odrediti mjerenjem razina polja (snage) SSB-a i razine polja (snage) pri podatkovnoj vezi (slika 8.24).



Slika 8.24 Određivanje faktora F_{beam} mjerenjem ($F_{beam} = M_2 - M_1$)

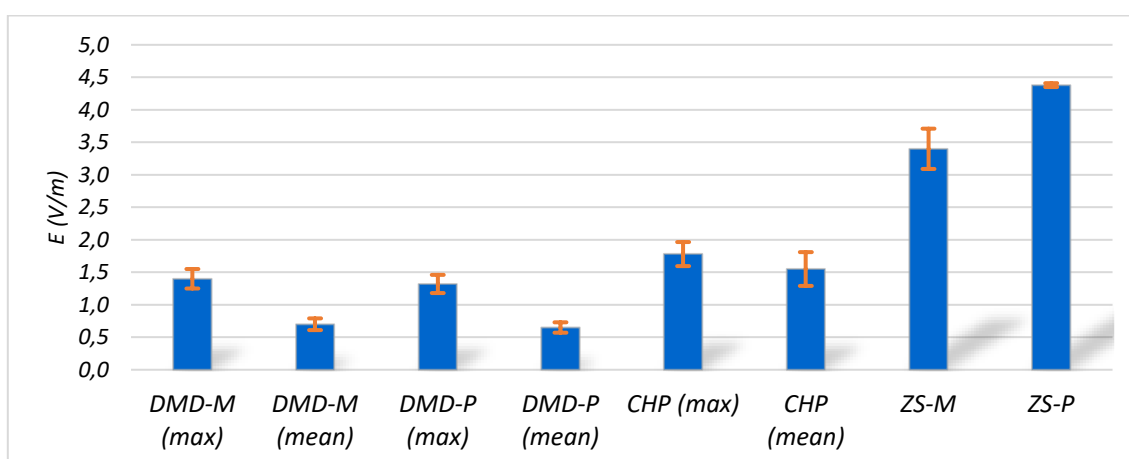
Također, F_{beam} faktor moguće je i očitati poznavajući položaj mjerne točke u odnosu na izvor (r , θ , φ) i dijagrama zračenja pri odašiljanju SSB-a, odnosno pri podatkovnoj vezi. U svrhu usporedbe izmjerenih rezultata faktor F_{beam} određen je primjenom oba postupka.

Oznake korištene u prikazu rezultata pojašnjene su u tablici 8.5.

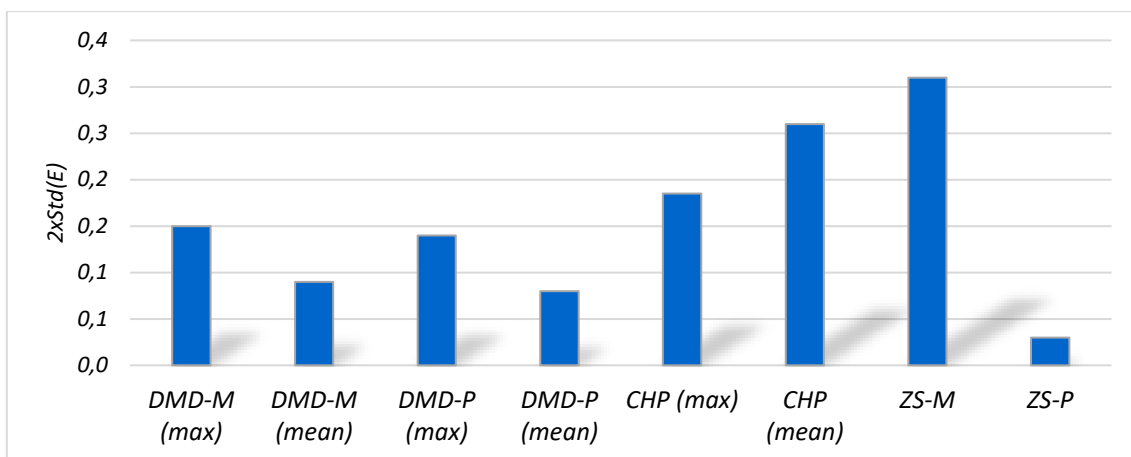
Tablica 8.5 Termini korišteni u prikazu mjernih rezultata

<i>DMD-M (max)</i>	kodna domena pri čemu je F_{beam} određen mjerenjem (najviša izmjerena vrijednost)
<i>DMD-M (mean)</i>	kodna domena pri čemu je F_{beam} određen mjerenjem (prosječna izmjerena vrijednost)
<i>DMD-P (max)</i>	kodna domena pri čemu je F_{beam} određen procjenom iz dijagrama zračenja (najviša izmjerena vrijednost)
<i>DMD-P (mean)</i>	kodna domena pri čemu je F_{beam} određen procjenom iz dijagrama zračenja (prosječna izmjerena vrijednost)
<i>CHP (max)</i>	frekvencijska domena (najviša izmjerena vrijednost)
<i>CHP (mean)</i>	frekvencijska domena (prosječna izmjerena vrijednost)
<i>ZS-M</i>	vremenska domena pri čemu je F_{beam} određen mjerenjem
<i>ZS-P</i>	vremenska domena pri čemu je F_{beam} određen procjenom iz dijagrama zračenja

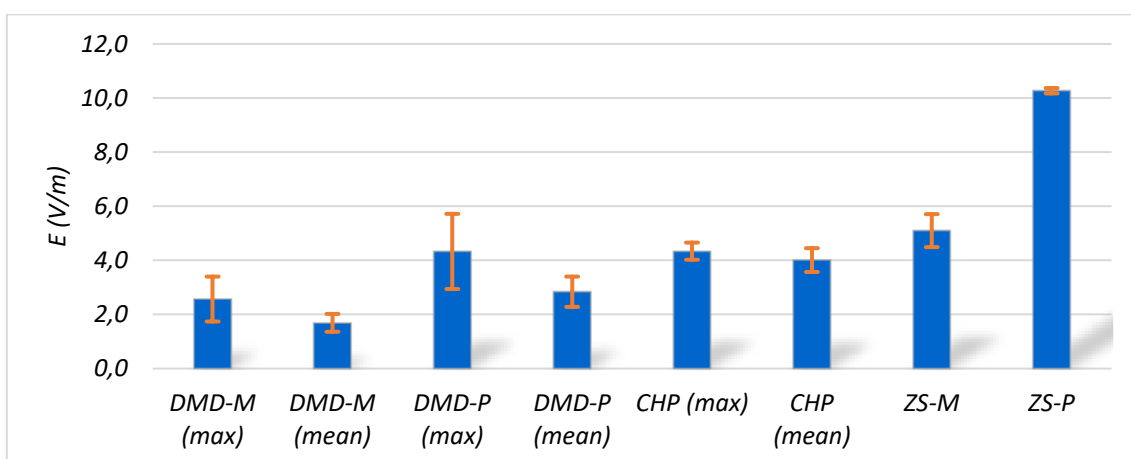
Rezultati mjerenja razina električnog polja u točkama P1, P2 i P3 prikazani su na slikama 8.25 - 8.30.



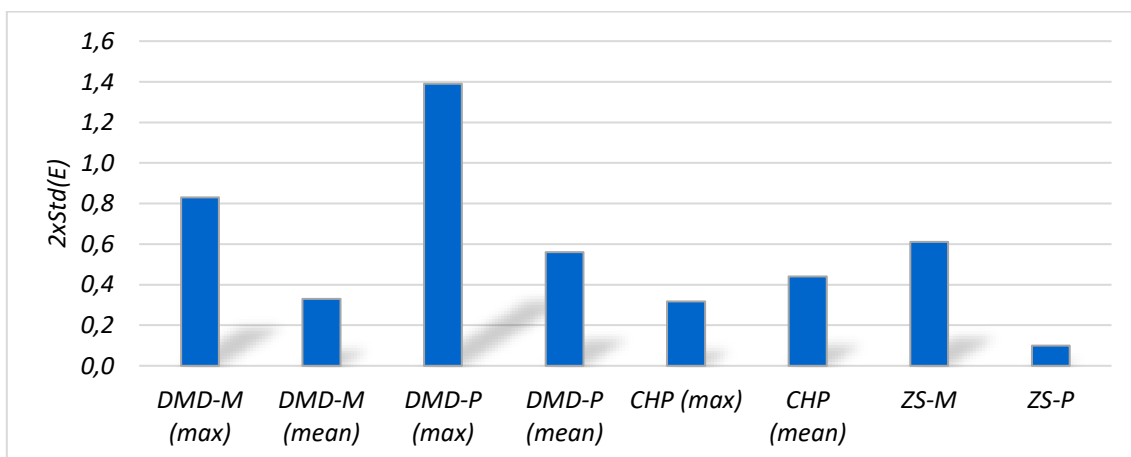
Slika 8.25 Jakost električnog polja uz dvostruko standardno odstupanje u mjernoj točki P1



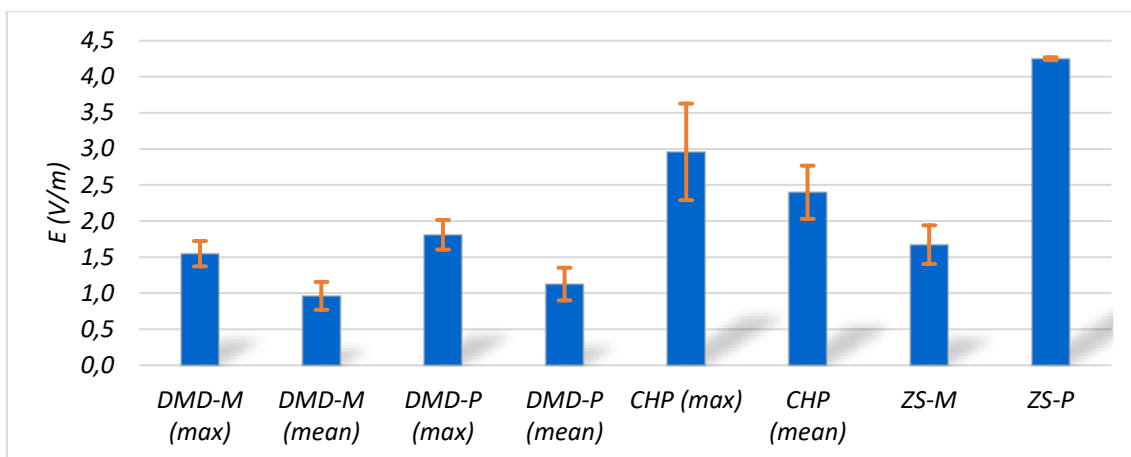
Slika 8.26 Dvostruka standardna devijacija izmjerenih razina polja u mjernoj točki P1



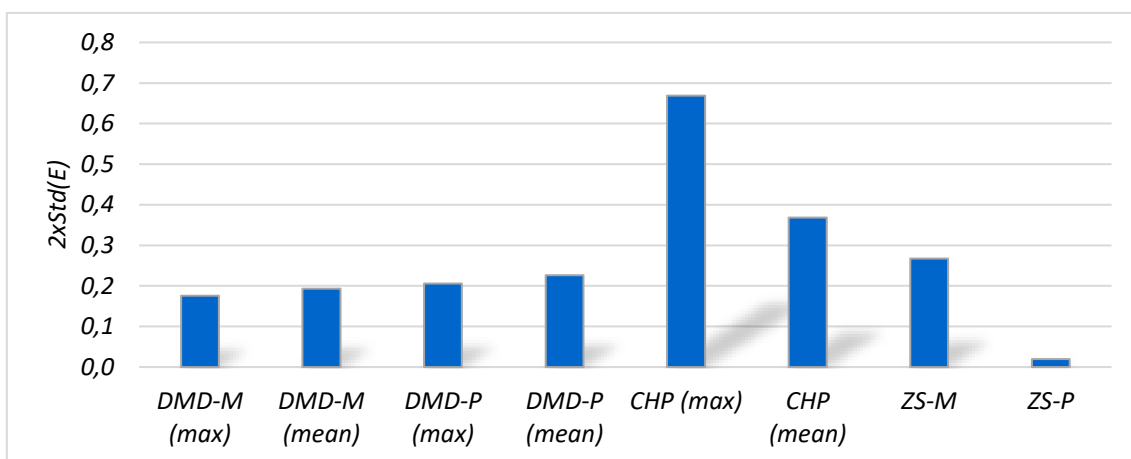
Slika 8.27 Jakost električnog polja uz dvostruko standardno odstupanje u mjernoj točki P2



Slika 8.28 Dvostruka standardna devijacija izmjerenih razina polja u mjernoj točki P2



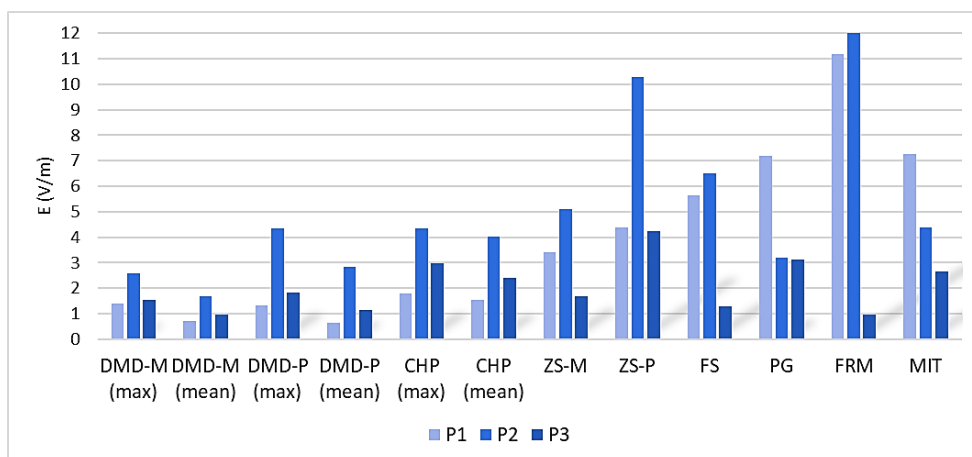
Slika 8.29 Jakost električnog polja uz dvostruko standardno odstupanje u mjernoj točki P3



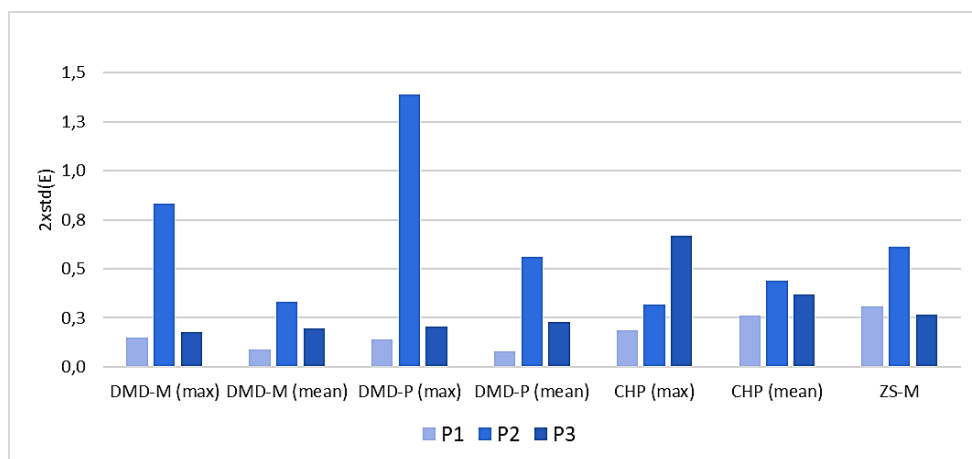
Slika 8.30 Dvostruka standardna devijacija izmjerenih razina polja u mjernoj točki P3

Iz slika 8.25 – 8.30 jasno je vidljivo kako se mjerenjem u vremenskoj domeni (ZS) najčešće dobivaju najviše vrijednosti polja. Izuzetak je vidljiv u mjernoj točki P3 gdje je mjerenje u vremenskoj domeni uz faktor F_{beam} određen mjerenjem (ZS-M) pokazalo razine polja niže od CHP (max) i CHP (mean) mjerenja te DMD-P (max) mjerenja (slika 8.30).

Iako bi sve tri metode u pravilu trebale prikazati najviše moguće razine polja, tj. pružiti podjednake (međusobno usporedive) vrijednosti, vidljivo je relativno veliko odstupanje u mjernim rezultatima (slika 8.31) što se može primijetiti i u prikazu dvostrukih standardnih devijacija (slika 8.32).



Slika 8.31 Jakost električnog polja uz dvostruko standardno odstupanje u mjernim točkama P1, P2 i P3 po mjernim metodama

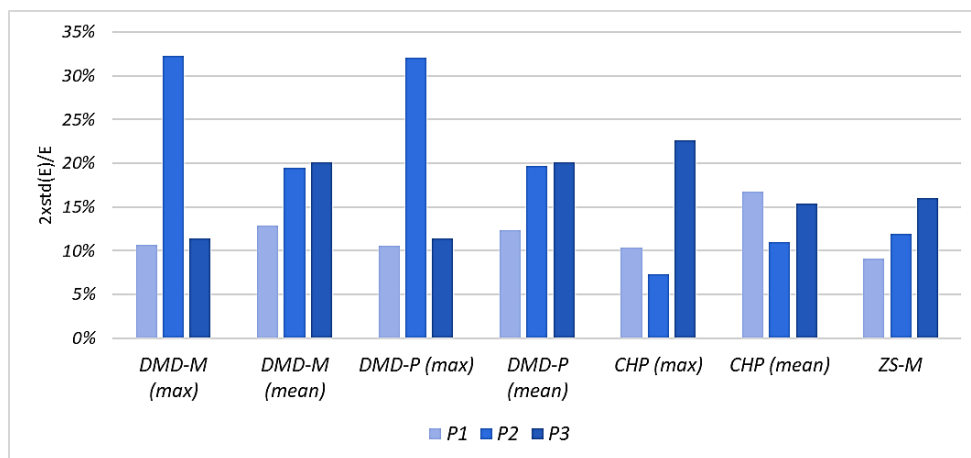


Slika 8.32 Usporedba dvostrukih standardnih devijacija u mjernim točkama P1, P2 i P3 po mjernim metodama

Primjerice, ovisno o mjernoj metodi, u točki P1 najviše razine polja su između 1,32 V/m i 4,38 V/m. U mjernoj točki P2 taj raspon je između 2,57 V/m i 10,27 V/m, a u točki P3 između 1,55 V/m i 4,25 V/m.

Iako je u teoriji SSB odašiljan konstantnom snagom, u praksi to ipak nije slučaj. Naime, u mjerenjima je zabilježena varijacija snage SSB-a veća i od 4 dB. Također, najviše zabilježene snage pri podatkovnoj vezi također mogu značajno varirati u ovisnosti o broju korisnika trenutno spojenih na mrežu. Na izmjerene razine utječu i vanjski faktori (promet na ulici, prolaznici u blizini izotropne antene i sl.). Kako je već spomenuto, značajnu ulogu u razinama ekstrapoliranih vrijednosti ima faktor F_{beam} . Iako mjerenjem nisu ustanovljene razlike u zračenoj snazi SSB-a, odnosno snazi podatkovnog odašiljanja veće od 8 dB, pri očitavanju razlike iz dijagrama zračenja moguće su vrijednosti F_{beam} faktora veće od 10 dB.

Ukoliko se promotri udio dvostrukog standardnog odstupanja u srednjoj vrijednosti razine električnog polja, moguće je ustanoviti razinu pouzdanosti mjerne metode (slika 8.33).



Slika 8.33 Udio dvostruke standardne devijacije u srednjoj vrijednosti izmjerene razine električnog polja E_{mean}

Prema slikama 8.31 i 8.32 mogu se očekivati značajna odstupanja u izmjerenim razinama polja neovisno o mjernoj metodi. Iz provedenih mjerenja ustanovljen je prosječni udio dvostruke standardne devijacije u srednjoj vrijednosti izmjerene razine polja u intervalu između 11 % i 32 % (u prosjeku 18 %) za *DMD*, između 7 % i 23 % (u prosjeku 14 %) za *CHP* te približno između 7 % i 16 % (u prosjeku 12 %) za *ZS* mjernu metodu.

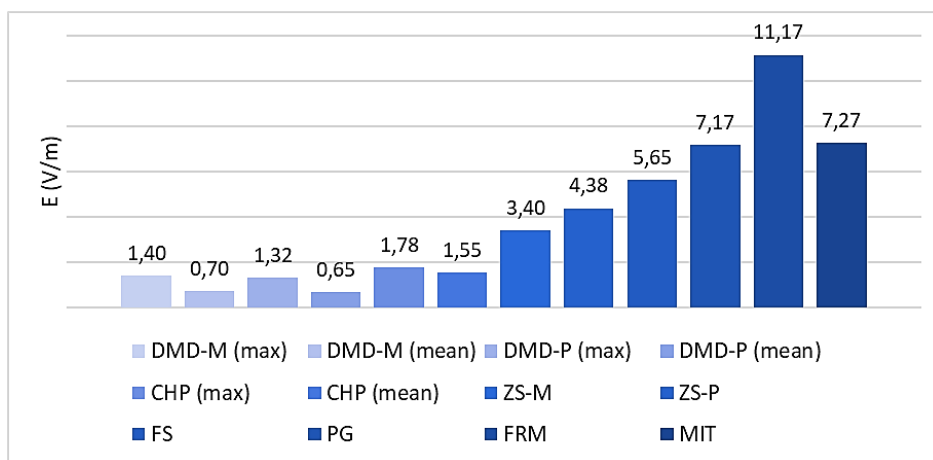
Usporedbom izmjerenih i proračunatih vrijednosti polja može se očekivati da mjerenje *ZS* metodom dovede do predimenzioniranja stvarnih razina polja. S obzirom i na kompleksnost izvođenja mjerenja i postprocesiranja izmjerenih rezultata, nameće se pitanje opravdanosti i efikasnosti primjene *ZS* metode pri mjerenju razina polja 5G baznih stanica.

Usporedbom izmjerenih rezultata može se zaključiti kako *CHP* metoda pokazuje najmanja odstupanja od srednje vrijednosti. Sa druge pak strane, mjerenje u frekvencijskoj domeni ovisit će o opterećenosti bazne stanice. Odnosno, povećanjem broja korisnika, zbog prostorne raspodjele zračene snage, moguće je poddimenzioniranje najviših mogućih razina izloženosti u točki mjerenja.

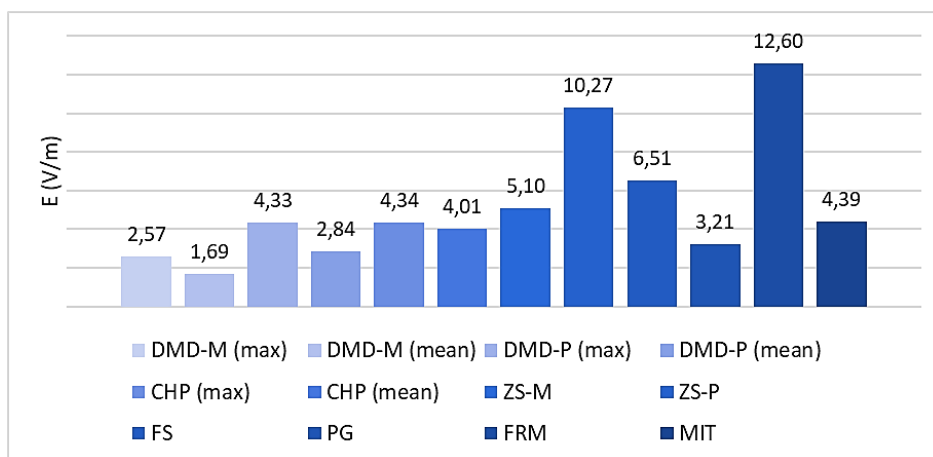
Mjerenje razina polja u kodnoj domeni (*DMD*) pruža relativno dobru pouzdanost, no ipak moguća su veća odstupanja u izmjerenim rezultatima zbog činjenice kako snaga demoduliranog dijela signala može značajno varirati, ali i zbog drastične nesigurnosti pri određivanju F_{beam} faktora (mjerenjem ili procjenom).

Sa praktične strane primjene mjernih metoda na adekvatan i efikasan način, potrebno je osigurati uvjete mjerenja u kojima će se mogući utjecaj okoline svesti na najmanju razinu. Osim toga, u slučaju iniciranja podatkovnog prometa prema mjernoj točki, potrebno je osigurati dovoljno dugo vrijeme trajanja silazne veze kako bi se povećala mogućnost za mjerenjem najviših mogućih razina izloženosti.

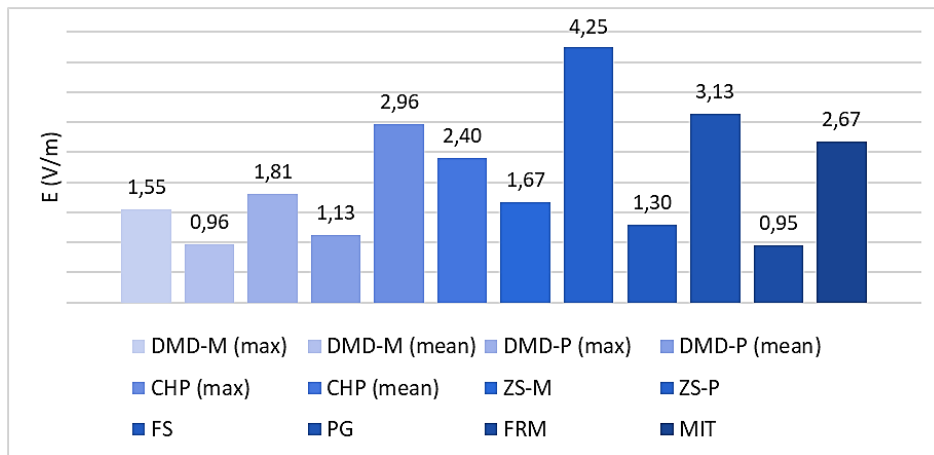
Na kraju, praktično je usporediti rezultate dobivene proračunom i mjerenjem na tri lokacije (slike 8.34 – 8.36).



Slika 8.34 Usporedba razina električnog polja dobivenih mjerenjem i proračunima u točki P1



Slika 8.35 Usporedba razina električnog polja dobivenih mjerenjem i proračunima u točki P2



Slika 8.36 Usporedba razina električnog polja dobivenih mjerenjem i proračunima u točki P3

Iz priloženih rezultata vidljivo je kako u većini slučajeva proračuni daju više vrijednosti u usporedbi s mjernim rezultatima. Međutim, uočeno je kako se ZS mjernom metodom mogu dobiti vrijednosti polja više od onih dobivenih metodama proračuna. U tom slučaju posebnu ulogu ima faktor F_{beam} koji, pokazalo se, može dovesti do predimenzioniranja stvarnih razina polja.

Iako bi se proračunima trebala dobiti najviša očekivana razina električnog polja u točki od interesa, to nije uvijek slučaj. Razine polja dobivene različitim metodama proračuna mogu uvelike varirati ovisno o odabiru metode, ali također mogu biti niže od razina dobivenih mjerenjem. Stoga bi, umjesto determinističkih slučajeva, poželjno bilo razmotriti statistički pristup u proračunu polja kako bi se smanjio utjecaj pogreške koja se u metodu proračuna unosi putem izmjerenih ili unaprijed definiranih ulaznih varijabli.

8.3. Stohastičko-deterministička analiza izloženosti EM poljima bazne stanice iznad dvoslojne vodljive podloge

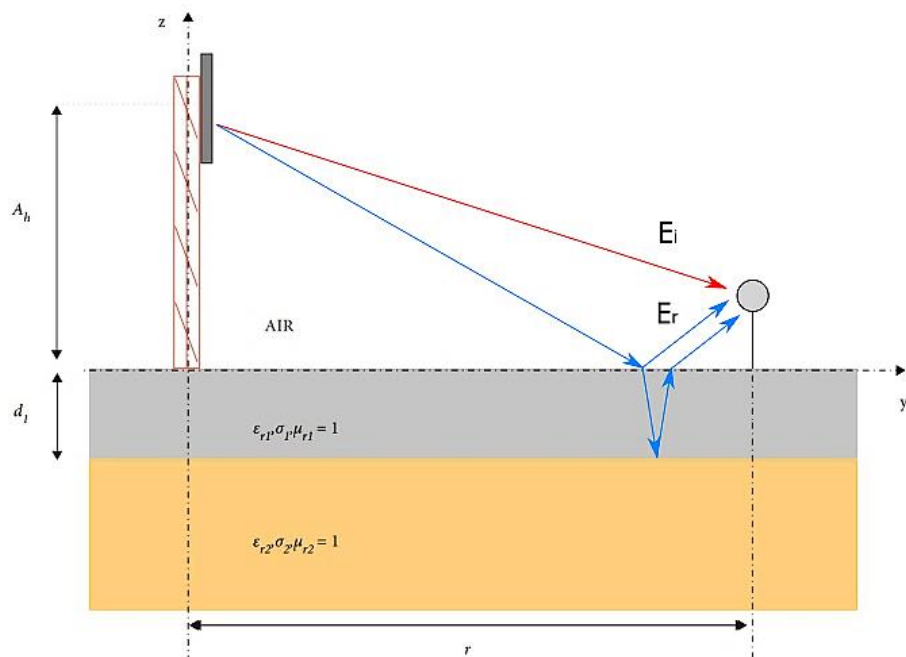
Pri određivanju razina EM polja bazne stanice u praksi se provode isključivo deterministički proračuni, odnosno mjerenja. Stoga nije uvijek moguće proračunati stvarne ili pak najviše moguće razine EM polja u okolini bazne stanice. Naime, gotovo je nemoguće točno odrediti sve ulazne parametre potrebne za izračun razina EM polja u točki od interesa. Deterministički

pristup, dakle, temeljen je na upotrebi egzaktnih ulaznih parametara (varijabli), odnosno izračunu egzaktnih izlaznih veličina od interesa. Kada je u pitanju proračun razina EM polja u okolini bazne stanice, neke osnovne ulazne varijable su: visina antene, orijentacija antene, električni i mehanički nagib antene, udaljenost točke proračuna od izvora, visina točke proračuna iznad tla, prisutnost reflektirajućih objekata i dr.

Budući da se za izračun jakosti električnog polja još uvijek uvelike koristi aproksimacija slobodnog prostora uz mogućnost pridodavanja egzaktnog utjecaja reflektirajuće podloge i objekata [11], determinističkim pristupom itekako su moguće značajne nesigurnosti u veličinama od interesa. Naime, reflektirajuća komponenta EM vala uvelike ovisi o faktoru refleksije koji je pak, između ostaloga, ovisan o električnim svojstvima i debljini reflektirajuće podloge.

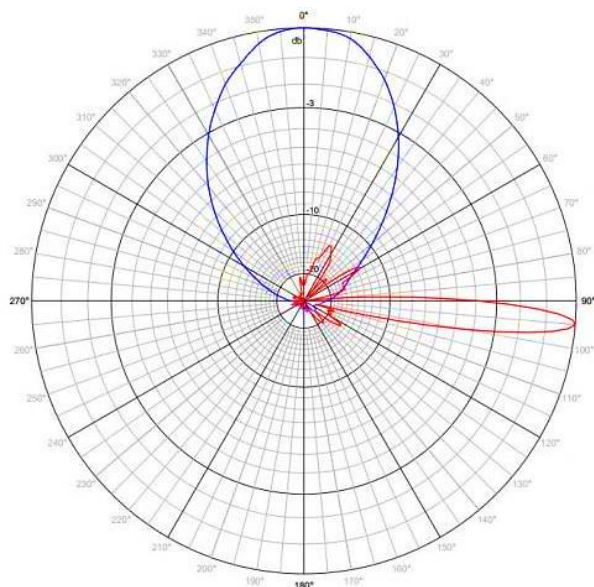
Sa druge strane, bazne stanice kao izvori EM polja također se ponašaju kao generatori slučajnih varijabli potrebnih za izračun razina izloženosti. Stoga je, kako bi se istražila varijabilna priroda ulaznih varijabli, stohastička analiza pri proračunu razina EM polja od iznimne važnosti. Kako je isključivo stohastička analiza često teško primjenjiva u praksi, može se pristupiti hibridnom pristupu, odnosno stohastičko-determinističkom modeliranju.

U ovoj disertaciji razmatra se izračun razina EM polja u točki prostora u okolini bazne stanice pri čemu se u točkama izračuna uzima u obzir utjecaj direktne i reflektirane komponente EM vala. Također, izračun razina EM polja izveden je u daljinskoj zoni izvora uz pretpostavku refleksije polja iznad dvoslojne, konačno vodljive podloge. Utjecaj nehomogene podloge analizira se uz Fresnelov pristup za izračun koeficijenta refleksije (FRM), odnosno koeficijent refleksije koji proizlazi iz modificirane metode preslikavanja (MIT). Pri tome su promjenjive ulazne varijable: visina antene, specifična vodljivost i relativna permitivnost dvoslojne podloge te debljina prvog (gornjeg) sloja podloge (slika 8.37). Kvantifikacija nesigurnosti izlazne veličine od interesa provedena je primjenom dviju stohastičkih metoda: MC i SC.



Slika 8.37 Upadno električno polje sastavljeno od direktne i komponente reflektirane iznad dvoslojne vodljive podloge

Pretpostavljeno je da izvor (antena) radi na frekvenciji od 936,8 MHz uz pripadajući prostorni dijagram zračenja (slika 8.38).



Slika 8.38 Horizontalni (plava) i vertikalni (crvena) dijagram zračenja izvora od interesa

Najveća dimenzija antene je 2 m, a s obzirom na spomenutu frekvenciju, valna duljina jednaka je približno 32 cm. Prema tablici 4.1 iz poglavlja 4 slijedi da daljinsko polje izvora nastupa na udaljenosti većoj od 10 m od izvora. Izabrane točke proračuna smještene su na visini od 1,5 m

iznad tla, a s obzirom na visinu antene od najmanje 19 m iznad tla i jednaku referentnu razinu podloge, osiguran je uvjet daljinskog polja izvora svih točaka proračuna od interesa. Pretpostavljena je najviša zračena snaga antene u iznosu od 58,45 dBm i radna frekvencija od 936,8 MHz uz mehanički i električni nagib od 0°.

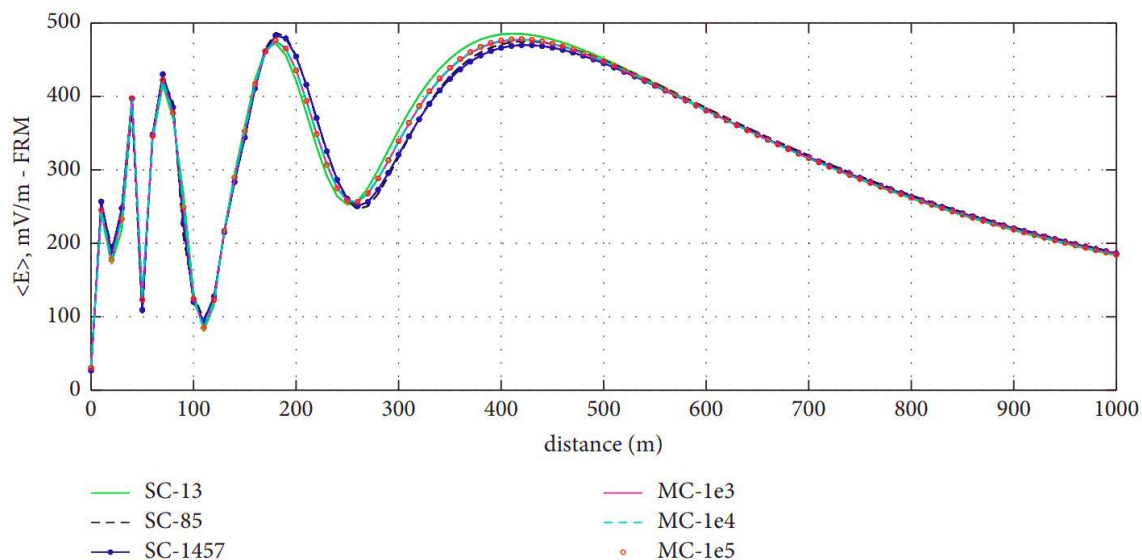
Ulazne varijable definirane su kao srednje vrijednosti (*mean*) uz određeno očekivano odstupanje (Δ), (tablica 8.6).

Tablica 8.6 Ulazne varijable za izračun polja u odabranim točkama

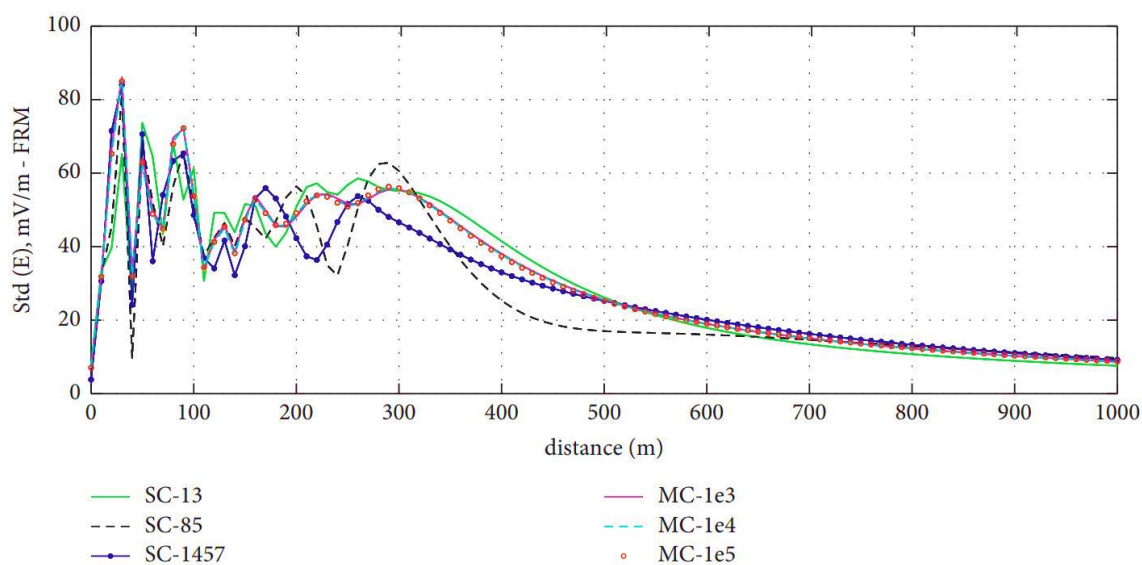
ulazni parametar	oznaka	[<i>min</i> , <i>mean</i> , <i>max</i>]	<i>mean</i> ± Δ (%)
visina antene	A_h (m)	[19, 20, 21]	20 m ± 5%
debljina prvog sloja podloge	d_h (cm)	[15, 20, 25]	20 cm ± 25%
relativna permitivnost prvog sloja	$\varepsilon_{r,1}$	[12, 15, 18]	15 ± 20%
specifična vodljivost prvog sloja	$\sigma_{r,1}$ (mS/m)	[0,8, 1, 1,2]	1 mS/m ± 20%
relativna permitivnost drugog sloja	$\varepsilon_{r,2}$	[3,2, 4, 4,8]	4 ± 20%
specifična vodljivost drugog sloja	$\sigma_{r,2}$ (mS/m)	[40, 50, 60]	50 mS/m ± 20%

Konvergencija stohastičkih metoda ispitana je mijenjanjem broja izvođenja determinističkih slučajeva (N). Ulazne simulacijske točke su n -dimenzionalne, odnosno 6-dimenzionalne (6-d) za potpuni stohastički model ili pak 1-dimenzionalne (1-d) za slučaj kada je jedan ulazni parametar postavljen kao promjenjiva varijabla, dok su ostali parametri postavljeni na srednju vrijednost. Pri MC metodi konvergencija ovisi isključivo o broju simulacija ($N_{MC} = N$). Razmatrana su tri slučaja konvergencije za $N_{MC} = 10^3$, $N_{MC} = 10^4$ i $N_{MC} = 10^5$. Smatra se da srednja vrijednost standardne devijacije dobivene uz $N_{MC} = 10^5$ predstavlja stvarnu stohastičku srednju vrijednost, odnosno stvarnu standardnu devijaciju. Pri SC pak metodi, broj izvođenja simulacija (N_{SC}) ovisi o dimenzionalnosti stohastičkog modela i broju točaka korištenih za numeričku evaluaciju integrala iz izraza (7.11). Za 1-d slučajeve odabrano je $N_{SC} = 3, 5, 9$ i 17 dok je za 6-d slučajeve odabrano $N_{SC} = 13, 85$ i 1457.

Konvergencija pri MC i SC metodi stohastičkog modela prikaza je na slikama 8.39 i 8.40 za FRM metodu izračuna koeficijenta refleksije.



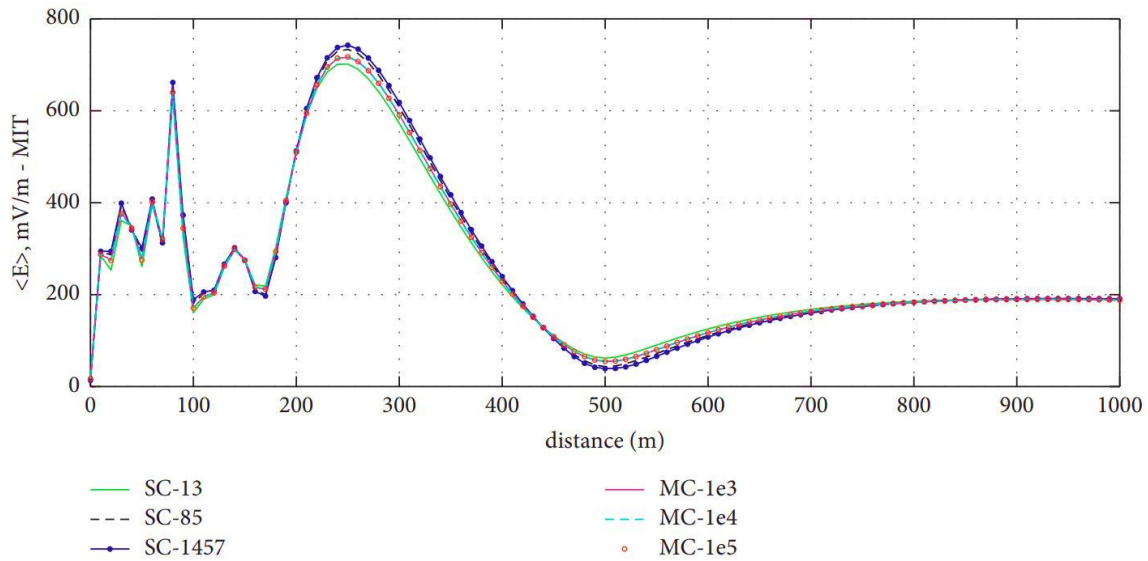
Slika 8.39 Srednja vrijednost jakosti električnog polja uz koeficijent refleksije dobiven FRM metodom



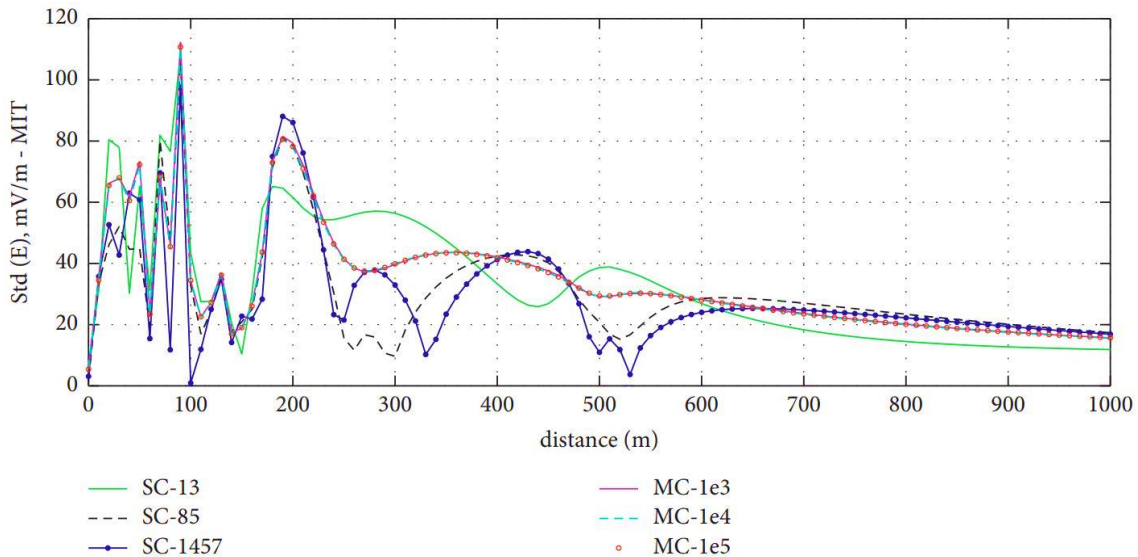
Slika 8.40 Standardna devijacija jakosti električnog polja uz koeficijent refleksije dobiven FRM metodom

Kako je vidljivo na slikama 8.39 i 8.40, MC metoda pokazuje izvrsnu konvergenciju već uz $N_{MC} = 10^3$. Sa druge pak strane, SC metoda ne pokazuje konvergenciju za odabrane vrijednosti N_{SC} pri izračunu standardne devijacije. Kako bi se postigla konvergencija, bilo bi potrebno povećati N_{SC} što ne bi više bilo efikasno u usporedbi s MC metodom uz $N_{MC} = 10^3$.

Konvergencija pri MC i SC metodi stohastičkog modela prikaza je na slikama 8.41 i 8.42 uz MIT metodu izračuna koeficijenta refleksije, a zaključak je istovjetan slučaju uz FRM metodu.



Slika 8.41 Srednja vrijednost jakosti električnog polja uz koeficijent refleksije dobiven MIT metodom

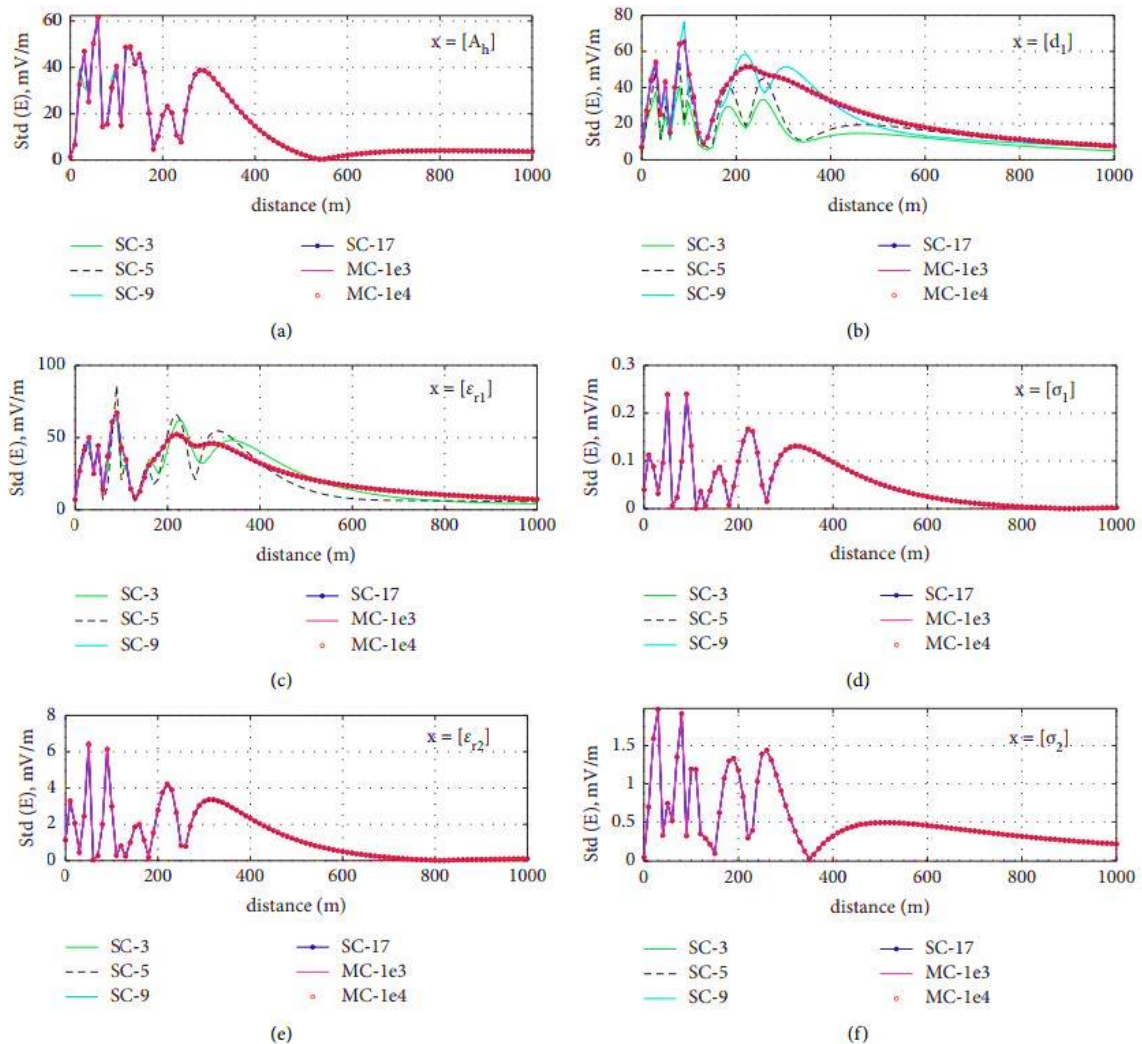


Slika 8.42 Standardna devijacija jakosti električnog polja uz koeficijent refleksije dobiven MIT metodom

Pa ipak, zgodno je primijetiti porast brzine konvergencije SC stohastičke metode na većim udaljenostima od bazne stanice ($d > 600$ m). Međutim, stvarna vrijednost standardne devijacije predimenzionirana je ili poddimenzionirana s apsolutnom pogreškom od 22 % za FRM, odnosno 35 % za MIT metodu proračuna.

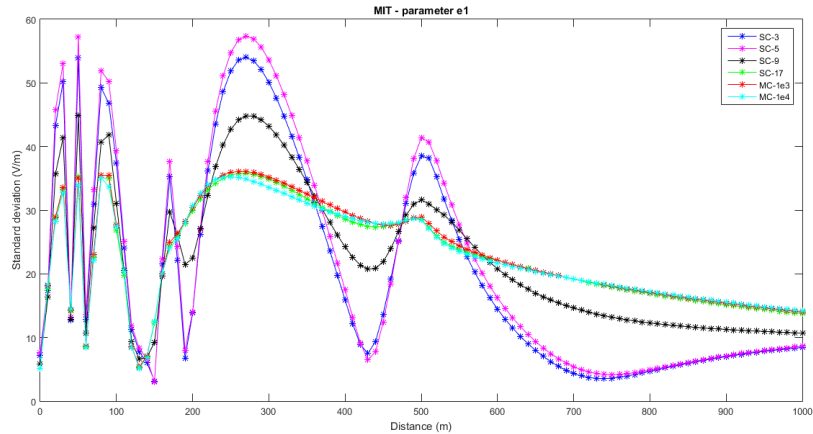
Razlog za lošu konvergenciju SC metode može se potražiti u ispitivanju konvergencija 1-d slučajeva. Standardne devijacije za 6 1-d slučajeva pri FRM metodi prikazane su na slici 8.43 gdje je jasno vidljiva konvergencija MC metode već uz $N_{MC} = 10^3$. Također, standardna

devijacija SC metode za 1-d slučajeve u kojima su kao varijabilni parametri uzeti A_h , σ_1 , ε_2 i σ_2 pokazuje dobru konvergenciju čak i pri najnižem broju simulacijskih točaka $N_{SC} = 3$ (slika 8.43 pod a, d, e i f). Prema tome, može se zaključiti kako varijacije spomenutih ulaznih parametara nemaju značajan utjecaj na konvergenciju ukupne standardne devijacije, odnosno pri 6-d slučaju. Kada se promatra standardna devijacija 1-d slučaja pri stohastičkoj metodi SC uz varijabilni parametar ε_1 (slika 8.43/c), konvergencija se postiže pri $N_{SC} = 9$, što znači da 9 kolokacijskih točaka u 6 1-d modela predstavlja ukupno $N_{SC} = 1457$ kolokacijskih točaka u 6-d stohastičkom modelu što je više od 10^3 simulacija pri stohastičkoj metodi MC. Pri 1-d slučaju u kojem je parametar d_1 uzet kao promjenjiva varijabla konvergencija pri stohastičkoj metodi SC postignuta je pri $N_{SC} = 17$ što prestaje biti efikasno kada se preslika na 6-d slučaj.

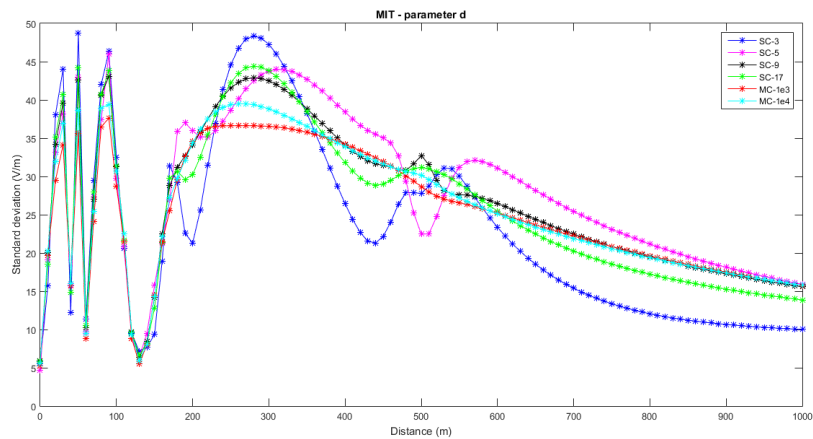


Slika 8.43 Standardne devijacije za 6 1-d slučajeva

Analogno vrijedi i pri analizi 1-d slučajeva pri MIT metodi izračuna (slike 8.44 i 8.45).

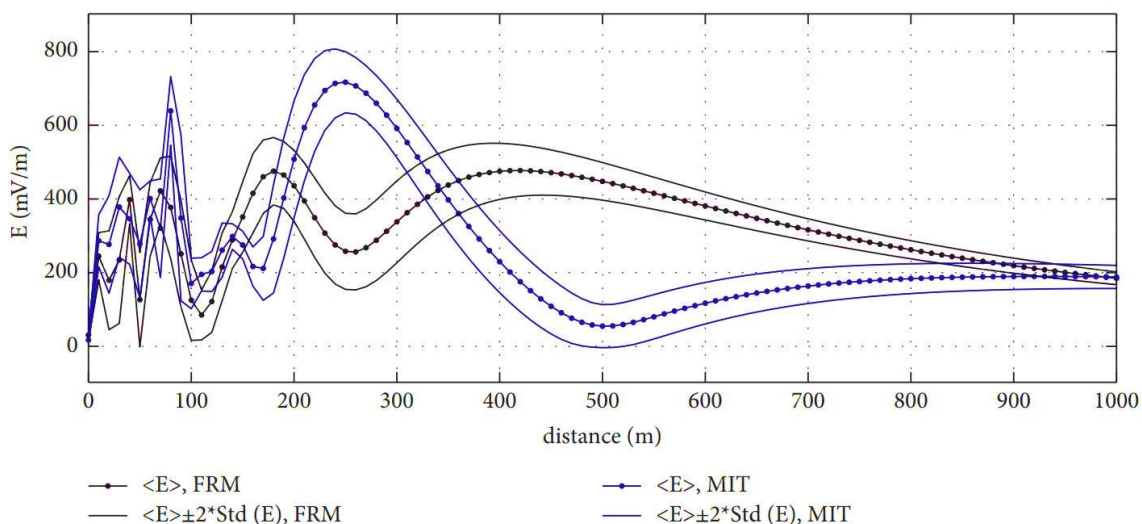


Slika 8.44 Standardna devijacija za 1-d slučaj pri varijabilnom ulaznom parametru ε_1 , stohastičkoj metodi SC i metodi izračuna MIT

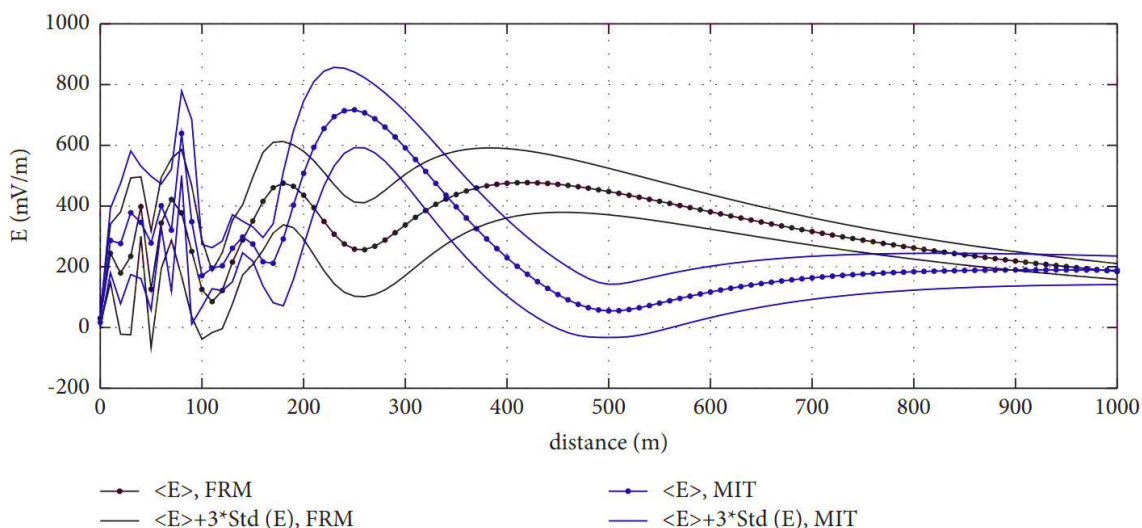


Slika 8.45 Standardna devijacija za 1-d slučaj pri varijabilnom ulaznom parametru d_1 , stohastičkoj metodi SC i metodi izračuna MIT

Budući da SC metodom nije postignuta konvergencija, srednja vrijednost jakosti električnog polja i interval pouzdanosti određeni su isključivo koristeći MC metodu. Korisno je spomenuti kako se interval pouzdanosti najčešće prikazuje kao dvostruka, odnosno trostruka standardna devijacija. Naime, dvostruka standardna devijacija označava preciznost od 95,5 %, a trostruka od 99,7 %. Za potrebe inženjerske prakse najčešće se koristi preciznost od 95 % [11]. Kao što je vidljivo iz slika 8.39 – 8.42, MC metoda s uzorkom od 10^3 simulacija nije pokazala veće odstupanje od slučaja s 10^4 i 10^5 simulacija. Stoga je u daljnjoj obradi rezultata dovoljno razmatrati slučaj s 10^3 simulacija. Srednje vrijednosti razina električnog polja uz dvostruku, odnosno trostruku standardnu devijaciju prikazane su na slikama 8.46 i 8.47.



Slika 8.46 Srednja vrijednost razine električnog polja uz dvostruku standardnu devijaciju pri MIT i FRM metodi izračuna koeficijenta refleksije



Slika 8.47 Srednja vrijednost razine električnog polja uz trostruku standardnu devijaciju pri MIT i FRM metodi izračuna koeficijenta refleksije

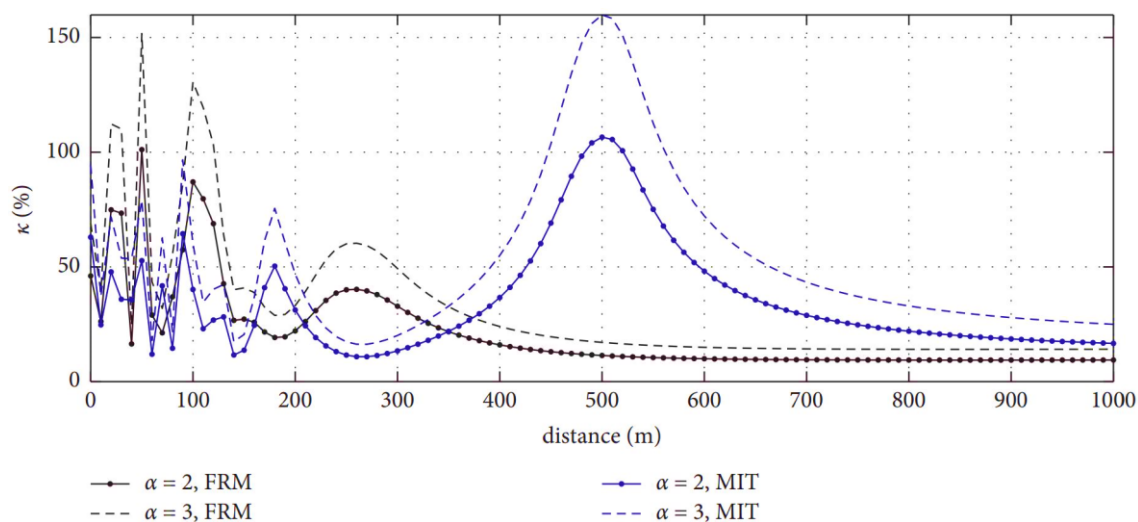
Iz slika 8.46 i 8.47 vidljive su velike varijacije u razinama polja u susjednim točkama pri manjim udaljenosti od izvora ($d < 150 \text{ m}$). Također, u određenim točkama proračuna događaju se preklapanja, a u pojedinim točkama proračuna vidljive su velike razlike u razinama polja dobivenim uz MIT, odnosno FRM metodu izračuna koeficijenta refleksije. Pri većim udaljenostima od izvora ($d > 750 \text{ m}$) srednje vrijednosti razina električnog polja dobivenih različitim metodama proračuna manje odstupaju. Iz priloženog se može zaključiti kako razina električnog polja dobivena proračunom uvelike ovisi o izboru metode proračuna koja uključuje razmatranje i reflektirane komponente EM vala. Za razmatrani slučaj vrijednosti polja

dobivene pri FRM metodi variraju između 100 mV/m i 500 mV/m, dok pri MIT metodi vrijednosti variraju između 50 mV/m i 700 mV/m.

S praktične strane zanimljivo je promotriti odnos dvostruke, odnosno trostruke standardne devijacije (polovina širine intervala pouzdanosti) i srednje vrijednosti električnog polja kako bi se dobio dojam o razini pogreške u odnosu na vrijednost polja:

$$\kappa_{\alpha} = \frac{\alpha \cdot Std(E)}{E} \cdot 100; \quad \alpha = 2, 3 \quad (AB)$$

Ustanovljeno je kako najviša moguća varijabilnost ne prelazi 107 % srednje vrijednosti polja pri dvostrukoj standardnoj devijaciji, odnosno 152 % pri trostrukoj standardnoj devijaciji bez obzira na odabir metode, (slika 8.48).

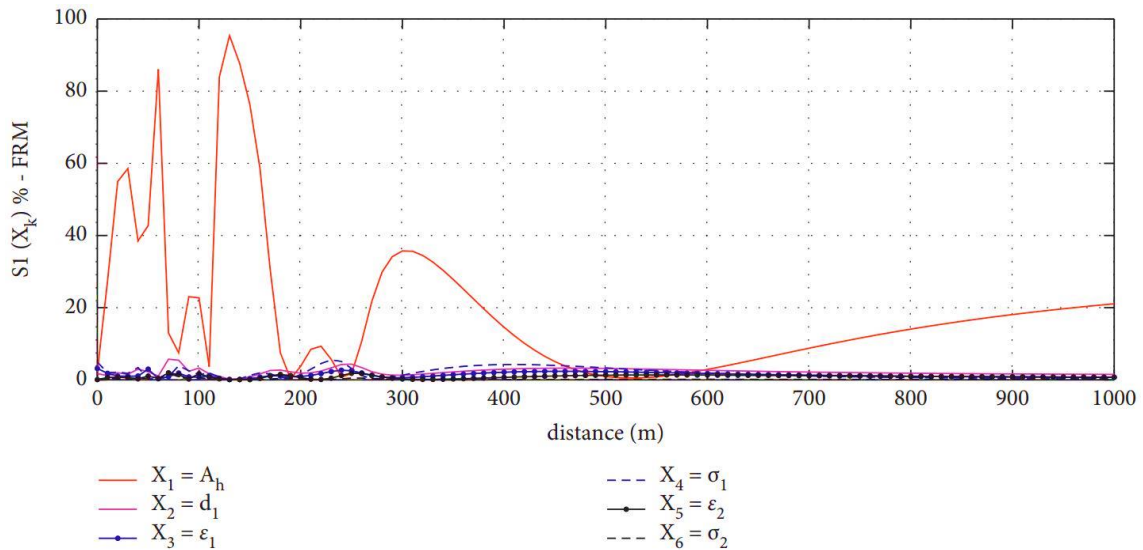


Slika 8.48 Odnosno dvostruke i trostruke standardne devijacije i srednje vrijednosti električnog polja

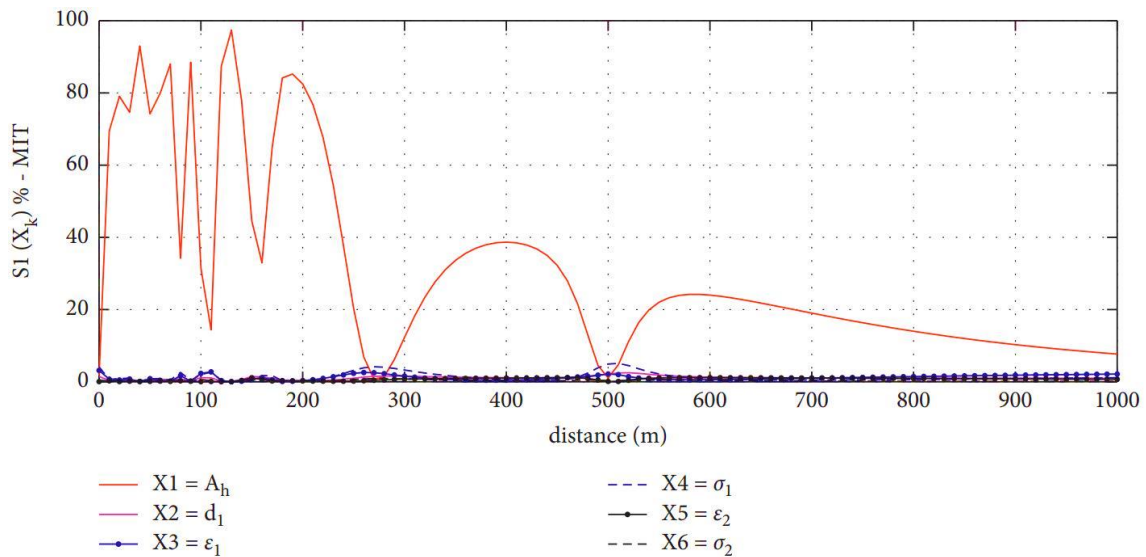
Prema tome, vidljivo je kako će u najgorem slučaju izloženosti vrijediti $E_{max} \leq 2,07 \cdot E_{mean}$ za slučaj prikaza rezultata u dvostrukoj preciznosti (95,5 %), odnosno $E_{max} \leq 2,52 \cdot E_{mean}$ za slučaj prikaza rezultata u trostrukoj preciznosti (99,7 %) neovisno o metodi proračuna.

Kako bi se ispitala razina utjecaja ulaznih parametara na izlaznu veličinu od interesa iskorišten je GSAT (*eng. Global Sensitivity Analysis Toolbox*) [51]. Analiza utjecaja ulaznih parametara provedena je kroz dva pristupa: ispitivanje utjecaja pojedinačnih varijabli (OAT) i ispitivanje utjecaja pojedine varijable u interakciji s ostalim varijablama (ANOVA).

Ispitivanjem pojedinačnog utjecaja ulaznih varijabli, jasno je vidljivo kako visina antene predstavlja najdominantniji parametar u gotovo svim točkama proračuna, neovisno o metodi proračuna (slike 8.49 i 8.50).



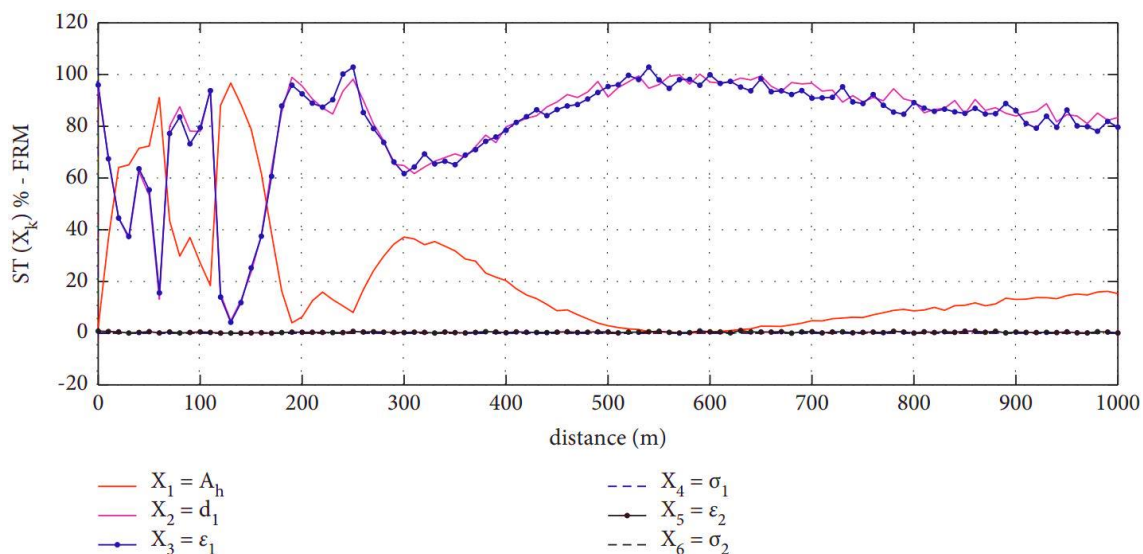
Slika 8.49 Razina pojedinačnog utjecaja ulazne varijable pri FRM metodi proračuna



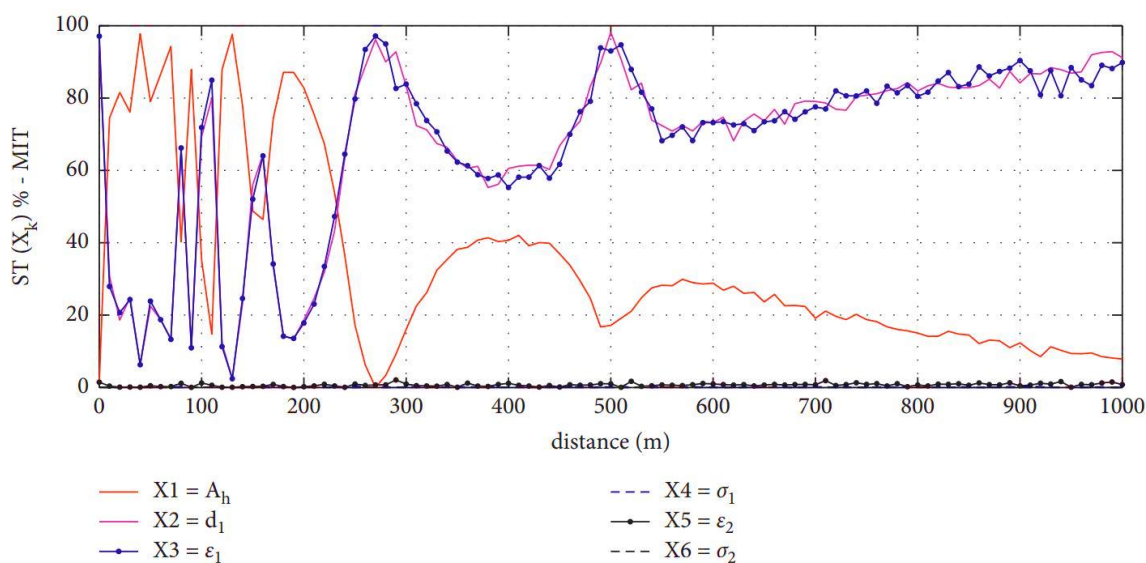
Slika 8.50 Razina pojedinačnog utjecaja ulazne varijable pri MIT metodi proračuna

Pojedinačni utjecaj ulaznih varijabli vidljiv je i na slici 8.43. Naime, usporedbom standardnih devijacija može se zaključiti kako visina antene, debljina prvog sloja tla te njegova relativna permitivnost imaju dominantan pojedinačni utjecaj na izlaznu veličinu. Više vrijednosti standardnih devijacija upućuju na višu razinu utjecaja varijable na izlaznu veličinu. Pa ipak, OAT pristup ne može otkriti utječe li pojedina varijabla samostalno na izlaznu vrijednost ili na izlaznu vrijednost utječe interakcija pojedine varijable s preostalim varijablama. Općenito govoreći, zbroj indeksa osjetljivosti prvog stupnja svih ulaznih varijabli mora biti jednak 1, odnosno 100 %. Ukoliko to nije postignuto, potrebno je pristupiti određivanju indeksa osjetljivosti višeg stupnja, odnosno ukupnog indeksa osjetljivosti, kako bi se odredio utjecaj

pojedine varijable u interakciji s preostalim varijablama. Ukupni indeksi osjetljivosti prikazani su na slikama 8.51 i 8.52.



Slika 8.51 Ukupni indeks osjetljivosti pojedine varijable pri FRM metodi proračuna



Slika 8.52 Ukupni indeks osjetljivosti pojedine varijable pri MIT metodi proračuna

Iz prikaza ukupnih indeksa osjetljivosti jasno je vidljiv dominantni utjecaj visine antene, ali i interakcija dviju ulaznih varijabli: debljina prvog sloja tla i njegoa relativna permitivnost. Iako debljina prvog sloja tla i njegoa relativna permitivnost nemaju značajan pojedinačni utjecaj na izlaznu veličinu (slike 8.4. i 8.50), njihova međusobna interakcija u nekim točkama dominantno utječe na varijabilnost izlazne veličine (slike 8.51 i 8.52). Može se primijetiti kako se pri manjim udaljenostima ($< \sim 250 \text{ m}$) izmjenjuje dominantni utjecaj visine antene s utjecajem interakcije parametara d_1 i ϵ_1 , dok pri većim udaljenostima dominantan utjecaj

preuzima isključivo interakcija parametara d_1 i ε_1 . Može se također zaključiti kako ostale varijable promatrane pojedinačno ili u međusobnoj interakciji nemaju značajan utjecaj na izlaznu veličinu ($< 5\%$).

Iz prikazanih rezultata vidljivo je kako proračunata razina polja u točki prostora uvelike ovisi o nesigurnosti ulaznih varijabli, ali i o izboru same metode proračuna. Iako na većim udaljenostima od bazne stanice izbor metode proračuna ne utječe značajno na razinu EM polja, u točkama proračuna bližim izvoru ($< \sim 800\text{ m}$) moguća su značajna pre-, odnosno poddimenzioniranja razina polja.

8.4. Stohastičko modeliranje razine specifične apsorpcije i gustoće transmitirane snage unutar dvoslojnog tkiva izloženog upadnom EM polju

Pod utjecajem vanjskog (upadnog) električnog polja u RF području u tkivu čovjeka apsorbira se EM energija. Kako bi se utjecaj apsorbirane energije na biološke mehanizme mogao detektirati i opisati, često se izloženo tkivo modelira kao višeslojni medij opisan električnim svojstvima i dimenzijama.

U ovoj disertaciji pretpostavljena je amplituda ulaznog vala u iznosi od 1 V/m frekvencije 10 GHz, 30 GHz i 90 GHz koji upada okomito na tkivo. Vrijednosti ulaznih parametara uzete su kako je prikazano u tablici 8.7. Pretpostavljena je i varijacija ulaznih parametara u iznosu od $\pm 20\%$ od zadanih srednjih vrijednosti.

Tablica 8.7 Srednje vrijednosti dielektričnih svojstava tkiva

		10 GHz	30 GHz	90 GHz
koža	ϵ_2	32,4090	16,6300	6,8260
	σ_2 (S/m)	8,4824	27,3100	41,9400
sloj masti	ϵ_3	4,6020	3,6390	2,9310
	σ_3 (S/m)	0,5850	1,7940	3,4110
sloj mišića	ϵ_3	42,7600	23,1600	9,3040
	σ_3 (S/m)	10,6300	35,4900	60,7200

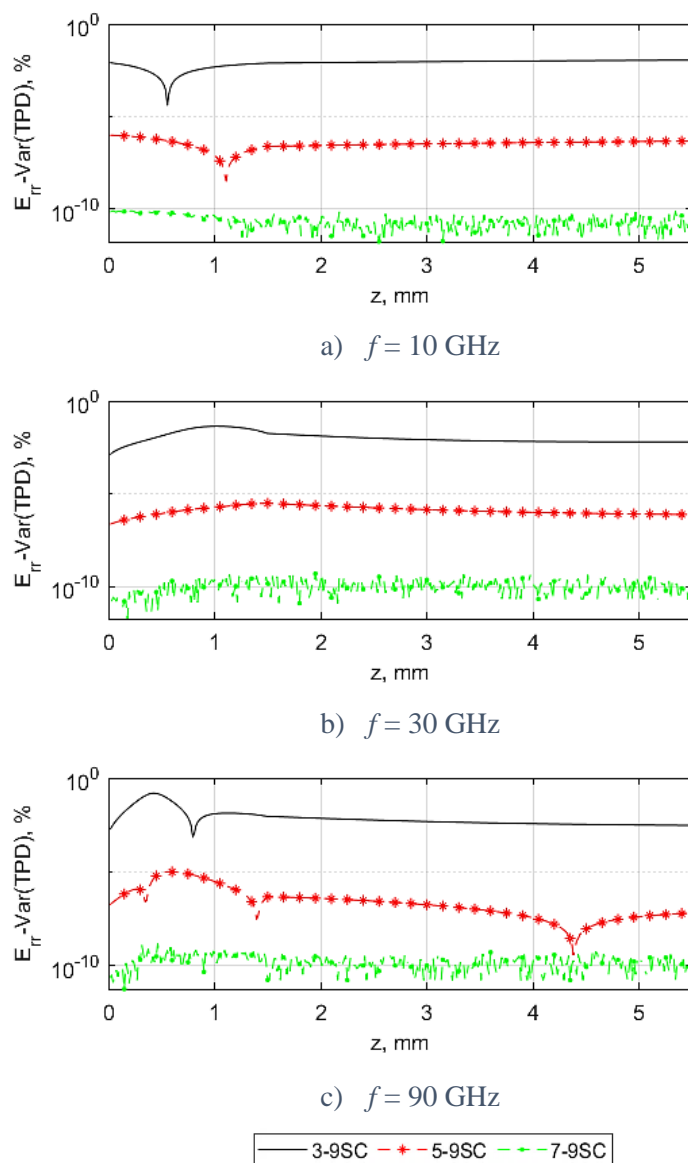
Za ispitivanje konvergencije SC metode iskorišteno je 3, 5, 7 i 9 kolokacijskih točaka dajući $N_{SC} = 81, 625, 2401$ i 6561 determinističkih uzorkovanja za izračun izlazne veličine od interesa. Konvergencija je ispitana razmatrajući apsolutnu relativnu pogrešku varijanci gustoće transmitirane snage (TPD) 1-dimenzionalnih slučajeva za 3, 5 i 7 i varijance za 9 kolokacijskih točaka prema:

$$E_{rr}(TPD) = \frac{|Var(TPD)_i - Var(TPD)_9|}{Var(TPD)_9} \cdot 100 \quad (X.32)$$

$$i = 3, 5, 7, 9$$

8.4.1. Tkivo sastavljeno od kože i sloja masti

Za slučaj tkiva sastavljenog od kože (medij 1) i sloja masti (medij 2) apsolutne relativne pogreške prikazane su na slici 8.53.

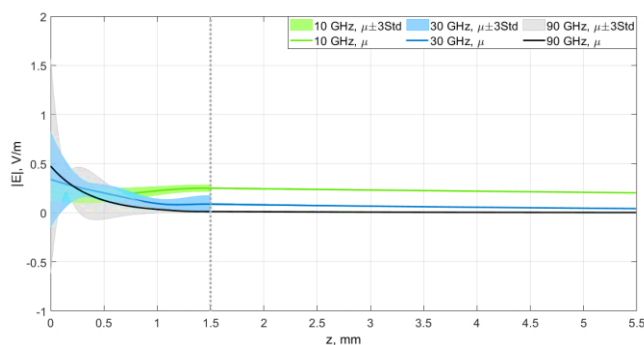


Slika 8.53 Konvergencija SC metode pri izračunu varijanci TPD. Referentna razina dobivena je iz varijance s 9 kolokacijskih točaka

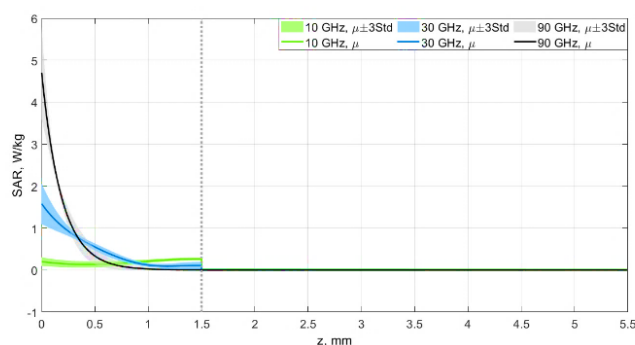
Najveća apsolutna pogreška pri $n = 3$ i $n = 9$ kolokacijskih točaka iznosi 0,0078 %, 0,0433 % i 0,1518 % pri frekvencijama od 10 GHz, 30 GHz, odnosno 90 GHz. Povećanjem broja kolokacijskih točaka, odnosno povećanjem broja determinističkih simulacija, razine apsolutnih pogrešaka opadaju. Sa druge pak strane, vidljiv je porast apsolutne pogreške s frekvencijom. Najviše apsolutne pogreške pri $n = 5$ kolokacijskih točaka redom iznose $9,07 \cdot 10^{-7}$ %, $3,05 \cdot 10^{-6}$ % i $9,74 \cdot 10^{-6}$ %, dok pri $n = 7$ kolokacijskih točaka iznose $7,37 \cdot 10^{-11}$ %, $5,02 \cdot$

$10^{-10} \%$ i $1,28 \cdot 10^{-9} \%$ pri frekvencijama od 10 GHz, 30 GHz, odnosno 90 GHz. Konvergencija je još bolja pri usporedbi varijanci za 4-dimenzionalne slučajeve, odnosno relativne pogreške još su manje.

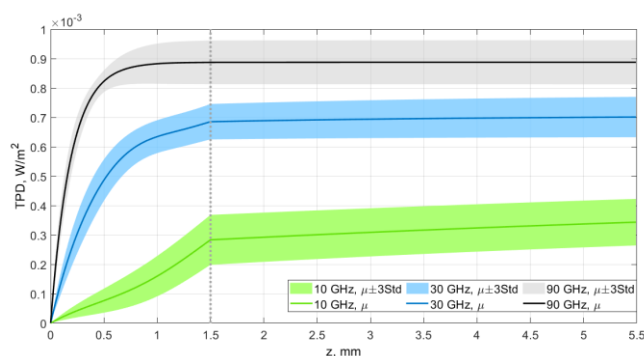
Srednje vrijednosti razina električnog polja (E_{inc}) u tkivu, SAR-a i TPD-a prikazane su uz interval pouzdanosti u iznosu trostruke standardne devijacije (slika 8.54).



a) srednja vrijednost i interval pouzdanosti unutarnjeg električnog polja ($|E_{inc}|$)



b) srednja vrijednost i interval pouzdanosti apsolutne vrijednosti SAR-a



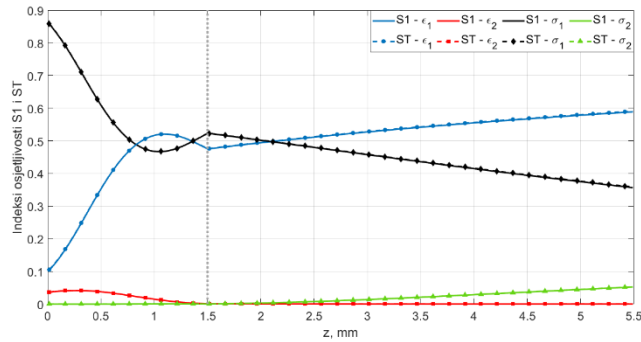
c) srednja vrijednost i interval pouzdanosti apsolutne vrijednosti TPD-a

Slika 8.54 Srednje vrijednosti veličina od interesa uz interval pouzdanosti od 3 standardne devijacije (koža + masno tkivo)

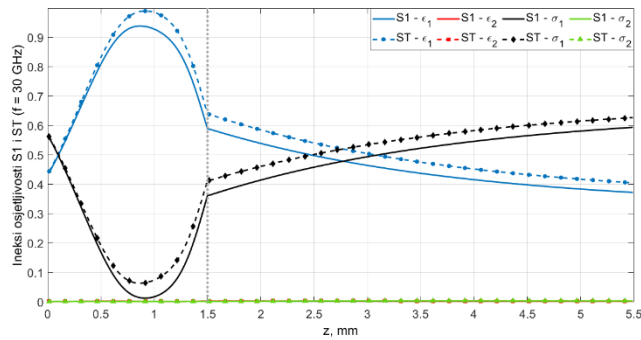
Interval pouzdanosti širi je pri većoj dubini izloženog tkiva u slučaju TPD-a (slika 8.54/c). Također, jasno je vidljivo i zasićenje krivulje TPD-a. Povećanjem frekvencije EM vala zasićenje nastupa na manjim dubinama izloženog tkiva. Štoviše, pri frekvencijama od 30 GHz

i 90 GHz zasićenje se događa već u sloju kože dok se pri frekvenciji od 10 GHz zasićenje postiže u sloju masti.

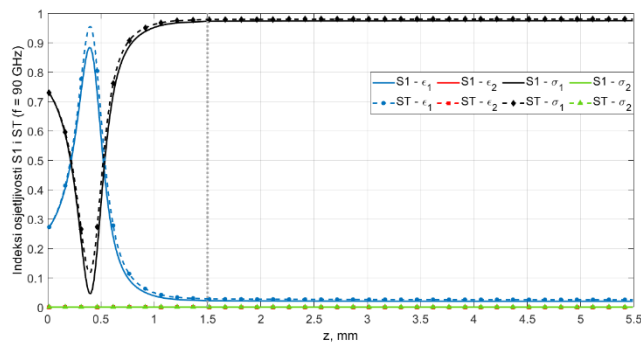
Analizom osjetljivosti (ANOVA metodom) određeni su indeksi osjetljivosti prvog reda (S1) i ukupni indeksi osjetljivosti (ST) pri svim trima frekvencijama (slika 8.55).



a) $f = 10 \text{ GHz}$



b) $f = 30 \text{ GHz}$



c) $f = 90 \text{ GHz}$

Slika 8.55 Indeksi osjetljivosti prvog reda i ukupni indeksi osjetljivosti ulaznih varijabli pri trima frekvencijama (koža + masno tkivo)

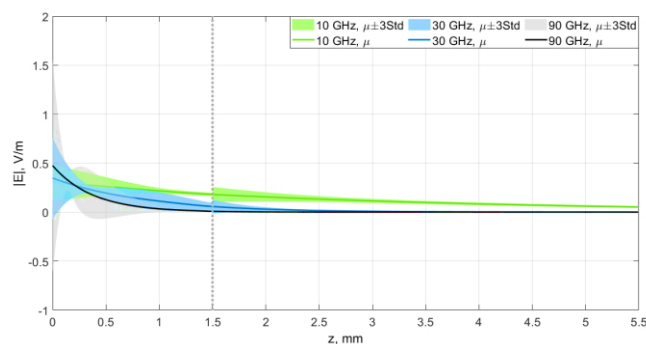
Iz slika 8.55 a, b i c vidljive su neznatne razlike u indeksima S1 i ST za sve ulazne varijable što inicira zaključak o nepostojanju međusobnih interakcija ulaznih varijabli koje bi imale značajan utjecaj na TPD.

Neovisno o frekvenciji EM vala, varijacije u dielektričnim svojstvima sloja masti nemaju značajan utjecaj na izračun TPD-a. Pri frekvenciji od 10 GHz indeksi osjetljivosti (S1 i ST) električnih svojstava sloja masti ispod su 5 %, a pri višim frekvencijama jednaki su 0 %.

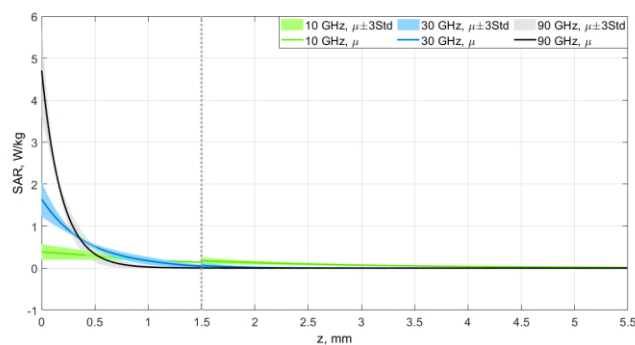
Stoga se može zaključiti kako na varijancu, odnosno interval pouzdanosti srednje vrijednosti TPD-a u najvećoj mjeri utječu električna svojstva kože. Dominantni utjecaji relativne permitivnosti, odnosno specifične vodljivosti kože izmjenjuju se s obzirom na dubinu tkiva, a ovise i o frekvenciji upadnog vala. Pri frekvenciji od 10 GHz u površinskim dijelovima kože dominantan utjecaj ima specifična vodljivost, a približavanjem granici koža-sloj masti utjecaj slabi, odnosno raste utjecaj relativne permitivnosti. Pri frekvenciji od 30 GHz u sloju kože dominantan utjecaj ima relativna permitivnost, dok dominantni utjecaj specifična vodljivost preuzima tek unutar sloja masti. Konačno, pri frekvenciji upadnog EM vala od 90 GHz dominantni utjecaj dielektričnih svojstava kože izmjenjuje se ovisno o dubini, a unutar sloja masti dominantni učinak isključivo preuzima specifična vodljivost.

8.4.2. Tkivo sastavljeno od kože i sloja mišića

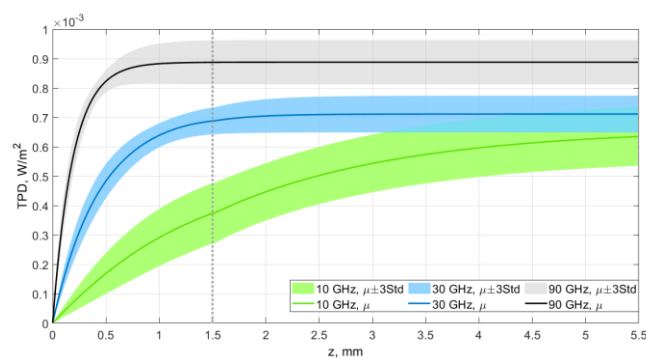
Za slučaj tkiva sastavljenog od kože (medij 1) i sloja mišića (medij 2) srednje vrijednosti veličina E_{inc} , SAR i TPD i interval pouzdanosti iskazan kroz trostruku standardnu devijaciju prikazani su na slici 8.56.



a) srednja vrijednost i interval pouzdanosti apsolutne vrijednosti E_{inc}



b) srednja vrijednost i interval pouzdanosti apsolutne vrijednosti SAR-a

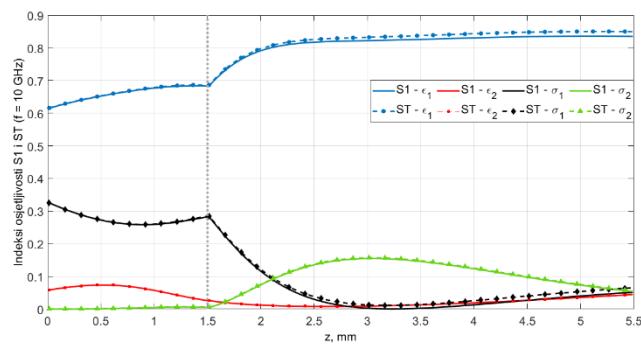


c) srednja vrijednost i interval pouzdanosti apsolutne vrijednosti TPD-a

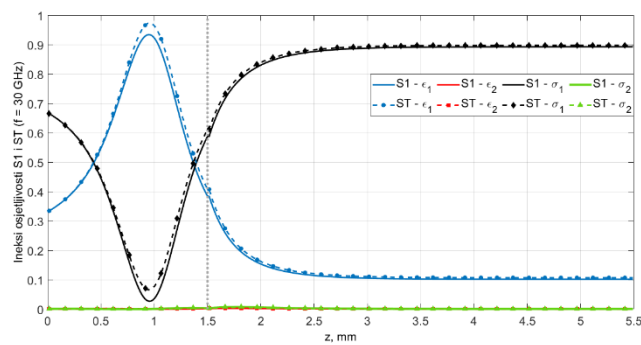
Slika 8.56 Srednje vrijednosti veličina od interesa uz interval pouzdanosti od 3 standardne devijacije (koža + mišićno tkivo)

Uspoređujući dva slučaja s različitim potkožnim tkivom (masno/mišićno tkivo) može se zaključiti kako razlike u srednjim vrijednostima, tj. intervalima pouzdanosti veličina od interesa opadaju porastom frekvencije. Pri frekvenciji od 90 GHz nema razlike u vrijednostima veličina E_{inc} , SAR i TPD, dok se pri frekvenciji od 30 GHz razlike mogu smatrati beznačajnima. Ipak, pri frekvenciji od 10 GHz razlike su očigledne.

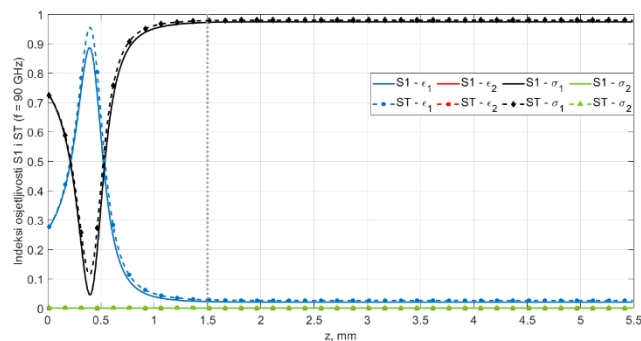
Ako se za slučaj modela tkiva "koža + mišićni sloj" razmotre indeksi osjetljivosti S1 i ST promjenjivih ulaznih varijabli, zaključak je sličan prethodnom slučaju ("koža + masni sloj") (slika 8.57).



a) $f = 10 \text{ GHz}$



b) $f = 30 \text{ GHz}$



c) $f = 90 \text{ GHz}$

Slika 8.57 Indeksi osjetljivosti prvog reda i ukupni indeksi osjetljivosti ulaznih varijabli pri trima frekvencijama (koža + mišićno tkivo)

Naime, parametri mišićnog sloja nemaju značajan utjecaj na razinu TPD-a, neovisno o frekvenciji upadnog vala. Utjecaj električnih parametara kože u ovom slučaju jednak je kao i pri modelu "koža + masni sloj" pri frekvenciji od 90 GHz. Pri 30 GHz S1 i ST indeksi električnih svojstava kože pokazuju sličnu tendenciju uz uočljive razlike u ovisnosti o dubini kože, odnosno potkožnog tkiva. Najveće razlike u indeksima osjetljivosti vidljive su pri frekvenciji od 10 GHz gdje dominantan utjecaj, neovisno o dubini tkiva, ima isključivo relativna permitivnost kože.

9. Zaključak

Razvojem bežične tehnologije povećava se razina umjetno stvorenih elektromagnetskih polja visokih frekvencija. Pojavom nove 5G tehnologije posebno raste zabrinutost javnosti za mogući štetni učinak takvih polja na zdravlje. Budući da je utvrđen učinak visokofrekvencijskih elektromagnetskih polja u vidu povišenja temperature tijela, odnosno dijela tijela, a postoje indicije i na brojne druge učinke, znanstvene organizacije nastoje definirati granične razine kako bi se izbjegla prekomjerna izloženost, odnosno mogući negativni učinak za zdravlje. U tu svrhu od iznimne su važnosti mjerenja i proračuni razina elektromagnetskih polja u okolini baznih stanica.

Svrha ove doktorske disertacije je pružiti uvid u mjerne metode i metode proračuna incidentnog električnog polja u okolini bazne stanice. Posebna pozornost posvećena je ispitivanju pouzdanosti mjernih metoda u 5G frekvencijskom području. Stoga su iznijete smjernice za primjenu pojedine mjerne metode, ali i poteškoće u njihovom provođenju, s čime se inženjerska struka svakodnevno susreće. Rezultati mjerenja uspoređeni su s razinama polja dobivenim različitim metodama proračuna u kojima se osim upadnog snopa zračenja u obzir uzima i komponenta polja reflektirana od dvoslojne podloge. Koeficijenti refleksije dobiveni su iz tri metode: refleksija iznad idealno vodljive podloge, Fresnelova aproksimacija za ravni val te modificirana metoda preslikavanja. Posebna pozornost posvećena je izračunu faktora refleksije iz FRM i MIT metoda proračuna čiji su konačni izrazi izvedeni u poglavlju 5.1.

U okviru determinističkog modeliranja istraženi su posebni slučajevi parametara koji opisuju reflektirajuću podlogu (relativna permitivnost, specifična vodljivost i debljina gornjeg sloja podloge). Iz prikazanih rezultata dade se ustanoviti u kojim od istraživanih slučajeva dvoslojna reflektirajuća podloga ima značajan utjecaj na ukupnu razinu polja u usporedbi s pojednostavnjenom, jednoslojno modeliranom podlogom.

Značajno detaljnija analiza proračuna razine električnog polja dana je u poglavlju 8.3. Naime, umjesto fiksnih ulaznih varijabli, u obzir je uzeto i odstupanje pojedine varijable u odnosu na postavljenu srednju vrijednost. Budući da se pri izradi proračuna razina električnog polja u okolini bazne stanice neke od varijabli određuju na terenu izravnim mjerenjem ili pak iščitavaju iz pribavljene dokumentacije, pri njihovom definiranju moguća je pogreška. Propagacijom unesene pogreške od ulaza u model proračuna prema konačnoj, izlaznoj veličini od interesa, provedena je kvantifikacija nesigurnosti primjenom dvije stohastičke metode: Monte Carlo

(MC) i stohastička kolokacija (SC). Konvergencija stohastičkih metoda ispitana je mijenjanjem broja determinističkih proračuna. Dok je MC metoda pokazala sasvim zadovoljavajuću konvergenciju već pri broju izvođenja simulacija 10^3 , SC metoda nije pokazala konvergenciju za odabrane vrijednosti izvođenja simulacija, bez obzira na odabranu metodu izračuna koeficijenta refleksije (FRM, odnosno MIT). Analizom osjetljivosti varijabilnih ulaznih parametara proizašlo je kako visina antene predstavlja najdominantniji pojedinačni parametar u gotovo svim točkama proračuna, neovisno o metodi proračuna. Razmatranjem pak skupnog utjecaja svih definiranih ulaznih varijabli ustanovljen je dominantni utjecaj visine antene, ali i međusobne interakcije dviju ulaznih varijabli: debljine gornjeg sloja tla i njegove relativne permitivnosti. Konačno, iz prikazanih srednjih vrijednosti i dvostrukog, odnosno trostrukog standardnog odstupanja pri MC stohastičkoj metodi te analize osjetljivosti ulaznih parametara, može se zaključiti kako razina električnog polja uvelike ovisi o izboru metode koja uključuje razmatranje i reflektirane komponente EM vala, ali i o definiranoj nesigurnosti ulaznih varijabli.

Dodatni doprinos ove disertacije pružen je i u analizi dozimetrije unutarnjeg polja. Naime, u poglavlju 6.3. dan je izvod izraza za razinu specifične apsorpcije (SAR), odnosno gustoću transmitirane snage (TPD) unutar dvoslojnog vodljivog tkiva. Prvi sloj tkiva predstavljen je slojem kože, a drugi (donji) sloj tkiva slojem masti u prvom, odnosno slojem mišića u drugom slučaju. Svaki sloj tkiva zasebno je opisan debljinom, specifičnom vodljivošću i relativnom permitivnosti, a definirane srednje vrijednosti uzete su uz varijaciju od 20 % od postavljenih srednjih vrijednosti. Ispitivanje SAR-a, odnosno TPD-a provedeno je pri trima različitim frekvencijama upadnog vala: 10 GHz, 30 GHz, odnosno 90 GHz. Kvantifikacija nesigurnosti ulaznih varijabli provedena je stohastičkom kolokacijom, a srednje vrijednosti razina unutarnjeg električnog polja, SAR-a i TPD-a prikazane su uz trostruku standardnu devijaciju.

I u ovom su slučaju analizom osjetljivosti prikazane razine utjecaja pojedinih ulaznih varijabli kao i njihov skupni utjecaj. Ustanovljeno je kako na interval pouzdanosti u najvećoj mjeri utjecaj ima prvi sloj tkiva (koža). Pri višim frekvencijama ($f > 10$ GHz) taj utjecaj još je više izražen, odnosno može se reći kako donji sloj tkiva (sloj masti ili sloj mišića) ima zanemariv utjecaj.

Od definiranih ulaznih varijabli dominantni utjecaj, za slučaj tkiva "koža + masni sloj", imaju relativna permitivnost i specifična vodljivost kože čija razina utjecaja varira s obzirom na frekvenciju, odnosno dubinu tkiva. Za slučaj tkiva "koža + mišićni sloj" pri $f = 10$ GHz

dominantan utjecaj ima relativna permitivnost kože. Povišenjem frekvencije na 30 GHz, odnosno 90 GHz, utjecaj parametara kože vrlo je sličan kao i u slučaju tkiva "koža + masni sloj".

Doktorska disertacija izrađena je s ciljem unaprjeđenja postojećih metoda za mjerenje i proračun razina električnog polja u blizini bazne stanice. Ispitivanjem pouzdanosti mjernih metoda ukazano je na mogućnost njihove primjene i poteškoće s kojima se mjeritelji na terenu mogu susresti. Primjenom stohastičke analize pružen je uvid u pojedinačni i skupni utjecaj osnovnih ulaznih parametara za proračun s ciljem smanjenja mogućnosti poddimenzioniranja, ali i višestrukog predimenzioniranja razina polja. Na kraju, jednostavnim modelom upadnog polja pružena je mogućnost primjene izmjerenih i proračunatih razina vanjskog polja na izračun veličina unutarnje dozimetrije: SAR-a i TPD-a. Stohastičkom analizom, odnosno analizom osjetljivosti, i u ovom slučaju ispitan je pojedinačni i skupni utjecaj veličina kojima je opisano izloženo tkivo. Uz moguću primjenu u inženjerstvu, dodatna svrha ove disertacije je pomoći u izradi smjernica koje su od iznimne važnosti za postojeću i nadolazeću bežičnu telekomunikacijsku tehnologiju.

10. Reference

- [1] D. Poljak, Teorija elektromagnetskih polja s primjenama u inženjerstvu, Zagreb: Skolska knjiga, 2014.
- [2] C. Itoh, »A History of Wireless Communication and Yokogawa's Approach«, Yokogawa, 2013. [Mrežno]. Available: <https://www.yokogawa.com/eu/library/resources/yokogawa-technical-reports/a-history-of-wireless-communication-and-yokogawas-approach/>. [Pokušaj pristupa siječanj 2023].
- [3] »RF Page«, srpanj 2022. [Mrežno]. Available: <https://www.rfpage.com/history-of-wireless-communication-morse-code-to-5g-technology/>. [Pokušaj pristupa siječanj 2023].
- [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 srpanj 2022].
- [7] »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].
- [8] Ministarstvo Zdravlja, »Pravilnik o zdravstvenim uvjetima kojima moraju udovoljavati radnici koji obavljaju poslove s izvorima neionizirajućeg zračenja«, *Narodne Novine*, 2016.
- [9] »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.
- [10] »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.

-
- [11] »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 62232:2022; EN IEC 62232:2022)*, 2022.
- [12] »Hrvatska norma HRN EN 50492,« *Osnovna norma za in-situ mjerenja jakosti elektromagnetskog polja s obzirom na izloženost ljudi u blizini baznih postaja*, 2012.
- [13] »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.
- [14] »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.
- [15] »Hrvatska norma HRN EN 61566,« *"Mjerenje izlaganja radiofrekvencijskim elektromagnetskim poljima – Jakost polja u frekvencijskom opsegu 100 kHz do 1 GHz"*, 1997.
- [16] »HRN EN 50413,« *Basic Standard on Measurement and Calculation Procedures for Human Exposure to Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields (0 Hz - 300 GHz) (EN 50413:2008)*, 2012.
- [17] T. Takashima, T. Nakae i R. Ishibashi, »Calculation of Complex Fields in Conducting Media,« *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, pp. 1-7, veljača 1980.
- [18] »World Health Organization,« [Mrežno]. Available: <https://www.who.int/peh-emf/about/WhatisEMF/en/>. [Pokušaj pristupa rujan 2020].
- [19] 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.
- [20] S. Persia, C. Carciofi, S. D'Elia i R. Suman, »EMF evaluations for future networks based on Massive MIMO,« *29th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, 2018.
- [21] 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.
- [22] B. Thors, A. Furuskar, D. Colombi i C. Tornevik, »Time-Averaged Realistic Maximum Power Levels for the Assessment of Radio Frequency Exposure for 5G Radio Base Stations Using Massive MIMO,« *IEEE Access*, pp. 1-1, September 2017.

-
- [23] M. Wenhua, M. Huaxing i G. Peng, »The EMF Radiation Calculation and Measurement for Smart Antenna,« *Association for Computing Machinery*, 2010.
- [24] 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.
- [25] H. Keller, »On the Assessment of Human Exposure to Electromagnetic Fields Transmitted by 5G NR Base Stations,« *Health Physics*, travanj 2019.
- [26] 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.
- [27] S. Aerts, D. Colombi, K. Deprez, L. Verloock, M. Bossche, L. Martens, C. Tornevik i W. Joseph, »In Situ Assessment of 5G NR Massive MIMO Base Station Exposure in a Commercial Network in Bern, Switzerland,« *Applied Sciences*, travanj 2021.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] R. Pawlak, P. Kraiwec i J. Zurek, »On Measuring Electromagnetic Fields in 5G Technology,« *IEEE Access*, veljača 2019.
- [31] D. Franci, S. Coltellacci, E. Grillo, S. Pavoncello, T. Aureli, R. Cintoli i M. Migliore, »An Experimental Investigation on the Impact of Duplexing and Beamforming Techniques in Field Measurements of 5G Signals,« *Electronics*, p. 223, January 2020.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] 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.

-
- [35] G. C. Van Rhoon, T. Samaras, P. S. Yarmolenko, M. W. Dewhurst, 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.
- [36] P. Bernardi, M. Cavagnaro, S. Pisa i E. Piuzzi, »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.
- [37] B. Thors, M. Strydom, B. Hansson i C. Tornevik, »On the Estimation of SAR and Compliance Distance Related to RF Exposure From Mobile Communication Base Station Antennas,« *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, prosinac 2008.
- [38] 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.
- [39] 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.
- [40] 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*, rujan 2009.
- [41] S. I. Aleksev i M. C. Ziskin, »Human Skin Permittivity Determined by Millimeter Wave Reflection Measurements,« *Bioelectromagnetics*, pp. 28:331-339, 2007.
- [42] S. I. Aleksev i M. C. Ziskin, »Influence of Blood Flow and Millimeter Wave Exposure on Skin Temperature in Different Thermal Models,« *Bioelectromagnetics*, 2009.
- [43] S. I. Aleksev, A. A. Radzievsky, M. K. Logani i M. C. Ziskin, »Millimeter Wave Dosimetry of Human Skin,« *Bioelectromagnetics*, siječanj 2008.
- [44] A. Owda, N. Salmon, A. Casson i M. Owda, »The Reflectance of Human Skin in the Millimeter-Wave Band,« *Sensors*, 2020.
- [45] A. Šušnjara, D. Poljak i I. Matić, »Analysis of SAR in a Simplified Body Model due to a Short Dipole Antenna Radiation«.
- [46] D. Poljak, A. Susnjara i A. Dzolic, »Assessment of Transmitted Power Density due to Radiation from Dipole Antenna of Finite Length : Part I: Theoretical background and current distribution,« *Conference: 2021 International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM)*, 2021.

-
- [47] D. Poljak, A. Susnjara i A. Dzolic, »Assessment of Transmitted Power Density due to Radiation from Dipole Antenna of Finite Length : Part II: Transmitted field, volume power density and transmitted power density,« *Conference: 2021 International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM)*, 2021.
- [48] M. Bonato, L. Dossi, S. Gallucci, M. Benini, G. Tognola i M. Parazzini, »Assessment of Human Exposure Levels Due to Mobile Phone Antennas in 5G Networks,« *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022.
- [49] 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.
- [50] A. Šušnjara, Kvalifikacijski ispit: Stohastički pristupi u računalnom elektromagnetizmu - primjene u bioelektromagnetizmu, Split: Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, 2019.
- [51] »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].
- [52] M. Galic i D. Poljak, »Theoretical and Experimental Incident Field Dosimetry for GSM Base Stations,« *2019 URSI International Symposium on Electromagnetic Theory (EMTS)*, 2019.
- [53] 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.
- [54] M. Galic, D. Poljak i V. Doric, »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.
- [55] 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.
- [56] 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, September 2018.

-
- [57] 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.
- [58] M. Galic, A. Susnjara i D. Poljak, »Stochastic-Deterministic Assessment of Electric Field Radiated by Base Station Antenna above a Two-Layered Ground,« *Mathematical Problems in Engineering*, May 2022.
- [59] D. Poljak, M. Galić i L. Pajewski, »Human Exposure to Electromagnetic Signals with Continuous Spectra,« *EuCAP 2020 Proceedings*, pp. 1-5, 2020.
- [60] M. Galić, M. Crnolatic i D. Poljak, »On 5G Radiated Field Measurement/Calculation Procedures and Exposure Compliance Limits,« *The 30th International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks*, rujan 2022.
- [61] D. Poljak, »Izloženost ljudi zračenju antenskih sustava baznih postaja – dozimetrija upadnog polja,« *Sigurnost*, veljača 2012.
- [62] 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.
- [63] »Advanced Antenna Systems for 5G Networks,« *Ericsson white paper*, studeni 2018.
- [64] D. Poljak, »Izloženost ljudi neionizirajućim elektromagnetskim poljima od ekstremno niskih do mikrovalnih frekvencija,« Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, Split, Hrvatska, 2010.
- [65] 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.
- [66] 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.
- [67] 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.
- [68] »Ministarstvo zdravlja,« 2014. [Mrežno]. Available: https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2014_12_146_2740.html. [Pokušaj pristupa siječanj 2022].
- [69] J. E. Moulder, L. S. Erdereich, 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.

-
- [70] 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.
- [71] 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.
- [72] 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.
- [73] A. Vishnu, »<https://www.linkedin.com/pulse/how-do-1g-2g-3g-4g-technologies-work-vishnu-aggarwal/>,« 7. siječanj 2022. [Mrežno]. [Pokušaj pristupa 28. veljača 2023].
- [74] H. Kheddar, »From 2G to 4G Mobile Network: Architecture and Key Performance Indicators,« Department of Electrical engineering, University of Medea, Medea, 2022.
- [75] M. Jaloun i Z. Guennoun, »Wireless Mobile Evolution to 4G Network,« *Wireless Sensor Network*, pp. 309-317, 2010.
- [76] COMREG, Programme of Measurement of Non-Ionising Radiation Emissions, Dublin, 2014.
- [77] S. Patel, V. Shah i M. Kansara, »Comparative Study of 2G, 3G and 4G,« *International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology*, pp. 2456-3307, 2018.
- [78] 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.
- [79] T. Kopacz, »Massive MIMO Antennas – Impact on Compliance Distances and Challenges for Human Exposure Assessment,« u *Electromagnetic field and the future of telecommunications. Research. Monitoring. Domestic and foreign experience.*, 2019.
- [80] M. Kottkamp, A. Pandey, D. Raddino, A. Roessler i R. Stuhlfauth, 5G New Radio. Fundamental Procedures and Technical Aspects, Njemačka: Rhode&Schwarz, 2019.
- [81] »Base Station,« ožujak 2021. [Mrežno]. Available: <https://www.techtarget.com/whatis/definition/base-station>. [Pokušaj pristupa siječanj 2023].
- [82] J. Malchman, »Galooli,« siječanj 2022. [Mrežno]. Available: <https://galooli.com/glossary/what-is-a-base-station/>. [Pokušaj pristupa siječanj 2023].

-
- [83] »Cellular Base Stations,« rujan 2015. [Mrežno]. Available: https://ethw.org/Cellular_Base_Stations. [Pokušaj pristupa siječanj 2023].
- [84] M. Galić, *Efikasni postupci elektromagnetsko-toplinske dozimetrije kod izloženosti ljudi poljima baznih stanica*, Fakultet elektrotehnike strojarstva i brodogradnje, Split: Kvalifikacijski doktorski ispit, 2022.
- [85] »White Paper: Antenna Patterns and Their Meaning,« 2007. [Mrežno]. Available: <https://www.industrialnetworking.com/pdf/Antenna-Patterns.pdf>. [Pokušaj pristupa siječanj 2023].
- [86] M. D. Foegelle, »ETS Lindgren,« 2002. [Mrežno]. Available: <https://www.ets-lindgren.com/WhitePapers/APM.pdf>. [Pokušaj pristupa siječanj 2023].
- [87] »Circuit Design, Inc.,« [Mrežno]. Available: https://www.cdt21.com/design_guide/gain-eirp-and-erp/. [Pokušaj pristupa siječanj 2023].
- [88] C. Wolf, »radartutorial.eu,« [Mrežno]. Available: <https://www.radartutorial.eu/08.transmitters/tx57.en.html>. [Pokušaj pristupa siječanj 2023].
- [89] »www.sharetechnote.com,« [Mrežno]. Available: https://www.sharetechnote.com/html/RF_Antenna.html. [Pokušaj pristupa siječanj 2023].
- [90] J. R. Mosig i A. Michalski, »Sommerfeld Integrals and Their Relation to the Development of Planar Microwave Devices,« *IEEE Journal of Microwaves*, pp. 470-480, siječanj 2021.
- [91] HAKOM, »Uputa za procjenu izloženosti elektromagnetskim poljima za bazne postaje s adaptivnim antenskim sustavima u pokretnim komunikacijskim mrežama u frekvencijskom području do 6 GHz,« Zagreb.
- [92] 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.
- [93] N. A. Ibrahim, T. A. Rahman i O. Elijah, »Recent Trend in Electromagnetic Radiation and Compliance Assessments for 5G Communication,« *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, pp. 912 - 918, 2017.
- [94] »Federal Institute of Metrology METAS,« *Technical Report: Measurement Methods for 5G NR Base Stations up to 6 GHz*, 2020.

-
- [95] 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.
- [96] D. Colombi, P. Joshi, B. Xu, C. Di Paola i C. Tornevik, »Methods and Practices for In Situ Measurements of RF EMF Exposure From 5G Millimeter of RF EMF Exposure From 5G Millimeter,« *IEEE Transactions on Electroamgnetic Compatibility*, pp. 1986-1993, prosinac 2022.
- [97] A. Kanazaki, 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.
- [98] T. Hamed i M. Maqsood, »SAR Calculation & Temperature Response of Human Body Exposure to Electromagnetic Radiations at 28, 40 and 60 GHz mmWave Frequencies,« *Progress In Electromagnetics Research*, pp. 47 - 59, 2018.
- [99] J. F. Bakker, M. M. Paulides, N. Kuster i G. Van Rhoon, »Assessment of induced SAR in children exposed to electromagnetic plane waves between 10 MHz and 5.6 GHz,« *Physics in Medicine and Biology*, lipanj 2010.
- [100] C. Gabriel, S. Gabriel i E. Corthout, »The Dielectric Properties of Biological Tissues: I. Literature Survey,« *Physics in Medicine and Biology*, prosinac 1996.
- [101] 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.
- [102] 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.
- [103] 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.
- [104] A. Destruel, K. O'Brien, J. Jin, F. Liu, M. Barth i S. Crozier, »Adaptive SAR mass-averaging framework to improve predictions of local RF heating near a hip implant for parallel transmit at 7 T,« *Magnetic Resonance in Medicine*, svibanj 2018.
- [105] 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.
- [106] Z. Godec, »Steady-State Temperature Rise Determination,« *Automatika*, srpanj 2018.

-
- [107] D. Poljak, S. Šesnić, M. Cvetković, A. Šušnjara, H. Dodig, S. Lallachere i K. E. K. Drissi, »Stochastic Collocation Applications in Computational Electromagnetics,« *Mathematical Problems in Engineering*, 2018.
- [108] N. Metropolis, »The Beginning of the Monte Carlo Method,« *Los Alamos Science*, pp. <https://library.lanl.gov/cgi-bin/getfile?00326866.pdf>, 1987.
- [109] 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].
- [110] D. Xiu, »Stochastic Collocation Methods: A Survey,« *Springer International Publishing*, 2015.
- [111] A. Saltelli, P. Annoni, I. Azzini, M. Ratto, F. Campolongo i S. Tarantola, »Variance Based Sensitivity Analysis of Model Output. Design and Estimator for the Total Sensitivity Index,« *Computer Physics Communications*, rujan 2009.
- [112] M. Galić, D. Poljak i V. Dorić, »Comparison of Different Analytical Models to Determine Electric Field Radiated by a Base Station Antenna,« u *2nd International Multidisciplinary Conference on Computer and Energy Science (SpliTech)*, Split, Hrvatska, 2017.
- [113] G. Bedrosian, »The History of Electromagnetics,« studeni 2018. [Mrežno]. Available: <http://commons.princeton.edu/motorcycledesign/wp-content/uploads/sites/70/2018/06/EM-History.pdf>. [Pokušaj pristupa siječanj 2023].
- [114] »5G deployment below 6 GHz - Ubiquitous coverage for critical communication and massive IoT,« *NOKIA white paper*, 2017.
- [115] M. Galić, D. Poljak i T. Tadić, »Measurement and Calculation of Exposure Level to 5G Base Station Antenna,« u *14th European Conference on Antennas and Propagation*, Kopenhagen, Danska, 2020.
- [116] R. Herawan, »Study Review of Biological Effect of 5G Radiation,« Sekolah Teknik Elektro dan Informatika, Institut Teknologi Bandung, Indonezija, 2020.
- [117] 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.
- [118] J. O. de Lorge, »Operant Behavior and Colonic Temperature of Macaca Mulatta Exposed to Radio Frequency Fields at and Above Resonant Frequencies,« *Bioelectromagnetics*, pp. 233 - 246, 1984.

-
- [119] C. M. Alabaster, »Permittivity of Human Skin in the Millimeter Wave Band,« *IEEE Electronics Letters*, svez. 21, pp. 1521-2, listopad 2003.
- [120] »Portal "Hoću",« [Mrežno]. Available: <https://www.hocu.ba/index.php/hocu.info/2g-3g-4g-5g-u-cemu-je-razlika>. [Pokušaj pristupa siječanj 2022].
- [121] »Hrvatska norma HRN EN 50413,« *Osnovna norma za postupke mjerenja i proračuna izloženosti ljudi električnim, magnetskim i elektromagnetskim poljima (0 Hz – 300 GHz)*, 2012.
- [122] 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.
- [123] 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..
- [124] 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*, rujan 2000.

Životopis

Marin Galić rođen je 27 listopada 1990. godine. u malom mjestu Vir, nedaleko od Posušja, Bosna i Hercegovina. U Posušju je pohađao gimnaziju fra Grge Martića, nakon čega, 2009. godine, upisuje Fakultet elektrotehnike i računarstva (FER) Sveučilišta u Zagrebu. Diplomski studij FER-a završava 2014. godine na smjeru Energetika.

Od 2015. godine radi kao magistar inženjer elektrotehnike i informacijske tehnologije u Centru za mjerenja u okolišu d.o.o. u Zagrebu. Od trenutka zaposlenja nastavlja edukacije, istraživanje i certificiranje na području mjerenja i proračuna razina elektromagnetskih polja niskih i visokih frekvencija te osposobljavanja ispitnih i umjernih laboratorija.

Slobodno vrijeme voli provoditi u prirodi, a obožava kuhanje, dobre filmove i društvene igre. Uspješno se služi engleskim jezikom u govoru i pismu.

Biography

Marin Galic was born on October 27th in 1990 in a small village Vir, Posusje – Bosnia and Herzegovina. He finished the High School Grgo Martic Gymnasium in Posusje after which in 2009 he attends the Faculty of Electrical Engineering and Computation (FER), University of Zagreb. He received the Master Degree in 2014 in Electrical Engineering and Information Technology – profile: Electrical Power Engineering.

Since 2015 he works as a Master of Electrical Engineering and Information Technology in Environmental Measurement Center LTD in Zagreb. From the beginning of the professional career he continues to research, educate and certificate on the field of measurements and calculations of electromagnetic fields of low- and high frequencies as well as training of test- and measurement laboratories.

He likes to spend his free time in the nature, loves cooking, watching good movies and playing social games. He uses English in speech and writing.