



UNIVERZITET U NIŠU  
ELEKTRONSKI FAKULTET



**Vladimir B. Stanković**

**ANALIZA PRODRLOG  
ELEKTROMAGNETSKOG POLJA MOBILNOG  
TELEFONA KORIŠĆENJEM NUMERIČKOG  
MODELA DEČIJE GLAVE ZA RAZLIČITE  
MIKROTALASNE PODOPSEGE**

**DOKTORSKA DISERTACIJA**

Tekst ove doktorske disertacije stavlja se na uvid javnosti, u skladu sa članom 30., stav 8. Zakona o visokom obrazovanju („Sl. glasnik RS“, br. 76/2005, 100/2007 – autentično tumačenje, 97/2008, 44/2010, 93/2012, 89/2013 i 99/2014)

**NAPOMENA O AUTORSKIM PRAVIMA:**

Ovaj tekst smatra se rukopisom i samo se saopštava javnosti (član 7. Zakona o autorskim i srodnim pravima, „Sl. glasnik RS“, br. 104/2009, 99/2011 i 119/2012)

**Nijedan deo ove doktorske disertacije ne sme se koristiti ni u kakve svrhe, osim za upoznavanje sa njenim sadržajem pre odbrane disertacije.**

Niš, 2017.



UNIVERSITY OF NIŠ  
FACULTY OF ELECTRONIC ENGINEERING



**Vladimir B. Stanković**

**ANALYSIS OF PENETRATING  
ELECTROMAGNETIC FIELD FROM MOBILE  
PHONES USING A NUMERICAL MODEL OF  
THE CHILD HEAD IN DIFFERENT  
MICROWAVE RANGES**

DOCTORAL DISSERTATION

Niš, 2017.

## Podaci o doktorskoj disertaciji

Mentor: Prof. dr Vera Marković, redovni profesor, Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet

Naslov: Analiza prodrlog elektromagnetskog polja mobilnog telefona korišćenjem numeričkog modela dečije glave za različite mikrotalasne podopsege

Istraživanja koja su izvršena u okviru ove doktorske disertacije imala su za cilj dobijanje novih rezultata vezanih za proračun prodrlog elektromagnetskog polja koje potiče od mobilnog telefona i njegove prostorne raspodele u dečijoj glavi.

Za potrebe istraživanja uticaja zračenja mobilnog telefona, razvijeno je više različitih numeričkih modela. Razvijen je, pre svega, sveobuhvatni 3D numerički model koji po dimenzijama i obliku odgovara anatomskim i morfološkim karakteristikama glave sedmogodišnjeg deteta. Dalje, kreiran je numerički model glave odrasle osobe, za potrebe istraživanja razlike u uticaju elektromagnetskog zračenja na decu i odrasle osobe. Takođe, u skladu sa trendom sve značajnijeg korišćenja mobilnog telefona za pristup internetu i gledanje/čitanje sadržaja sa ekrana, za takav način upotrebe telefona razvijen je model oka deteta sa odgovarajućim anatomskim i morfološkim karakteristikama.

Izvor elektromagnetskog zračenja je kreiran da po obliku odgovara savremenom pametnom mobilnom telefonu i sastoji se od kućišta sa displejem i odgovarajuće antene. Simulirani su uslovi rada telefona za više različitih frekvencija, kako za aktuelne tako i za predviđene frekvencije za buduće 5G mreže.

Kao rezultat izvršenih istraživanja, za pretpostavljeni nivo izlazne snage telefona, u delu tkiva/organa unutar modela glave deteta utvrđene su visoke vrednosti intenziteta električnog polja i specifične stope apsorpcije (SAR) koje su iznad referentnih graničnih nivoa i bazičnih ograničenja. Na frekvencijama iz milimetarskog opsega (buduće 5G mreže), takođe su pronađene više vrednosti i za intenzitet električnog polja i za SAR u odnosu na dozvoljene nivoe, ali su one skoncentrisane na uzane slojeve uz samu površinu modela, pri čemu je prekoračenje SAR-a više izraženo.

Pokazano je da su usled razlika u anatomiji glave i geometrije modela odrasle osobe i deteta prisutne više vrednosti intenziteta električnog polja i SAR-a kod modela deteta. Takođe, pokazano je da morfološke karakteristika tkiva i organa dece utiču na porast vrednosti za SAR.

Naučna oblast: Elektrotehničko i računarsko inženjerstvo

Naučna disciplina: Telekomunikacije

Ključne reči: Elektromagnetsko zračenje, elektromagnetsko polje, numerički model, mikrotalasi, mobilni telefon, biološko tkivo, SAR

UDK: (621.395+537.531):576.3

CERIF  
klasifikacija: T 191 Visokofrekventna tehnologija, mikrotalasi

Tip licence  
Kreativne  
zajednice: **CC BY-NC-ND**

## Data on Doctoral Dissertation

Doctoral Supervisor:	Prof. dr. Vera Marković, Full Professor, University of Niš, Faculty of Electronic Engineering
Title:	Analysis of penetrating electromagnetic field from mobile phones using a numerical model of the child head in different microwave ranges
Abstract:	<p>The research work presented here was aimed at obtaining the new results related to the calculation of penetrated electromagnetic field from a mobile phone and its spatial distribution inside a child's head.</p> <p>Several numerical models were developed for the purpose of investigating the effects of mobile phone radiation. A comprehensive 3D numerical model was developed, which corresponds to the anatomical and morphological properties of a seven years-old child head by size and shape. An adult head model was created for the purpose of examining the different effects of electromagnetic radiation on children and adults. Also, in line with the trend of increased use of mobile phones for internet access and viewing/reading of the content on the device display, a child eye model with appropriate anatomical and morphological characteristics was developed to match such use.</p> <p>The source of electromagnetic radiation has been created to match the shape of a contemporary smart phone, and it contains the housing with a display and the antenna. The research involved a simulation of operational conditions of the phone at several different frequencies – both at currently used and at upcoming 5G network frequencies.</p> <p>For assumed level of device output power, high values of electric field intensity and specific absorption rate (SAR), exceeding the allowed reference levels and base limitations were found in some tissues/organs inside the child head model. Higher than allowed electric field and SAR levels were also found for millimetre wave frequency ranges but they are concentrated in narrow layers near the very surface of the model, whereby the exceeding SAR level is even more noticeable.</p> <p>Higher values of electric field intensity and SAR are present in the child head model to a greater extent compared to the adult head model, due to anatomical and geometrical differences between child and adult head models. The research also shows that the morphological properties of children's tissues and organs influence the increase of SAR values.</p>
Scientific Field:	Electrical and Computer Engineering
Scientific Discipline:	Telecommunications
Key Words:	Electromagnetic radiation, electromagnetic field, numerical model, microwaves, mobile phone, biological tissue, SAR

UDC: (621.395+537.531):576.3

CERIF  
Classification: T 191 High frequency technology, microwaves

Creative  
Commons  
License Type: **CC BY-NC-ND**

*„Nije sreća ono što  
nas čini zahvalnim,  
već je zahvalnost ono  
što nas čini srećnim.“*

*David Steindl-Rast*

*Neizmerno zahvalan svojoj porodici na podršci i razumevanju!*

# SADRŽAJ

UVOD	1
1. Fizičke karakteristike apsorpcije energije u biološkim materijalima	11
1.1 Elekromagnetske osobine tkiva	11
1.2 Specifična stopa apsorpcije (SAR)	14
1.2.1 Nepouzdanost proizvođačke vrednosti SAR mobilnih telefona kao mera za procenu maksimalne izloženosti elektromagnetskom zračenju	17
1.2.2 Merenje vrednosti SAR	18
1.2.2.1 Specifični antropomorfni model (SAM)	18
1.2.2.2 Robot za pozicioniranje	20
1.2.2.3 Merna sonda	21
1.2.2.4 Procedura merenja	23
1.2.3 Apsorpcija elektromagnetske energije kod dece	23
1.3 <i>Bioheat</i> jednačina	25
1.3.1 Peneov model	26
2. Standardi, preporuke i biološki efekti elektromagnetskog zračenja	29
2.1 Standardizacija bezbednih nivoa elektromagnetskog zračenja	29
2.1.1 ICNIRP standard	29
2.1.1.1 Osnovna ograničenja prema ICNIRP standardu	30
2.1.1.2 Referentni nivoi prema ICNIRP standardu	30
2.1.2 Nacionalni standardi	31
2.1.2.1 Granice izloženosti za stanovništvo	31
2.1.2.2 Granice izloženosti za profesionalno osoblje	32
2.1.3 Granice izlaganja nejonizujućim zračenjima kod nas	36
2.2 Biološki efekti elektromagnetskog zračenja	38
2.2.1 Potencijalni štetni zdravstveni efekti kao posledica korišćenja bežičnih uređaja	39
2.2.1.1 Maligna oboljenja	39
2.2.1.2 Efekti na reproduktivno zdravlje	41
2.2.1.3 Genotoksični efekti i oštećenje DNK	42
2.2.1.4 Efekti na nervni sistem	43
2.2.1.5 Psihološki efekti	44
2.2.2 Prenatalna izloženost	45



2.2.3 Termički i netermički efekti	45
3. Numerički modeli	46
3.1 Numeričke metode za rešavanje elektromagnetskih problema	46
3.1.1 Tehnika konačnih integrala - FIT	47
3.1.1.1 Algebarske osobine matričnih operatora	52
3.2 Mobilni telefon kao izvor zračenja	54
3.2.1 Antena mobilnog telefona	54
3.2.1.1 Primena PIFA antene	55
3.2.2 Model mobilnog telefona	56
3.3 Numerički model glave deteta	57
4. Raspodela elektromagnetskog polja unutar modela glave deteta	63
4.1 Raspodela elektromagnetskog polja za $f = 0.9\text{GHz}$	65
4.1.1 Vrednost intenziteta električnog polja za $f = 0.9\text{GHz}$	65
4.1.2 Raspodela $\text{SAR}_{1g}$ i $\text{SAR}_{10g}$ za $f = 0.9\text{GHz}$	69
4.1.3 Vrednost jačine magnetskog polja za $f = 0.9\text{GHz}$	75
4.1.4 Raspodela gustine snage gubitaka za $f = 0.9\text{GHz}$	77
4.2 Raspodela elektromagnetskog polja za $f = 1.8\text{GHz}$	79
4.2.1 Vrednost intenziteta električnog polja za $f = 1.8\text{GHz}$	79
4.2.2 Raspodela $\text{SAR}_{1g}$ i $\text{SAR}_{10g}$ za $f = 1.8\text{GHz}$	82
4.2.3 Vrednost jačine magnetskog polja za $f = 1.8\text{GHz}$	87
4.2.4 Raspodela gustine snage gubitaka za $f = 1.8\text{GHz}$	89
4.3 Raspodela elektromagnetskog polja za $f = 2.1\text{GHz}$	90
4.3.1 Vrednost intenziteta električnog polja za $f = 2.1\text{GHz}$	90
4.3.2 Raspodela $\text{SAR}_{1g}$ i $\text{SAR}_{10g}$ za $f = 2.1\text{GHz}$	93
4.3.3 Vrednost jačine magnetskog polja za $f = 2.1\text{GHz}$	98
4.3.4 Raspodela gustine snage gubitaka za $f = 2.1\text{GHz}$	100
4.4 Raspodela elektromagnetskog polja za $f = 28\text{GHz}$	101
4.4.1 Vrednost intenziteta električnog polja za $f = 28\text{GHz}$	101
4.4.2 Raspodela $\text{SAR}_{1g}$ i $\text{SAR}_{10g}$ za $f = 28\text{GHz}$	105
4.4.3 Vrednost jačine magnetskog polja za $f = 28\text{GHz}$	112
4.4.4 Raspodela gustine snage gubitaka za $f = 28\text{GHz}$	114
4.5 Raspodela elektromagnetskog polja za $f = 39\text{GHz}$	116

4.5.1 Vrednost intenziteta električnog polja za $f = 39$ GHz	116
4.5.2 Raspodela SAR <sub>1g</sub> i SAR <sub>10g</sub> za $f = 39$ GHz	120
4.5.3 Vrednost jačine magnetskog polja za $f = 39$ GHz	125
4.5.4 Raspodela gustine snage gubitaka za $f = 39$ GHz	127
4.6 Raspodela elektromagnetskog polja za $f = 73$ GHz	129
4.6.1 Vrednost intenziteta električnog polja za $f = 73$ GHz	129
4.6.2 Raspodela SAR <sub>1g</sub> i SAR <sub>10g</sub> za $f = 73$ GHz	132
4.6.3 Vrednost jačine magnetskog polja za $f = 73$ GHz	138
4.6.4 Raspodela gustine snage gubitaka za $f = 73$ GHz	139
4.7 Uporedna analiza	141
5. Zagrevanje tkiva i organa usled zračenja mobilnog telefona	148
6. Prodiranje elektromagnetskog talasa u oko deteta	157
6.1 Vrednost intenziteta električnog polja	159
6.2 Raspodela vrednosti SAR	163
6.3 Raspodela temperature	166
7. Poređenje rezultata simulacije sa aspekta različitih vrednosti elektromagnetskih osobina tkiva kod dece i odraslih	171
7.1 Poređenje vrednosti intenziteta električnog polja	172
7.2 Poređenje raspodele vrednosti SAR	174
8. Poređenje rezultata simulacije sa aspekta anatomskih karakteristika glave odrasle osobe i deteta	181
8.1 Poređenje vrednosti intenziteta električnog polja	182
8.2 Poređenje raspodele vrednosti SAR	183
9. Poređenje rezultata simulacije za model fantoma i realističnijeg modela glave čoveka	187
9.1 Rezultati proračuna intenziteta električnog polja za oba modela	189
9.2 Poređenje raspodele vrednosti SAR	190
ZAKLJUČAK	194
LITERATURA	203

## UVOD

Svet kakav danas poznajemo bio bi sasvim drugačiji u odsustvu električnih i magnetskih polja. Električna i magnetska polja su svuda oko nas, kako prirodna tako i veštačka. Primeri polja su svakojaki, prirodna električna polja pri grmljavinama izazivaju munje, veštačka električna polja u fluorescentnim svetiljkama obasjavaju naše ulice, Zemljino magnetsko polje omogućava da igla kompasa pokaže gde je severni pol, pomaže mnogim pticama i ribama u navigaciji.

Električna i magnetska polja su povezana, jer kad god električna struja protiče u električnom polju generiše se magnetsko polje. Zajedno ova polja formiraju elektromagnetsko polje, ili EM polje.

Elektromagnetska polja mogu se opisati kao niz talasa koji osciluju na određenoj frekvenciji i imaju određenu razdaljinu između dva susedna talasa tzv. talasnu dužinu. Elektromagnetska polja imaju veoma širok spektar frekvencija, koji se protežu od niskih frekvencija linija za snabdevanje električnom energijom sa talasnim dužinama od nekoliko stotina metara, preko radio frekvencija i frekvencija vidljive svetlosti, do veoma visokih frekvencija medicinskih X-zraka.

Najjednostavnija podela elektromagnetskog spektra je na jonizujuće i nejonizujuće elektromagnetsko zračenje. Jonizujuće zračenje obuhvata ultraljubičaste zrake, X-zrake i gama zrake. Oni se nazivaju "jonizujući" jer pojedini talasi mogu razbiti hemijske veze između atoma proizvodeći jone. Nejonizujuće zračenje ne može prekinuti hemijske veze ali može da interaguje sa materijom na druge načine. Konkretno, ta interakcija može dovesti do efekta zagrevanja u materijalima.

Veštački generisana elektromagnetska polja su polja koja je stvorio čovek. Gde god protiče električna struja imamo pojavu elektromagnetskih polja.

Na neka od elektromagnetskih polja nailazimo u svakodnevnom životu kao rezultat njihove namerne upotrebe za postizanje određenih pozitivnih rezultata. Ona se intenzivno koriste u medicini za dijagnozu i lečenje, na primer, magnetna rezonanca za dijagnostiku mozga, zračenje za zaceljivanje kostiju i lečenje raka.

U našim domovima, elektromagnetska polja potiču iz mikrotalasnih pećnica, fenova za kosu, električne instalacije u kući, udaljenih uređaja za kontrolu, i drugih. Na radnom mestu, oni su generisani od strane kompjuterskih ekrana, industrijskih električnih peći, elektromotora, protivprovalnih sistema. Na otvorenom, mi smo takođe u elektromagnetskom

polju koje potiče od kablova električnih vozova i tramvajskih kablova, dalekovoda, antena za radio-frekvencijsku komunikaciju hitnih službi, a poslednjih godina, sa razvojem bežičnih mreža, i elektromagnetskih polja iz Wi-Fi i *bluetooth* tehnologija.

Mobilni telefoni predstavljaju poseban izvor elektromagnetskih polja koji je sve prisutniji, budući da ljudi sve brže usvajaju mnoge prednosti koje oni unose u njihove živote. Tehnologija mobilnih komunikacionih sistema generiše elektromagnetska polja na dva načina: prvi, emitovanjem elektromagnetskih talasa od antena baznih stanica, i drugi, emitovanjem elektromagnetskih talasa od strane antena samih telefona.

Bazne stanice mobilne telefonije su po svojoj funkciji primopredajni sistemi čiji predajnici spadaju u grupu sa malom snagom (predajnici od nekoliko desetina vati). Obično se postavljaju na visokim stubovima ili krovovima i fasada zgrada.

Mobilni telefoni su primopredajni uređaji čiji predajnici, kao i kod bazne stanice, spadaju u grupu predajnika sa malom snagom i vezani su u mrežu mobilne telefonije preko najbliže bazne stanice koja unutar ćelije ima, kao višekanalni primopredajnik, funkciju repetitora male snage. U zavisnosti od tipa, maksimalna snaga zračenja mobilnih telefona je do nekoliko vati, ali se ona automatski podešava u odnosu na udaljenost od bazne stanice i u principu je mnogo niža. Što je bazna stanica bliže, to je snaga manja i obratno.

Razvoj tehnologije omogućio je dostupnost mobilnih komunikacionih uređaja svim starosnim strukturama društva. Izlaganje elektromagnetskom zračenju postaje svakodnevno prisutno, uključujući i izlaganje dece koja su sve više i više vezana za bežične tehnologije. Upravo sve intenzivnija upotreba mobilnih telefona kod dece izazvala je veliku zabrinutost zbog mogućih štetnih efekata elektromagnetskog zračenja.

Od 2000. godine, kada je predstavljen prvi telefon sa kamerom, broj korisnika mobilnih telefona je petostruko porastao. U 2014., blizu 63% svetske populacije je posedovalo mobilni telefon [1]. U Kini je 2015. bilo preko 1.2 milijardi korisnika, čiji je broj narastao na 1.28 milijardi prema podacima iz februara 2016. Do 2019. se očekuje da taj broj bude veći od 1.4 milijardi [1].

Do 2020., predviđa se da će biti 5.5 milijardi korisnika mobilnih telefona, što je oko 70% ukupne svetske populacije [2]. Potražnja za mobilnim uređajima u narednih pet godina povećaće broj korisnika dva puta brže od rasta svetske populacije. Ovaj talas mobilnih korisnika, pametnih uređaja, mobilnog videa i 4G mreža će povećati mobilni saobraćaj osam puta tokom narednih pet godina [2].

Pametni mobilni uređaji će predstavljati 72% od ukupnog broja mobilnih uređaja i priključaka do 2020. što je porast od 36% u odnosu na 2015. Predviđa se da će pametni

uređaji da generišu 98% saobraćaja mobilnih podataka do 2020. Od toga će 81% ukupnog mobilnog saobraćaja ići preko pametnih telefona, što je porast od 76% u odnosu na 2015. Porast broja mobilnih telefona je tako brz da će više ljudi imati mobilne telefone (5.5 milijardi) nego električne energije (5.3 milijardi), tekuće vode (3.5 milijardi) i automobila (2.8 milijardi) do 2020. godine [2].

Mobilni video će imati najveću stopu rasta od bilo koje mobilne aplikacije. Korišćenje 4G mreža će povećati kod potrošača i poslovnih korisnika tražnju za videom visoke rezolucije, većim propusnim opsegom i brzinom obrade.

Deljenje sadržaja preko 4G mreža će prevazići 2G do 2018. godine i 3G do 2020. godine. Preko 4G će ići više od 70% celokupnog mobilnog saobraćaja, tako da će 4G veze generisati skoro šest puta više saobraćaja mesečno do 2020. od mreža prethodnih generacija [2].

Uprkos zabrinutosti o zdravstvenim posledicama dugoročnog izlaganja radiofrekvencijskom (RF) zračenju, učestalost korišćenja mobilnog telefona od strane male dece je u naglom porastu. Novija istraživanja pokazuju da većina dece dobije prvi mobilni telefon već sa samo 6 godina. Na osnovu istraživanja iz 2013. godine u Americi, 75% dece starosti do osam godina koristi mobilne telefone, tablet računare ili neke druge bežične uređaje [3]. Prema sličnom istraživanju u Velikoj Britaniji iz 2014. godine, mobilni telefon poseduje 40% dece uzrasta od 5 do 15 godina a čak 80% dece uzrasta od 12 do 15 godina [4]. Danas je broj korisnika mobilnih telefona među decom još veći.

Poslednjih godina došlo je do promene načina korišćenja mobilnih telefona. Prenos govora mobilnim telefonima, kao njihova primarna namena, se smanjuje dok se prenos teksta i drugih oblika neverbalne komunikacije povećava. Prenos teksta je sada dominantan način komunikacije među adolescentima, zatim pozivi, video poziv, korišćenje sajtova društvenih mreža, i e-mail. Deca uzrasta od 13 do 17 godina prosečno pišu i primaju oko 3700 poruka mesečno i gledaju više od 7 sati video sadržaja na mobilnim telefonima [5].

Nove funkcije mobilnih telefona snažno motivišu povećanu upotrebu telefona: usluge GPS lokacije, video ćaskanja, emitovanja radijskog i televizijskog sadržaja putem interneta, za uređivanje fotografija, za video igre, za aplikacije za društvene mreže i obrazovne programe.

Mogućnosti koje nude današnji „pametni“ telefoni, bogatstvo sadržaja, brojne aplikacije i pretraživanje interneta u potrazi za novim informacijama, dovele su do toga da deca i mladi svakodnevno i na svakom mestu koriste mobilne telefone. Mnoge škole su usvojile korišćenje mobilnih telefona u obrazovne svrhe.

Uvođenje najavljene 5. generacije (5G) mobilnih komunikacionih sistema još više će unaprediti postojeće mobilne servise, tako da se očekuje još intenzivnije korišćenje mobilnih telefona u svim starosnim strukturama. Najveći problem postojećih mobilnih mreža jeste mali propusni opseg. Ograničeni propusni opseg značajno smanjuje kapacitet za prenos velike količine podataka a samim tim i brzinu prenosa. Iako mobilne mreže četvrte generacije (4G) još uvek nisu dovoljno implementirane, uveliko se radi na razvoju mreža pete generacije (5G) koje bi trebale da značajno unaprede nedostatke postojećih mobilnih mreža.

Svake godine broj bežičnih uređaja kao i količina prenešenih podataka nastavlja da raste. Kako ovi uređaji stvaraju i prenose sve veće količine podataka, bežična komunikaciona infrastruktura koja povezuje ove uređaje mora da evoluirati kako bi podržala ove zahteve.

4G mreže sa baznim stanicama sa prenosnim antenama i manjim linkovima za proširivanje pokrivenost su obično izgrađene za niski i srednji-opseg radio spektra (600MHz do 2.5GHz) [6]. Povećanje spektralne efikasnosti 4G mreže nije dovoljno da ide u korak sa brzinama prenosa podataka planiranih za 5G.

Oblast koja je interesantna istraživačima za razvoj i implementaciju 5G mreža zbog slobodnih frekvencija i širine budućih opsega jeste oblast milimetarskih talasa. Opseg milimetarskih talasa je deo radio frekvencijskog spektra, i sastoji se od frekvencija između 30GHz i 300GHz, koje odgovaraju opsegu talasnih dužina od 10 do 1mm.

Prednosti korišćenja viših frekvencija u odnosu na tradicionalne niže opsege su pre svega, veća dostupnost propusnog opsega i manje dimenzije antene za određeni dobitak, odnosno veći dobitak za datu veličinu antene [7].

Od 5G bežičnih mreža se očekuje da budu desetine ili čak stotine puta brže nego 4G mreže. Preuzimanje filmova preko mreže će biti za nekoliko sekundi. Da bi postigle tu brzinu i pružile uzbudljive nove aplikacije na budućoj mreži, 5G će morati da koristi visoke frekvencije, a antene moraju biti raspoređena gušće u odnosu na prethodne mobilne mreže [8].

Da bi se mreža kvalifikovala kao 5G mreža neophodno je da ispuni veliki broj zahteva koji se pred njom nameću [8]:

- ❖ Brzina - 5G će postići maksimalnu brzinu prenosa podataka od 10Gbit/s, što je deset puta brže nego 1Gbit/s kod LTE.
- ❖ Kapacitet - NGMN (*Next Generation Mobile Networks group*) Ltd. očekuje da 5G ima stotinu i hiljadu puta veći kapacitet nego 4G, što će biti važno ako podržava IoT (*Internet of Things*) aplikacije kao što su povezana vozila.
- ❖ Kašnjenje - 5G će imati kašnjenje od jedne milisekunde što je čini znatno pouzdanijom od ranijih mreža.

Kod komunikacionih sistema koji koriste milimetarski opseg za komunikaciju, javljaju se veći gubici prilikom prostiranja talasa u poređenju sa komunikacionim sistemima koji koriste niže noseće frekvencije. Slabljenje usled kiše i atmosferske apsorpcije ograničava opseg milimetarskih komunikacija [9-11]. Međutim, uz manje veličine ćelija koje se danas primenjuju za poboljšanje spektralne efikasnosti, slabljenje usled kiše i atmosferska apsorpcija ne stvaraju značajno dodatno slabljenje za veličine ćelija reda 200m [12].

Operateri mobilne telefonije su počeli da istražuju tehnologiju milimetarskih talasa u cilju procene najbolje frekvencije za mobilnu komunikaciju. Međunarodna unija za telekomunikacije (ITU - *The International Telecommunication Union*) i 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) su usklađeni što se tiče plana za dve faze istraživanja 5G standarda [13]. Prva faza koja se završava septembra 2018., definiše period istraživanja za frekvencije ispod 40GHz sa akcentom na komercijalne potrebe. Druga faza, koja treba da počne 2018. i da se završi decembra 2019., treba da se bavi ključnim indikatorima performansi (KPI – *Key Performance Indicators*) navedenim od strane IMT (*International Mobile Telecommunications*) 2020. Ova druga faza se fokusira na frekvencije do 100GHz.

Frekvencije koje počinju da se pojavljuju kao kandidati za 5G su: 28GHz, 39GHz i 73GHz. Ova 3 frekvencijska opsega su se pojavila iz nekoliko razloga. Prvo, za razliku od opsega od 60GHz koji ima slabljenje od oko 20dB/km zbog apsorpcije usled kiseonika, prethodno pomenuti opsezi imaju mnogo niže stope apsorpcije usled kiseonika, što ih čini pogodnijim za komunikaciju na duge staze [14]. Ove frekvencije su takođe pogodne za korišćenje i u slučajevima postojanja refleksije pa mogu da se koriste za komunikaciju bez optičke vidljivosti.

Mobilni telefon predstavlja izvor elektromagnetskog RF polja pri čemu se glava korisnika nalazi u bliskom polju ovog izvora zračenja. Istovremeno, korisnik se nalazi u dalekom polju zračenja bazne stanice. Najveće vrednosti polja su u okolini antene mobilnog telefona, pa samim tim i veliki deo energije talasa koji se prostiru od strane antene mobilnog telefona ostaje apsorbovan u glavi korisnika.

Veliki broj radova u kojima se istražuje uticaj elektromagnetskog zračenja koje potiče od mobilnih telefona se fokusira na utvrđivanje apsorbovane energije u standardnim modelima glave odrasle osobe [15, 16].

Međunarodni bezbednosni standardi i uputstva o granicama izlaganja elektromagnetskim poljima su razvijeni na osnovu istraživanja za odrasle osobe [17]. Bez obzira što svaki od standarda sadrži maksimalno dozvoljene vrednosti treba utvrditi da li su ove vrednosti pravilno minimizirane kada je u pitanju i izlaganje dece.

Procena efekata izloženosti zračenju mobilnih telefona se zasniva na određivanju prodrlog elektromagnetskog polja unutar glave i njegove raspodele, kao i apsorbovane energije, što rezultira povećanjem temperature tkiva u ljudskoj glavi.

Količina apsorbovane elektromagnetske energije zavisiće od radne frekvencije mobilnog telefona, rastojanja između telefona i glave kao i samog oblika i dimenzija ljudske glave i elektromagnetskih osobina tkiva i organa. Detaljno poznavanje elektromagnetskih osobina bioloških tkiva (relativna dielektrična konstanta,  $\epsilon_r$ , provodnost,  $\sigma$ , i relativna magnetna permeabilnost,  $\mu_r$ ) je od suštinskog značaja za razumevanje interakcije elektromagnetskog zračenja sa telom, jer upravo od ovih karakteristika koje su i frekvencijski zavisne, zavise efekti prostiranja, refleksije i slabljenja elektromagnetskih talasa u telu.

Efekti elektromagnetskog zračenja emitovanog od mobilnih telefona zavise od modela telefona, vrste antene, radne frekvencije, jačine signala i položaja telefona u odnosu na glavu. Posledica slabog signala pri komunikaciji je povećanje nivoa snage emitovanog signala što dovodi do viših nivoa izloženosti.

Fantom, koji se koristi za merenje uticaja zračenja mobilnog telefona na glavu čoveka, je napravljen na osnovu dimenzija glave prosečne muške odrasle osobe. Suštinska razlika između različitog uticaja elektromagnetskog zračenja na odrasle osobe i decu pored razlike u veličini i obliku glave ogleda se i u razlici u morfologiji i sastavu tkiva. Tu se pre svega misli na sadržaj vode u tkivu kao i razvoj organa sa godinama. Pretpostavka je da je posledica ovih razlika i veća apsorpcija energije elektromagnetskog talasa u glavi deteta u odnosu na odraslu osobu [18].

Veliki broj radova je ukazao na to da izloženost nižim vrednostima elektromagnetskog polja od dozvoljenih može izazvati različite biološke i zdravstvene efekte, uključujući promene u ponašanju, uticaj na imunološki sistem, smanjenje reproduktivnih funkcija, promene u nivou hormona, glavobolje, razdražljivost, umor i kardiovaskularne smetnje.

Trenutne bezbedonosne granice za izlaganje ljudi elektromagnetskom zračenju mobilnih telefona su bazirane na pretpostavkama da uređaji utiču na zdravlje ljudi preko zagrevanja tkiva. Međutim, efekti na molekularnom nivou, promene na ćelijskom nivou i oštećenja sistema organa, koji nisu objašnjeni toplotom, prikazani su u brojnim stručnim studijama. Studija Nacionalnog instituta za zdravstvo Amerike iz 2011. potvrđuje da se promene u mozgu dešavaju usled izloženosti zračenju mobilnog telefona na netermalnim nivoima [5].



U 2011. Međunarodna agencija svetske zdravstvene organizacije za istraživanje raka (IARC - *International Agency for Research on Cancer*) je elektromagnetsko zračenje mobilnog telefona svrstala u klasu 2B kancerogena, na osnovu dokaza koji ukazuju na povećani rizik za gliom, maligni tip raka mozga i preporučila da se nastave intenzivna istraživanja.

Teškoće u ocenjivanju efekata dugoročne izloženosti niskog nivoa potencijalnih opasnosti po životnu sredinu nisu male. Glavni problem je da su efekti uticaja elektromagnetskih polja kumulativni [19, 20]; oni se nagomilavaju u organizmu tokom vremena. To znači da istraživanja moraju da budu dugoročna, kroz obimne epidemiološke studije.

Osnovni cilj istraživanja ove disertacije je formiranje opšteg, detaljnog, adekvatnog numeričkog modela glave deteta sa pravilno pridruženim elektromagnetskim osobinama tkiva i analiza prostorne raspodele elektromagnetskog polja u glavi deteta koje potiče od mobilnog telefona za različite radne frekvencije.

U prvom poglavlju definisane su elektromagnetske osobine tkiva, specifična stopa apsorpcije (SAR - *Specific Absorption Rate*) elektromagnetske energije i *bioheat* jednačina.

Detaljno poznavanje dielektričnih osobina bioloških tkiva je od suštinskog značaja za razumevanje interakcije elektromagnetskog zračenja sa telom. Kako su biološke sredine nehomogene, nelinearne i disperzivne, za proučavanje uticaja elektromagnetskih polja na biološka tkiva neophodno je poznavati elektromagnetske osobine tkiva i organa. Dielektrične osobine bioloških tkiva su mera interakcije elektromagnetskog zračenja sa sastavom tkiva na ćelijskom i molekularnom nivou i frekvencijski i temperaturno su jako zavisne.

Ukoliko se biološko tkivo nađe na putu prostiranja elektromagnetskog talasa dolazi do njegovog prodiranja u tkivo i tom prilikom se deo energije talasa apsorbuje u tkivu. Prilikom prolaska elektromagnetskog talasa iz jedne biološke sredine u drugu, na razdvojnoj površini ove dve sredine postoji razlika između ulazne i izlazne energije talasa. Ova razlika ulazne i izlazne energije predstavlja apsorbovanu energiju. Upravo ovako definisana apsorbovana energija se koristi kako bi se objasnio uticaj elektromagnetskog zračenja na biološku materiju. U tu svrhu uvedena je veličina koja se naziva specifična stopa apsorpcije, SAR.

Poznavanje termalnih karakteristika bioloških tkiva je osnova za razumevanje procesa prenosa toplote u biološkom sistemu. Raspodela temperature u tkivu tokom izlaganja radiofrekvencijskim (RF) elektromagnetskim talasima može biti određena rešavanjem *bioheat* jednačine. Parametre koje *bioheat* jednačina uzima u obzir su provođenje toplote, perfuzija krvi i spoljašnje zagrevanje.

U drugom poglavlju prikazani su standardi koji su definisani za bezbedno izlaganje ljudi elektromagnetskim zračenjima i mogući biološki efekti.

Standardi u oblasti zaštite od elektromagnetskog zračenja odnose se na propise, preporuke i granične vrednosti kojima se određuju maksimumi izlaganja zračenju u cilju zaštite ljudskog zdravlja, kako opšte populacije tako i radnika.

Cilj mnogobrojnih istraživanja bioloških posledica usled izloženosti elektromagnetskom mikrotalasnom zračenju jeste pokušaj da se napravi kompromis između potencijalno štetnog dejstva RF zračenja i koristi koju upotreba mobilnih telefona i drugih mikrotalasnih uređaja donosi ljudima. Kako su uticaji izlaganja elektromagnetskom polju mobilnih telefona mali i kumulativni na ljude i okolinu, opasnosti po ljudsko zdravlje koje nosi ovakvo izlaganje nisu vidljive u kratkom periodu. Potreban je dugotrajni period ekspozicije da bi se uočili štetni efekti. Zato široka upotreba mobilnih telefona izaziva sve glasnijia upozorenja o negativnim efektima na ljudsko zdravlje.

U trećem poglavlju dat je opis numeričke metode na kojoj se zasniva programski paket koji će se koristiti za rešavanje elektromagnetskih problema u okviru ove disertacije. Svaki problem teorije polja je neophodno definisati postavljanjem Maksvelovih jednačina u diferencijalnom i integralnom obliku i graničnih uslova na razdvojnima površinama. Proračun elektromagnetskog polja u ljudskom telu je izuzetno složen iz razloga što je ljudsko telo nehomogena, nelinearna i disperzivna sredina. Zato je neophodno korišćenje odgovarajuće numeričke metode. Numerička izračunavanja predstavljaju kombinaciju matematičkih metoda i teorije polja. Kod numeričkog rešavanja neophodno je na korektan način matematičkim modelom opisati problem korišćenjem diferencijalnih jednačina, integralnih jednačina ili varijacionih izraza.

Prikazani su numerički modeli mobilnog telefona i glave deteta koji su korišćeni za različite scenarije upotrebe mobilnog telefona. U cilju što vernijeg odgovora na postavljene ciljeve kreiran je 3D model pametnog mobilnog telefona koji po dimenzijama, obliku i anteni koju koristi odgovara aktuelnim pametnim mobilnim telefonima. Takođe kreiran je i model glave sedmogodišnjeg deteta, koji po dimenzijama i obliku odgovara anatomskim karakteristikama realne glave deteta.

U četvrtom poglavlju prikazan je istraživački model koji odgovara realnoj situaciji korišćenja mobilnog telefona za prenos govora. Simulirani su uslovi rada telefona za različite noseće frekvencije, kako za aktuelne tako i za eksperimentalne radne frekvencije budućeg 5G standarda. Prikazana je raspodela intenziteta elektromagnetskog polja tj. intenziteta

električnog i magnetskog polja, raspodela vrednosti SAR i zapreminske gustine apsorbovane energije za više različitih frekvencija.

U petom poglavlju prikazana je raspodela temperature i SAR u modelu glave deteta za više različitih preseka na nosećoj frekvenciji mobilnog telefona od 900MHz. Verovatno najbolji način da se razume elektromagnetsko dejstvo na organizam je istraživanje toplotne interakcije sa telom. Procena efekata izloženosti zračenju mobilnih telefona se zasniva na određivanju prodrlog elektromagnetskog polja unutar glave i njegove raspodele, kao i apsorbovane energije, što rezultira povećanjem temperature tkiva u ljudskoj glavi.

U šestom poglavlju simuliran je scenario čitanja sadržaja sa telefona prilikom aktivnog prenosa podataka preko mobilne mreže. Ispitivano je više slučajeva udaljenosti telefona od očiju deteta i uticaj elektromagnetskog polja telefona na oči deteta. U tu svrhu razvijen je model oka deteta koji odgovara realnom oku po anatomskim karakteristikama. Kao rezultat uticaja zračenja mobilnog telefona data je raspodela električnog polja, SAR i raspodela temperature na nosećoj frekvenciji mobilnog telefona od 900MHz.

U sedmom poglavlju izvršena je analiza uticaja parametara tkiva na raspodelu elektromagnetskog polja za model glave deteta kod koga su korišćene različite vrednosti elektromagnetskih osobina tkiva i organa. Suštinska razlika između različitog uticaja elektromagnetskog zračenja na odrasle osobe i decu pored razlike u veličini i obliku glave ogleda se i u razlici u morfologiji i sastavu tkiva. Tu se pre svega misli na sadržaj vode u tkivu kao i razvoj različitih organa sa godinama.

U svrhu analize razmatrana su dva slučaja: u prvom, tkiva i organi modela glave deteta su imali elektromagnetske osobine koje su identične elektromagnetskim osobinama tkiva i organa odrasle osobe, a u drugom, tkiva i organi modela glave deteta su imali elektromagnetske osobine koje su prilagođene sedmogodišnjem detetu. Izvršeno je poređenje dobijenih vrednosti intenziteta električnog polja i SAR za oba slučaja na 900MHz, 1800MHz i 2100MHz.

U osmom poglavlju prikazani su rezultati koji se odnose na razliku u raspodeli elektromagnetske energije kod dece i odraslih. Kako bismo utvrdili da li dimenzije i oblik glave imaju značajan uticaj na količinu apsorbovane energije, a samim tim i dubinu penetracije elektromagnetskog talasa, izvršeno je poređenje uticaja zračenja za slučaj modela mobilnog telefona na model glave deteta i odrasle osobe. Pored postojećeg modela glave deteta razvijen je model glave koji po svojim karakteristikama, dimenzijama i anatomskom obliku odgovara glavi odrasle osobe. Razmatrana su odstupanja u vrednosti električnog polja i SAR za tri različite noseće frekvencije mobilnog telefona, 900MHz, 1800MHz i 2100MHz.

U devetom poglavlju izvršeno je poređenje modela glave odrasle osobe i fantoma. Cilj je da se utvrdi odstupanje izmerenih vrednosti elektromagnetskog polja kod fantoma koji se koristi u laboratorijskim uslovima za merenje električnog polja i SAR za različite modele mobilnih telefona i realističnijeg modela ljudske glave pod istim uslovima. U tu svrhu, model glave odrasle osobe je modifikovan tako da svojim karakteristikama odgovara modelu fantoma. Oba modela imaju isti spoljašnji izgled kako bi uslovi izlaganja elektromagnetskom zračenju bili identični. Razmatrana su odstupanja u vrednostima električnog polja i SAR za noseću frekvenciju mobilnog telefona od 900MHz.

# 1. Fizičke karakteristike apsorpcije energije u biološkim materijalima

## 1.1 Elektromagnetske osobine tkiva

Detaljno poznavanje dielektričnih osobina bioloških tkiva je od suštinskog značaja za razumevanje interakcije elektromagnetskog zračenja sa telom.

Kako su biološke sredine nehomogene, nelinearne i disperzivne, za proučavanje uticaja elektromagnetskih polja na biološka tkiva neophodno je poznavati elektromagnetske osobine tkiva i organa.

Nehomogenost tkiva je posledica njegove strukture. Poznato je da tkivo sadrži visok procenat vode, rastvorenih organskih molekula, makromolekula, jona i nerastvorljivih materija. Upravo prisutnost jona ima značajnu ulogu pri interakciji sa električnim poljem, omogućavajući jonsku provodnost i polarizacione efekte. Kretanje jona određuje kondukcione struje.

Kako se čovek u elektromagnetskom smislu ponaša kao poluprovodna sredina, neophodno ga je opisati odgovarajućim elektromagnetskim osobinama. Tu se pre svega misli na dielektričnu konstantu,  $\epsilon$ , magnetnu propustljivost,  $\mu$ , i specifičnu provodnost,  $\sigma$ , koje su sve frekvencijski zavisne. Ovi parametri opisuju interakciju spoljašnjeg elektromagnetskog polja sa medijumom.

Provodnost medijuma se može posmatrati kao mera sposobnosti prenosa njegovih naelektrisanja kroz njegovu zapreminu usled dejstva električnog polja. Slično, dielektrična konstanta je mera sposobnosti njegovih dipola da rotiraju ili mera smeštanja njegovih naelektrisanja usled dejstva spoljašnjeg polja [21].

Za skoro sve medijume, vrednosti elektromagnetskih parametara variraju u zavisnosti od frekvencije primenjenog signala. Ova promena se naziva disperzija.

Biološka tkiva se mogu posmatrati kao materijali kod kojih se za relativnu magnetnu propustljivost,  $\mu_r$ , pretpostavlja da je 1, odnosno  $\mu = \mu_0$ , tako da su u ovom radu analizirane promene dva preostala parametra, dielektrične konstante  $\epsilon$  i električne provodnosti  $\sigma$ .

Dielektrična svojstva materijala su određena kompleksnom relativnom dielektričnom konstantom  $\underline{\epsilon}_r$  koja se izražava kao  $\underline{\epsilon}_r = \epsilon'_r - j\epsilon''_r$ , gde je  $j = \sqrt{-1}$ .  $\epsilon'_r$  je realni deo relativne dielektrične konstante i predstavlja meru pomeranja naelektrisanja i posledično energije koja se nalazi u materijalu, a  $\epsilon''_r$  je imaginarni deo relativne dielektrične konstante koji se još naziva i spoljašnji faktor gubitaka i predstavlja meru rasipanja električne energije.

Pokretljivost slobodnih naelektrisanja omogućava provodnost, dok stacionarni dipoli stvaraju dielektričnu propustljivost. Njihov odnos predstavlja vreme relaksacije  $\tau = \epsilon / \sigma$  i definiše

materijal sa aspekta provodnosti (kraće vreme relaksacije veća provodnost, odnosno veće vreme relaksacije manja provodnost).

U stabilnom stanju razlika između provodnosti i dielektrične konstante je jasna, ali na višim frekvencijama one su povezane. Imajući ovo u vidu, kompleksnu električnu provodnost,  $\underline{\sigma}$ , možemo predstaviti kao

$$\underline{\sigma} = \sigma + j\omega\varepsilon \quad (1.1)$$

gde je  $\omega$  (rad/s) kružna učestanost ( $\omega = 2\pi f$ ). I realni i imaginarni delovi kompleksne provodnosti mogu da zavise od frekvencije. Za mnoge bioelektrične pojave, prvi izraz u jednačini (1.1) je mnogo veći od drugog, tako da se tkivo može predstaviti kao čisto provodno [22].

Spoljašnji faktor gubitaka,  $\varepsilon_r''$ , povezan je sa električnom provodnošću sledećom jednačinom

$$\varepsilon_r'' = \frac{\sigma}{\varepsilon_0\omega}, \quad (1.2)$$

gde je  $\varepsilon_0$  dielektrična konstanta slobodnog prostora a  $\omega$  je kružna učestanost polja.

Dielektrične osobine bioloških tkiva su mera interakcije elektromagnetskog zračenja sa sastavom tkiva na ćelijskom i molekularnom nivou i frekvencijski i temperaturno su jako zavisne. Njihov dielektrični spektar se sastoji iz tri glavna regiona poznatih kao  $\alpha$ ,  $\beta$  i  $\gamma$  disperzije, koje se javljaju na niskim, srednjim i visokim frekvencijama u frekvencijskom opsegu od Hz do GHz.

Niskofrekvencijska  $\alpha$  disperzija u opsegu od reda Hz do reda kHz povezana je sa procesima jonske difuzije na mestu ćelijske membrane,  $\beta$  disperzija se prostire duž 3-4 frekvencijske dekade centrirane u opsegu reda veličine 100kHz i uglavnom se javlja zbog polarizacije ćelijske membrane i organskih makromolekula dok se  $\gamma$  disperzija javlja zbog molekularne polarizacije vode tkiva u opsegu reda GHz [23].

Kako mobilni telefoni rade u gigahercnom opsegu, upravo je  $\gamma$  disperzija posebno važna. Kako je već napomenuto,  $\gamma$  disperzija se javlja zbog polarizacije i relaksacije molekula vode [24-27]. Tkivo sa velikim sadržajem vode pokazuje  $\gamma$  disperziju slično kao čista voda kada je uzeto u obzir prisustvo organske materije. Frekvencijska zavisnost kompleksne dielektrične konstante u regionu  $\gamma$  disperzije može se predstaviti kao

$$\underline{\varepsilon}(\omega) = \varepsilon_{\infty} + \sum_n \frac{\Delta\varepsilon_n}{1 + (j\omega\tau_n)^{1-\alpha_n}} + \frac{\sigma_i}{j\omega\varepsilon_0}. \quad (1.3)$$

Ovaj izraz predstavlja tzv. Cole-Cole jednačinu u kojoj je  $\Delta\varepsilon_n = \varepsilon_{sn} - \varepsilon_{\infty}$  disperzija relativne dielektrične konstante u  $n$ -toj disperzionoj oblasti,  $\varepsilon_{\infty}$  dielektrična konstanta za frekvencije polja pri kojima je  $\omega\tau \gg 1$ ,  $\varepsilon_s$  je dielektrična konstanta za  $\omega\tau \ll 1$ ,  $\tau$  je vremenska konstanta,  $\alpha$  je parametar distribucije koji uzima vrednost između 0 i 1 i  $\sigma_i$  je jonska provodnost u medijumu.

Analizom eksperimentalnih podataka može se utvrditi zavisnost između  $\varepsilon_s$  i sadržaja vode tkiva, pri čemu  $\varepsilon_s$  raste sa porastom sadržaja vode. Vrednost parametra distribucije  $\alpha$  je nula za čistu vodu, ali je  $\geq 0$  za većinu tkiva dok je za telesne tečnosti zanemarljiva. U tkivu, srednje vreme relaksacije  $\tau$  je generalno duže od odgovarajuće vrednosti za čistu vodu.

Već je rečeno da su dielektrične osobine tkiva zavisne od frekvencije, ali takođe zavise i od temperature i sastava tkiva.

Zavisnost dielektričnih osobina bioloških tkiva od godina se uglavnom oslanja na činjenicu da se dielektrična konstanta i provodnost mogu izraziti u funkciji sadržaja vode u tkivu (*TBW-Total Body Water Content*) čija se količina razlikuje u tkivu u zavisnosti od godina i respektivno opada sa godinama. TBW nije za sve isti, već se razlikuje i kod ljudi istih godina a takođe zavisi i od pola.

Novorođenčad imaju veći sadržaj vode u odnosu na salo tako da najveći deo njihove mase otpada na unutrašnje organe. Pored sadržaja vode takođe treba uzeti u obzir i razvoj različitih organa sa godinama.

Za određivanje dielektričnih osobina bioloških tkiva kod dece i poređenje sa odraslima, na osnovu dosadašnjih istraživanja, postoje dve mogućnosti:

- *In vivo* merenje dielektričnih osobina životinjskih bioloških tkiva različite starosti sa ciljem da se potvrdi uticaj godina na dielektrične osobine tkiva životinja. Ovde je glavni problem povezivanje dobijenih vrednosti za životinje sa odgovarajućim vrednostima za ljudska biološka tkiva, odnosno pronalaženje korelacije između dielektričnih osobina životinja i ljudi za različite uzraste.
- Izvođenje empirijskih formula za ocenu dielektričnih osobina ljudskih bioloških tkiva u funkciji godina.

Kako je teško dobiti podatke o dielektričnim osobinama tkiva od ljudskih kadavera, podaci dobijeni za dielektrične parametre tkiva i organa oslanjaju se na rezultate iz studija sprovedenim nad životinjama. U nekoliko studija sa pacovima [28, 29] pokazano je da se provodnost i dielektrična konstanta smanjuju sa godinama. Prikazani su rezultati za vrednosti dielektričnih osobina tkiva pacova koji su eksperimentalno izmereni kod jedinki starosti od 10 do 70 dana.

Merene su dielektrične osobine tkiva pacova za šest različitih starosnih doba na 37°C u frekvencijskom opsegu od 130 MHz do 10 GHz. Rezultati su pokazali generalno smanjenje vrednosti dielektričnih osobina sa starošću jedinke. Za pacove starosti do 10 dana vrednosti za dielektrične osobine tkiva su bili veći oko 20% nego za reproduktivno zrele pacove (stare oko 50 dana). Ovo smanjenje je bilo primetnije kod tkiva lobanje, kože i mozga a manje kod tkiva abdomena. Kao razlog smanjenja vrednosti za dielektrične osobine tkiva sa starošću, autori vide u činjenici da se sa godinama smanjuje sadržaj vode kao i organski sadržaj u tkivima. Izmereni rezultati za odrasle jedinke u različitim životinjskim vrstama pokazuju da postoji varijacija parametara manje od 5% od životinje do životinje kada se razmatra isti tip tkiva.

U radu u kom je vršeno eksperimentalno određivanje vrednosti dielektrične konstante i provodnosti goveđeg mozga i očnog tkiva potvrđeno je da su vrednosti dielektrične konstante tkiva mladih životinja za 15-22% i provodnosti 12-15% veće nego kod tkiva starijih životinja [30].

U studiji [23] dielektrična merenja su obavljena za 54 različita tkiva, organa i telesnih tečnosti svinja. Ukupno, podaci su prikupljeni od merenja nad 21 životinjom a najmanje 6 merenja su izvedena za svako tkivo. Životinje koje su obuhvaćene studijom su svinje čija starost odgovara periodu ljudskog puberteta sa prosečnom težinom od  $53,9 \pm 4,6$  kg (srednja vrednost  $\pm$  stdev). Sva merenja su obavljena u frekvencijskom opsegu od 50 MHz do 20 GHz, nad tkivima životinja težine 10, 50 i 250 kg koje odgovaraju mladim i zrelim životinjama. Životinje od oko 50 kg su bile približne starosti 90-105 dana. Životinje od oko 10 kg ( $10,6 \pm 1,3$  kg) bile su mlade svinje starosti oko 37 dana. S druge strane, životinje od oko 250 kg ( $253,1 \pm 30,7$  kg) su bile zrele jedinke sa prosečnom starošću od 626 dana. Ovaj izbor životinja različitih starosti trebao je da pokaže moguće varijacije dielektričnih osobina tkiva. Zbog težine zrelih jedinki, nije bilo praktično moguće izvršiti dielektrična merenja u *in vivo* uslovima, tako da su sva merenja sprovedena *in vitro*.

Uticao godina na dielektrične osobine je primećen kod tkiva kao što su: bela masa, moždana opna, salo, koža, lobanja i kičmena moždina, dok kod tkiva kao što su jezik, rožnjača i siva masa nije primećen uticaj godina na ove parametre.

## 1.2 Specifična stopa apsorpcije (SAR)

Ukoliko se biološko tkivo nađe na putu prostiranja elektromagnetskog talasa dolazi do njegovog prodiranja u tkivo i tom prilikom se deo energije talasa apsorbuje u tkivu. Javlja se sila na naelektrisane čestice u tkivu kao posledica dejstva električne i magnetske komponente elektromagnetskog polja. Dolazi do povećanja energije koja kao posledicu ima povećanje temperature u tkivu. Razlika energije talasa na granicama jednog objekta (energije koja ulazi i energije koja izlazi) predstavlja apsorbovanu energiju. Upravo ovako definisana apsorbovana



energija se koristi kako bi se objasnio uticaj elektromagnetskog zračenja na biološku materiju. U tu svrhu uvedena je veličina koja se naziva specifična stopa apsorpcije, SAR.

Opšte je poznato da je ćelija i sama izvor električnog polja i kako u ćeliji postoje električna polja koja kontrolišu fiziološke funkcije ćelije, evidentno je da istovremeno dejstvo spoljašnjeg i unutrašnjeg električnog polja može izazvati porast temperature.

SAR predstavlja meru brzine apsorpcije energije elektromagnetskog talasa po jedinici mase biološkog tkiva, i ta vrednost može biti data kao vrednost u bilo kojem trenutku u tkivima ili kao usrednjena vrednost u određenoj masi tkiva ili celog tela

$$\text{SAR} = \frac{d}{dt} \left( \frac{Q}{m} \right), \quad (1.4)$$

pri čemu je  $Q$  količina toplote, a količnik  $\frac{dQ}{dt}$  predstavlja snagu Džulovih gubitaka  $P$ . Kako je zapreminska gustina snage Džulovih gubitaka

$$\frac{dP}{dV} = JE = \sigma E^2, \quad (1.5)$$

odnosno

$$P = \sigma E^2 V, \quad (1.6)$$

dobijamo sledeći izraz za SAR

$$\text{SAR} = \frac{P}{m} = \frac{\sigma E^2 V}{\rho_m V} = \frac{\sigma E^2}{\rho_m} \quad (1.7)$$

gde je  $\rho_m$  specifična gustina tela.

Ako telo posmatramo kao homogenu sredinu, količina toplote koju ono primi pri povećanju sopstvene temperature za  $\delta T$  određuje se sledećim izrazom  $\delta Q = mc_p \delta T$ , gde je  $c_p$  specifična toplota, a  $\delta T$  priraštaj temperature. Ako snagu u izrazu za SAR predstavimo kao  $P = \frac{dQ}{dt}$ , tada za

SAR možemo pisati

$$\text{SAR} = \frac{P}{m} = \frac{dQ}{mdt} = \frac{mc_p dT}{mdt} = c_p \frac{dT}{dt} \quad (1.8)$$

što je alternativni izraz za SAR koji dozvoljava izračunavanje brojne vrednosti za SAR mereći brzinu

promene temperature tkiva  $\frac{dT}{dt} \approx \frac{\delta T}{\delta t}$ .

Za merljivi vremenski interval  $\delta t$  i odgovarajuće merljivo povećanje temperature  $\delta T$ , jednačina (1.8) se može napisati kao:

$$\text{SAR} = c_p \frac{\delta T}{\delta t} . \quad (1.9)$$

Budući da su promene u specifičnoj toploti unutar biološke materije obično mnogo manje od odgovarajućih promena provodnosti [31-33] kao rezultat imamo uniformniju raspodelu temperature nego električnog polja, pa jednačine (1.8) i (1.9) obezbeđuju bolji način za procenu SAR a samim tim i definiciju.

Ako želimo da definišemo SAR u određenoj tački prostora, potrebno je veličine posmatrati lokalno, tj. definiše se lokalni SAR kao količnik brzine promene apsorbovane energije u beskonačno maloj zapremini posmatrane tačke prostora i mase te zapremine, jednačina (1.7), pri čemu je  $P$  brzina apsorpcije energije, ili apsorbovana snaga po jedinici zapremine [W/kg], a sve veličine odnose se na beskonačno malu zapreminu posmatrane tačke.

Mnogo praktičnija veličina je usrednjeni SAR kao odnos snage apsorbovane u telu i mase biološkog tkiva. On se dobija integracijom izraza za lokalni SAR po celokupnoj željenoj zapremini,

$$\text{SAR}_{\text{sr}} = \frac{1}{V} \int_V \text{SAR} dV . \quad (1.10)$$

Razlikujemo sledeće definicije za SAR:

- ❖ Usrednjeni SAR koji se izračunava za celo telo, glavu, ruke ili drugi deo tela i koristi se za opisivanje izloženosti zračenju od izvora u dalekoj zoni zračenja.
- ❖ Lokalni SAR koji se izračunava kada je izvor zračenja vrlo blizu tela koje se nalazi delimično ili celo u bliskoj zoni zračenja. Ovako definisan SAR predstavlja SAR u tački.
- ❖ SAR za 10g mase, 1gr mase ili 1 cm<sup>3</sup> zapremine predstavlja usrednjeni SAR za određeni deo prostora. Ukoliko je taj deo prostora izuzetno mali, na primer 1gr, može se posmatrati kao lokalni SAR.

- ❖ Vršni SAR ili maksimalna vrednost lokalnog SAR. Maksimalna vrednost SAR je značajna jer ukazuje na mesta u telu kod kojih se može pojaviti povećano zagrevanje i mogući izraženiji biološki efekti.

### 1.2.1 Nepouzdanost proizvođačke vrednosti SAR mobilnih telefona kao mera za procenu maksimalne izloženosti elektromagnetskom zračenju

Iako su SAR vrednosti važan pokazatelj u proceni maksimalno moguće izloženosti EM zračenju od određenog modela mobilnog telefona, te vrednosti ne daju dovoljno informacija o visini izloženosti u svim uslovima rada da bi se pouzdano izvršilo poređenje pojedinačnih modela mobilnih telefona. Zbog toga su vrednosti SAR namenjene samo kako bi se osiguralo da se upotrebom mobilnog telefona ne prelazi maksimalni nivo dozvoljene izloženosti EM zračenju.

Od proizvođača mobilnih telefona se zahteva da sprovede svoja testiranja SAR koja podrazumevaju najveću snagu emitovanja za sve frekvencijske opsege za konkretni mobilni telefon. Ovako prikazane SAR vrednosti date su za jedno merenje za sve frekvencijske opsege u kojima se određeni model telefona koristi, ali to ne ukazuje na količinu RF izloženosti potrošača tokom normalne upotrebe uređaja.

Dakle, SAR vrednosti koje se koriste ne uzimaju u obzir mnoštvo merenja izvršenih tokom testiranja. Osim toga, kod mobilnih telefona snaga stalno varira kako bi radili sa minimumom potrebne snage za komunikaciju, dok se rad sa maksimalnom snagom javlja retko. Prema tome, mobilni telefoni ne mogu se pouzdano uporediti u odnosu na njihove ukupne karakteristike izloženosti na osnovu jedne SAR vrednosti što se može videti na osnovu sledećih primera kod kojih mobilni telefon A ima veću vrednost SAR od mobilnog telefona B [34]:

- ❖ Mobilni telefon A može da ima jednu izmerenu vrednost SAR koja je veća od bilo kojeg izvršenog merenja SAR za mobilni telefon B. Mobilni telefon A bi, dakle, imao veću SAR vrednost od mobilnog telefona B, čak i ako mobilni telefon B ima veće izmerene vrednosti od telefona A u većini drugih lokacija i/ili konfiguracija korišćenja. U tom slučaju, korisnik će uglavnom dobiti ukupno više RF energije iz mobilnog telefona B.
- ❖ Mobilni telefon A bi mogao efikasnije da komunicira nego mobilni telefon B, tako da troši manje snage nego mobilni telefon B pod sličnim uslovima. Shodno tome, korisnik će dobiti ukupno više RF energije iz mobilnog telefona B.
- ❖ Najveća vrednost SAR od mobilnog telefona A možda je izmerena na poziciji koju korisnik retko ili nikada ne koristi tokom držanja telefona, a nasuprot tome korisnik može držati telefon obično u položaju za koji je ostvarena najveća vrednost za mobilni telefon B. Dakle,

korisnik će primiti najvišu RF energiju koju mobilni telefon B isporučuje, ali neće primiti najvišu RF energiju koji mobilni telefon A isporučuje.

### 1.2.2 Merenje vrednosti SAR

Merenje SAR vrednosti odvija se u specijalizovanim laboratorijama prema definisanim međunarodnim standardima [35-37].

Sistem za merenje SAR vrednosti sadrži sledeće elemente:

- Fantom,
- Dielektrik,
- Robot za pozicioniranje,
- Merna sonda,
- Softver za post-obrađu i kontrolu,
- Sistem za proveru valjanosti.

Pored ovoga sistem za ispitivanje treba da obuhvati i komponente:

- za pozicioniranje opreme koja se testira i usklađivanje sistema za skeniranje,
- za merenje tečnosti koja simulira dielektrične osobina tkiva,
- za proveru i potvrđivanje preciznosti merenja.

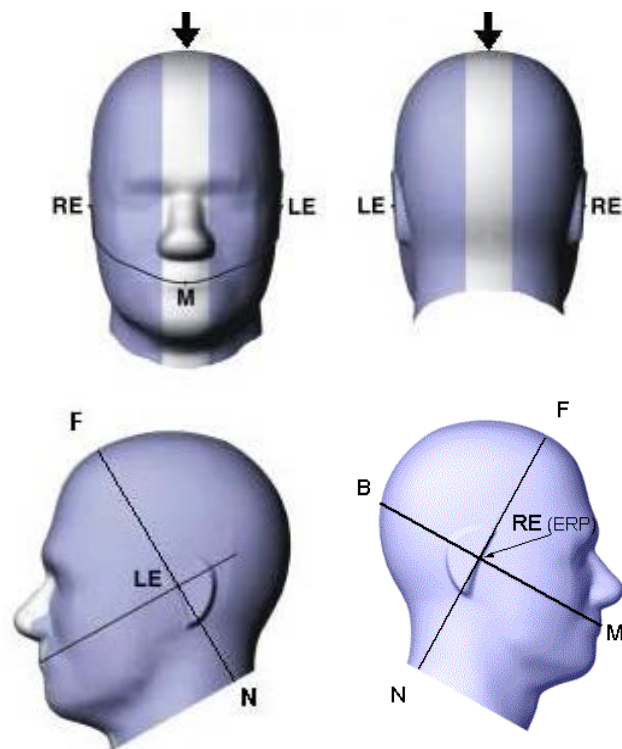
#### 1.2.2.1 Specifični antropomorfni model (SAM)

Fantomi koji se koriste u laboratorijama za testiranje zračenja mobilnih telefona i drugih bežičnih uređaja, mogu se definisati kao imitacije bioloških tela ili fizički modeli koji simuliraju karakteristike bioloških tkiva. Jedan od najčešće korišćenih fantoma za određivanje izlaganja ljudi radiofrekvencijskom polju mobilnih telefona je SAM (*Specific Anthropomorphic Mannequin*) fantom. SAM fantom predstavlja model glave čoveka od plastike [38], na osnovu 90% vojnih obveznika Sjedinjenih američkih država iz 1989 [39]. I pored toga što se standardima propisane granične vrednosti izlaganja mobilnim telefonima odnose na sve starosne grupe, od male dece do odraslih, za ispitivanje je korišćen samo fantom koji po dimenzijama odgovara odraslom muškarcu, težine oko 100kg i visine 188cm [17].

Ljuska fantoma, uključujući i rastojanje koje predstavlja ušnu školjku, je napravljena od materijala sa malom dielektričnom konstantom i malim gubicima, sa relativnom dielektričnom konstantom manjom od 5 i tangensom gubitaka manjim od 0.05 [40]. Spoljašnji izgled ljuske fantoma ima toleranciju manju od  $\pm 0.2\text{mm}$  u odnosu na SAM CAD fajlove. U bilo kojoj oblasti u okviru zračenja telefona, debljina ljuske je  $2 \pm 0.2\text{mm}$ , osim za ušnu školjku i proširenja na

obodnim zidovima. Deo koji predstavlja ušnu školjku je 6mm udaljen od granice tkiva i referentne tačke uva (ERP - *Ear Reference Point*) sa tolerancijom od  $\pm 0.2\text{mm}$ .

Koriste se tri tačke na fantomu u korelaciji sa sistemom za pozicioniranje [36]. Tačka “M” je referentna tačka za centar usta, “LE” je referentna tačka (ERP) za levo uvo i “RE” je desna ERP (slika 1.1). Ove tačke se koriste da bi se ostvarilo odgovarajuće pozicioniranje opreme za izvođenje testa (EUT - *Equipment Under Test*) u odnosu na fantoma.



Slika 1.1 Slika fantoma sa referentnim tačkama (referentna tačka desnog uva RE, referentna tačka levog uva LE, referentna tačka za usta M, B je zadnja krajnja tačka linije B-M, F je prednja krajnja tačka linije N-F i N je krajnja tačka vrata linije N-F) [36]

Fantom je ispunjen tečnošću koja je u korelaciji sa dielektričnim osobinama tkiva ljudske glave. Dielektrične osobine tkiva glave su obračunate uzimajući u obzir svojstva moždanog tkiva ljudi i granične uslove na razdvojnoj površini sa spoljašnjim slojevima tkiva glave (npr. kože i lobanje). Dielektrična konstanta i provodnost tečnosti ekvivalentne su srednjim vrednostima električnih osobina 40 tkiva u glavi.

Električne osobine tečnosti koja se koristi u fantomu navedene su u tabeli 1.1.

Tabela 1.1 Električne osobine tečnosti ekvivalentne tkivu glave

$f$ (MHz)	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)
300	45.3	0.87
450	43.5	0.87
835	41.5	0.90
900	41.5	0.97
1450	10.5	1.20
1800	40.0	1.40
1900	40.0	1.40
1950	40.0	1.40
2000	40.0	1.40
2450	39.2	1.80
3000	38.5	2.40
3500	37.9	2.91
5800	35.3	5.27
6000	35.1	5.48

#### 1.2.2.2 Robot za pozicioniranje

Robot koji drži sondu mora biti u stanju da skenira celu izloženu zapreminu fantoma u cilju procene trodimenzionalne raspodele SAR, bez uticaja na merenja SAR. Tačnost pozicioniranja sonde duž površine merenja mora biti bolja od  $\pm 0.2\text{mm}$  (slika 1.2).

Držać EUT mora dozvoliti da uređaj bude postavljen u skladu sa standardnim definicijama sa tolerancijom od  $\pm 1^\circ$  za ugao nagiba. Potrebno je da bude napravljen od materijala sa malim gubicima i niskom dielektričnom konstantom. Za ljusku fantoma, kako je već rečeno, tangens gubitaka je  $<0,05$  i dielektrična konstanta je  $<5$ , međutim, za držać mobilnog telefona to nije odgovarajući kriterijum.

Poznato je da plastični materijali u blizini određenih vrsta antena telefona mogu imati veliki uticaj na izmerene vrednosti SAR. Uslov je da se minimizira uticaj debljine materijala i gubitaka u strukturama blizu telefona.



Slika 1.2 Robot za pozicioniranje i držač [40]

### 1.2.2.3 Merna sonda

Postoji nekoliko važnih parametara za mernu sondu (slika 1.3). Ona mora biti dovoljno mala da nema rezonanse u frekvencijskom opsegu od interesa i kako bi se omogućilo precizno prostorno registrovanje polja. Isto tako, ne sme značajno da remeti strukturu polja u tečnosti. Centar merenja treba da bude što je više moguće bliže vrhu sonde, kako bi se smanjila "mrtva zapremina" pored ljuske fantoma koja se ne može direktno meriti.

Standardi preporučuju da prečnik sonde ne bi trebalo da bude veći od 8mm. Većina sistema ima sonde prečnika od oko 5mm. Ove karakteristike su obezbeđene pomoću veoma malih, kratkih dipolnih elemenata sa integrisanim diodnim detektorima u svom centru.

Sonda mora takođe biti osetljiva, linearna i izotropna. Minimalna granica detekcije treba da bude  $<0.02\text{W/kg}$  a maksimalna treba da bude  $>100\text{W/kg}$ . U okviru ovog opsega linearnost treba da bude  $\pm 0.5\text{dB}$  [36].



Slika 1.3 Merna sonda [40]

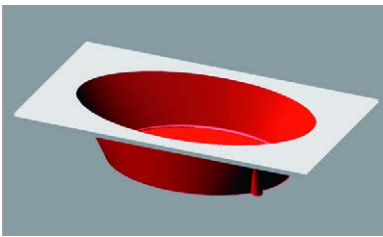
Oprema za merenje treba da bude kalibrisana kao kompletan sistem. Sonda treba da bude kalibrisana zajedno sa odgovarajućim tipom pojačavača, uređajem za merenje i sistemom za prikupljanje podataka. Oprema za merenje mora biti kalibrisana u tečnosti ekvivalentnoj tkivu na odgovarajućoj frekvenciji i temperaturi. Kalibracija sonde odvojeno od sistema je dozvoljena, pod uslovom da su navedeni uslovi opterećenja na konektoru sonde specificirani i implementirani tokom merenja.

U nastavku će biti date neke praktične realizacije fantoma koji se koriste kod merenja SAR vrednosti [41]:



#### *TWIN SAM*

Ljuska odgovara specifikacijama SAM fantoma definisanom u IEEE 1528-2003, CENELEC 50361 i IEC 62209 standardima. Zapremina punjenja je oko 25 litara.



#### *ELI4*

Fantom za testiranje usaglašenosti bežičnih uređaja u frekvencijskom opsegu od 30MHz do 6GHz. ELI4 je potpuno kompatibilan sa najnovijim nacrtom standarda IEC 62209-2. Zapremina punjenja je oko 30 litara.



#### *FLAT PHANTOMS*

Tri različita ravna fantoma optimizovana za različite namene. Unutrašnje dimenzije donjeg područja su V4.4: 650x250mm; V4.9: 395x360mm i dvostruki fantom V5.0 sa 160x360mm po kontejneru.



#### *WHOLE-BODY MANNEQUIN*

Fiberglas konstrukcija je zasnovana na anatomski oblikovanom muškom modelu. Desna ruka je postavljena kao da drži uređaj ispred usta; leva ruka se prostire prema gore. Otvor za merenje je na zadnjoj strani (glava, trup, ruke, noge). Dimenzije su, visina: 1950mm; širina: 550mm; dubina: 400mm, a zapremina punjenja je oko 80 litara. Debljina ljuske varira između 3 i 4mm.



#### *SAM HEAD (SAM V4.5, V4.5 CTIA)*

Visoka preciznost je dobijena ubrizgavanjem polipropilena u SAM fantom. Debljina ljuske je  $2 \pm 0.2$ mm (6mm na uvu). SAM V4.5 je kompatibilan sa svim tečnostima koje simuliraju tkivo glave. SAM V4.5CTIA je u skladu sa CTIA standardima. Integrisani laki držač obezbeđuje precizno pozicioniranje i nisku OTA (*Over-the-air*) nesigurnost.



#### 1.2.2.4 Procedura merenja

Postupak merenja SAR vrednosti definisan je standardom IEC 62209 deo 5.1: "Test treba da se vrši pomoću minijaturne sonde koja je automatski pozicionirana za merenje raspodele unutrašnjeg električnog polja u modelu fantoma koja simulira ljudsku glavu izloženu elektromagnetskim poljima koja potiču od bežičnih uređaja. Od izmerenih vrednosti električnog polja, preračunava se raspodela SAR i maksimalna vrednost usrednjenog SAR". Test sistem treba da obuhvati i opremu za pozicioniranje tokom testa i usklađivanje sistema za skeniranje, opremu za merenje dielektričnih osobina tečnosti koja simulira tkiva i za proveru i potvrđivanje preciznosti merenja [42].

Sama procedura merenja podrazumeva sledeće korake [43]:

- Mobilni telefon je podešen da radi maksimalnom snagom i postavljen je uz glavu fantoma.
- Precizni robot pomera sondu unutar glave fantoma koja meri jačinu električnog polja koje potiče od mobilnog telefona.
- Računar analizira podatke i pretvara izmerene vrednosti električnog polja mobilnog telefona u SAR (W/kg).
- Pun test se sprovodi na svim operativnim frekvencijama za različite pozicije telefona.
- Beleži se samo maksimalna izmerena vrednost za SAR.

#### 1.2.3 Apsorpcija elektromagnetske energije kod dece

Pored razlike u veličini glave između dece i odraslih postoji i razlika u morfologiji i sastavu tkiva. Ove razlike opadaju sa povećanjem starosti deteta, ali je brzina promene različita za različite organe. Dok debljina lobanje sa oko 10 godina skoro dostiže debljinu kod odrasle osobe, obim glave nakon snažnog rasta tokom prvih godina života polako se približava obimu odrasle osobe posle 20-te godine starosti. Zbog anatomskih razlika i karakteristika dečije glave i glave odrasle osobe, razlikovaće se raspodela apsorbovane energije a samim tim i izlaganje elektromagnetskom polju.

Promene tkiva glave tokom detinjstva nisu uniformne, što objašnjava morfološke razlike između glave deteta i glave odrasle osobe. Veoma bitne promene su proces mijelinacije koji se proteže do sredine dvadesetih godina i smanjenje hematopoetske crvene srži u kostima glave. Može doći do veće apsorpcije energije elektromagnetskih polja u kostima glave sa većim udelom crvene srži, što može imati potencijalno negativne efekte na hematopoezu.

Posledica ovih promena je da deca upijaju mnogo više zračenja elektromagnetskog polja u ugroženim tkivima glave u odnosu na odrasle osobe. Osim toga, relativna dubina penetracije je veća [18, 44, 45].

Takođe se smatra da ukoliko izloženost počinje vrlo rano u životu, veća kumulativna doza može da se javi tokom života.

Na osnovu rezultata u jednoj studiji ukazano je na to da je izloženost tela deteta bila veća oko 2:1 u odnosu na telo odrasle osobe, nezavisno od uređaja koji se koristi. Kako je SAR usrednjen za celo telo odnos apsorbovane snage i mase tela, ovaj rezultat je posledica manje zapremine modela deteta. Rezultati dobijeni korišćenjem modela deteta pokazuje veću osetljivost na frekvenciju, kao i na položaj tela [46].

U [47] pokazano je da tkivo mozga dece apsorbuje oko dva puta više mikrotalasnog zračenja nego moždano tkivo odraslih.

Studija iz 2009. pokazala je da je apsorpcija u centralnom nervnom sistemu kod dece značajno veća, približno 2 puta, jer je izvor zračenja bliže pošto su slojevi kože i kostiju tanji. Takođe pokazano je da efekti izlaganja koštane srži značajno zavise od starosti osobe. Ti efekti su i do 10 puta veći kod dece u odnosu na odrasle [48].

U studiji iz 2010. godine, pokazano je da kod dece hipokampus (moždana struktura koja se nalazi u slepoočnom delu ispod kore velikog mozga i zauzima oblik potkovice. Ima važnu ulogu u regulaciji emocija i ponašanja, ali smatra se da igra važniju ulogu u procesima pamćenja i u prostornoj navigaciji) i hipotalamus (centar koji upravlja svim autonomnim i većinom endokrinih procesa u telu) apsorbuju od 1.6-3.1 puta više mikrotalasnog zračenja, a da mali mozak upija 2.5 puta veće zračenje u odnosu na odrasle. U istoj studiji pronađeno je da koštana srž kod dece apsorbuje 10 puta veće zračenje nego kod odraslih, kao i to da dečije oči apsorbuju veće zračenje nego oči odraslih [18].

Prema istraživanju u [49] uočene su veće vrednosti SAR kod manjih modela glava u odnosu na veće modele glava.

U [50] su pronađene slične razlike u glavi modela za 34-oro godišnjeg muškarca i dece uzrasta od 6 i 11 godina. Zaključeno je da postoji veća apsorpcija elektromagnetske energije, a samim tim i veće vrednosti SAR u mozgu deteta nego u mozgu odrasle osobe.

U ovim studijama, razlike u vrednosti SAR su uglavnom rezultat razlika u veličini glave. U glavama dece, mozak je bliže površini glave i posledično je tu veći SAR. Drugi faktor je veći sadržaj vode u tkivima dece u odnosu na odrasle. U [18] dobijene su 10 puta veće SAR vrednosti u srži kada se koriste dielektrični podaci za srž svinja od 10kg (koji bi trebalo približno da odgovaraju deci starosti 1-4 godina) u odnosu na vrednosti dobijene koristeći dielektrične osobine za potpuno odrasle svinje (250kg). Slično, proračuni gde su korišćeni dielektrični podaci za svinje od 50kg

(uporedivo sa decom u razvoju od 11-13 godina) su pokazali mnogo manje razlike, otprilike za faktor 2.5.

### 1.3 *Bioheat* jednačina

Svakako jedna od najbitnijih karakteristika ljudskog termoregulatornog sistema je da se temperatura tela održava na stalnom nivou (blizu 37°C) bez obzira na spoljašnje uslove ili tokom nekog termalnog stresa. Prenos toplote u živim tkivima je komplikovan proces jer podrazumeva kombinaciju provodnosti toplote u tkivima, snabdevanja krvlju i metaboličkog generisanja toplote.

Hipotalamus reguliše telesnu temperaturu termoregulatornim mehanizmima, kao što su kontrakcija krvnih sudova, drhtanje i regulatorno znojenje. On prima informacije iz centralnih i perifernih receptora temperature. Temperaturno osetljivi centralni receptori se nalaze u hipotalamusu, kičmenoj moždini, trbušnoj utrobi i velikim venama. Oni reaguju na temperature između 30°C i 42°C. Periferni receptori se nalaze u koži i sadrže dve vrste termo receptora: tople receptore i hladne receptore.

Količina protokle krvi u telu je veoma bitna za sam proces regulisanja toplote. Krv ima dvostruki uticaj na balans toplotne energije. Može biti izvor toplote ili odvodnik toplote u zavisnosti od trenutne temperature datog tkiva.

Stopa perfuzije krvi je definisana kao količina isporučene krvi u određenom tkivu u jednom minutu na 100g tkiva. Poznavanje termalnih karakteristika bioloških tkiva je osnova za razumevanje procesa prenosa toplote u biološkom sistemu. Raspodela temperature tkiva tokom izlaganja RF talasima može biti određena rešavanjem *bioheat* (BHT - *BioHeat*) jednačine. Parametre koje BHT jednačina uzima u obzir su provođenje toplote, perfuzija krvi i spoljašnje zagrevanje. Pored geometrije i termalnih karakteristika, prvo treba definisati raspodelu SAR. Sve ove informacije sa odgovarajućim granicama i početnim uslovima omogućavaju proračun raspodele temperature tkiva.

Cirkulacija krvi je najvažniji mehanizam za regulaciju telesne temperature. Krvotok ljudskog tela se sastoji od dva tipa krvnih sudova, arterija i vena, koje nose krv od srca i nazad. Glavne arterije se granaju na osnovne arterije a one na sekundarne arterije. Ovi sudovi isporučuju krv u arteriole koje prenose krv do najmanjih krvnih sudova poznatih kao kapilari. Krv se vraća u srce kroz sistem sudova poznatih kao vene.

Kada krv napušta srce ima temperaturu arterije  $T_{art}$ . U suštini ona ostaje na toj temperaturi dok ne stigne do glavne arterije gde se vrši uravnotežavanje temperature sa okolnim tkivima. Uravnotežavanje postaje potpuno pre nego što krv stigne do arteriola i kapilara. Nakon ovoga,

temperatura krvi prati temperaturu tkiva,  $T_{tk}$ , preko svojih prostornih i vremenskih varijacija sve dok krv ne dospe u vene. U ovom trenutku temperatura krvi prestaje da se uravnotežava sa tkivom i ostaje praktično konstantna, osim ako se meša sa drugom krvlju različitih temperatura na mestima ulivanja krvi u vene. Konačno, hladnija krv iz perifernih regiona i toplija krv iz unutrašnjih organa se mešaju unutar vene i desne pretkomore i komore. Nakon toplotne razmene u plućima i ponovnog mešanja u levom delu srca, krv dostiže istu temperaturu koju je imala na početku kruga [51].

U cilju što tačnijeg prikaza procesa prenosa toplote unutar živih bioloških tkiva razvijeno je više matematičkih modela. Izgradnja matematičkog modela za BHT u živom tkivu je veoma složena iz sledećih razloga:

- ❖ Model treba da uključi složene termalne procese i njihove interakcije, kao što su provodnost, prostiranje, zračenje, metabolizam, perfuzija i drugi faktori,
- ❖ Struktura tkiva je heterogena,
- ❖ Zbog složene geometrije krvnih sudova uključujući i njihovu nepravilnu strukturu, izgradnja preciznog diskretnog modela ljudskog tela je dosta teška,
- ❖ BHT problem treba da bude primenjiv kako za mikrometarske (ćelije) tako i centimetarske (tkiva) dimenzije tkiva,
- ❖ Precizni model prenosa toplote koji bi uključio i perfuziju krvi i metabolizam značajno povećava složenost modela.

Najčešće korišćen *bioheat* model je predstavljen od strane Penea 1948 [52]. Pene je predložio pojednostavljeni *bioheat* model kojim se opisuje efekat perfuzije krvi i metaboličke toplote na prenos toplote u živom tkivu.

Iako je nekoliko *bioheat* modela razvijeno poslednjih godina, kontrolni termoregulatorni mehanizmi ljudskog tela, kao što su drhtanje, znojenje, regulatorna vazodilatacija i vazokonstrikcija, nisu razmatrani u ovim modelima. S druge strane, ovi mehanizmi mogu značajno uticati na termalne uslove ljudskog tela. Da bi se uklonila ova ograničenja, razvijen je novi pojednostavljeni termoregulatorni *bioheat* (STB - *Simplified Thermoregulatory Bioheat*) model baziran na kombinaciji već poznate Peneove jednačine i Gaggeovog modela [53].

### 1.3.1 Peneov model

Zbog jednostavnosti, Peneov *bioheat* model je implementiran u različitim biološkim istraživanjima. Ovaj model je prvobitno razvijen za predviđanje prenosa toplote u ljudskoj podlaktici. Njegov rad se sastojao od serije eksperimenata u kojima je merio raspodelu temperature u podlaktici devet čoveka. Tokom merenja temperature unutar ruke okruženje tokom eksperimenta

je bilo termalno nepromenljivo. Na osnovu ovih merenja je predložio model za opisivanje efekata metabolizma i perfuzije krvi na balans energije kroz tkivo.

Peneov *bioheat* model je zasnovan na četiri pojednostavljene pretpostavke [54]:

- Zanemaren je sav prethodni prenos toplote između krvi i tkiva kroz arteriole i venule,
- Pretpostavlja se da je protok krvi u malim kapilarima izotropan.
- Veći krvni sudovi u blizini kapilara ne igraju nikakvu ulogu u razmeni energije između tkiva i kapilarne krvi.
- Pretpostavlja se da krv trenutno razmjenjuje energiju i uravnotežava se sa temperaturom tkiva.

Na osnovu ovih pretpostavki, Pene je modelirao uticaj krvi kao izvor izotropne toplote ili odvod koji je proporcionalan brzini protoka krvi i razlike između temperature centralnog dela tela i temperature lokalnog tkiva. Dakle, Pene je predložio model za opisivanje efekata metabolizma i perfuzije krvi na energetski bilans u tkivu. Ova dva efekta su spojena u okviru jednačine rasprostiranja toplote kao:

$$\rho_{tk} C_{tk} \frac{\partial T_{tk}}{\partial t} = \nabla \cdot k_{tk} \nabla T_{tk} + \rho_{kr} C_{kr} \omega_{kr} (T_{art} - T_{tk}) + q_m \quad (1.11)$$

gde su  $\rho_{tk}$ ,  $C_{tk}$ ,  $T_{tk}$  i  $k_{tk}$  gustina, specifična toplota, temperatura tkiva i termalna provodnost tkiva, respektivno. Takođe,  $T_{art}$  je temperatura arterijske krvi,  $\omega_{kr}$  stopa perfuzije krvi,  $\rho_{kr}$  gustina krvi,  $C_{kr}$  specifična toplota krvi i  $q_m$  je metabolička stopa toplote u  $W/m^3$ .

Treba napomenuti da se za metaboličku toplotu pretpostavlja da se homogeno distribuira širom tkiva. Takođe, pretpostavlja se da je efekat perfuzije krvi homogen i izotropan i da se termalno uravnoteženje javlja u mikro cirkulatornim kapilarima. Prema ovom modelu, krv ulazi u kapilare na temperaturi arterijske krvi,  $T_{art}$ , gde se javlja razmena toplote koja izjednačava temperaturu sa temperaturom okolnog tkiva,  $T_{tk}$ . Pretpostavlja se da nema prenosa energije pre ili posle prolazka krvi kroz kapilare, tako da je temperatura na kojoj krv ulazi u vensku cirkulaciju temperatura lokalnog tkiva [55].

Iako je Peneov *bioheat* model često adekvatan za grubo opisivanje efekta protoka krvi na temperaturu tkiva, postoje ozbiljni nedostaci u njegovom modelu zbog jednostavnosti. Nedostaci Peneovog *bioheat* modela dolaze iz osnovnih pretpostavki koje su uvedene u ovom modelu. Ovi nedostaci su [55]:

- Toplotno uravnoteženje se odvija u sudovima pre arteriola i posle venula a ne u kapilarima, kako je Pene pretpostavio.

- Usmerenje perfuzije krvi je važan faktor u razmeni energije između sudova i tkiva. Peneova jednačina ne uzima u obzir ovaj efekat.
- Peneova jednačina ne uzima u obzir lokalnu vaskularnu geometriju. Tako se značajne specifičnosti sistema krvotoka ne računaju.

Arterijska temperatura varira neprekidno od unutrašnje telesne temperature aorte do sekundarnih arterija koje snabdevaju arteriole i slično tokom venskog povratka. Za razliku od Peneove pretpostavke, temperatura krvi pre arteriole nije jednaka temperaturi centralnog dela tela i povratna temperatura vene nije jednaka temperaturi lokalnog tkiva.

## 2. Standardi, preporuke i biološki efekti elektromagnetskog zračenja

### 2.1 Standardizacija bezbednih nivoa elektromagnetskog zračenja

Mikrotalasni komunikacioni sistemi razvijali su se proteklih godina zapanjujućom brzinom. Izuzetna ekspanzija korišćenja mobilnih uređaja dovela je u žižu interesovanja istraživanje uticaja mikrotalasnog zračenja na ljudski organizam, radi procene rizika po zdravlje čoveka i u cilju definisanja standarda za maksimalnu izloženost ovom zračenju.

Potreba da se različiti servisi koji se koriste putem mobilnih uređaja učine dostupnim na svakom koraku neizostavno je zahtevala da što veći prostor bude pokriven što kvalitetnijim signalom. Da bi se ovo ostvarilo bilo je neophodno postaviti ogroman broj baznih stanica mobilne telefonije, primopredajne stanice mikrotalasnih linkova, radio i TV predajnike, itd. Najveći deo ovih sistema nalazi se u naseljenim oblastima, na visokim stubovima ili krovovima i fasadama visokih zgrada ili pored glave čoveka u slučaju mobilnih telefona.

Sve ovo je uticalo na potrebu da se postave propisi kojima bi na što adekvatniji način odredile bezbedonosne granice za izlaganje elektromagnetskom zračenju.

Većina današnjih standarda bazirana je na potrebi zaštite od štetnih termičkih efekata do kojih dolazi usled relativno kratke (akutne) izloženosti jakim RF poljima.

Standardi u oblasti zaštite od elektromagnetskog zračenja odnose se na propise, preporuke i granične vrednosti kojima se određuju maksimumi izlaganja zračenju u cilju zaštite ljudskog zdravlja.

#### 2.1.1 ICNIRP standard

Međunarodna komisija za zaštitu od nejonizujućih zračenja, (ICNIRP – *International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection*) je nezavisna naučna organizacija čiji je zadatak donošenje propisa o rizicima po zdravlje usled izlaganja nejonizujućem zračenju. ICNIRP propisi su usvojeni od strane Saveta Evrope kao važeći standard za sve zemlje članice Evropske Unije.

U okviru ICNIRP standarda [56] definišu se osnovna ograničenja i referentni nivoi.

### 2.1.1.1 Osnovna ograničenja prema ICNIRP standardu

Između 1Hz i 100kHz osnovna ograničenja se odnose na gustinu struje, u cilju zaštite od efekata na nervni sistem. Između 100kHz i 10MHz ograničenje se odnose i na gustinu struje i na vrednosti za SAR.

U opsegu od 10MHz do 10GHz uzimajući u obzir bezbednosni faktor, i zahtev da porast temperature tkiva ne sme biti veći od 1°C, usrednjena vrednost za SAR za celo telo za stanovništvo se ograničava na 0.08W/kg, a za profesionalno osoblje na 0.4W/kg. Lokalizovana vrednost za SAR u glavi i trupu, usrednjeno za bilo kojih 10g tkiva, ne sme preći 2W/kg za stanovništvo odnosno 10W/kg za profesionalno osoblje. Lokalizovana vrednost za SAR u ekstremitetima, usrednjeno za bilo kojih 10g tkiva, ne sme preći 4W/kg za stanovništvo odnosno 20W/kg za profesionalno osoblje. Sve vrednosti za SAR su usrednjene za period od bilo kojih 6 minuta tokom izloženosti.

Za izloženost RF zračenjima između 10 i 300GHz, ICNIRP propisi utvrđuju osnovna ograničenja samo za gustinu snage u cilju sprečavanja prekomernog zračenja tkiva neposredno uz površinu tela. Ova ograničenja su 50W/m<sup>2</sup> za profesionalnu izloženost i 10W/m<sup>2</sup> za izloženost opšteg stanovništva.

### 2.1.1.2 Referentni nivoi prema ICNIRP standardu

Referentni nivoi služe za praktičnu procenu izloženosti, kako bi se odredilo da li postoji verovatnoća da budu prekoračena osnovna ograničenja. U tabelama 2.1 i 2.2 dati su referentni nivoi za izloženost stanovništva i profesionalnog osoblja u frekvencijskom opsegu od 10MHz do 300GHz. U ovim tabelama frekvenciju  $f$  treba uneti u MHz.

Tabela 2.1 ICNIRP referentni nivoi za izloženost stanovništva elektromagnetskom polju za opseg frekvencije od 10MHz do 300GHz

Frekvencijski opseg	$E$ [V/m]	$H$ [A/m]	$S$ [W/m <sup>2</sup> ]
10-400 MHz	28	0.073	2
400-2000 MHz	$1.375 f^{1/2}$	$0.003 f^{1/2}$	$f / 200$
2-300 GHz	61	0.16	10



Tabela 2.2 ICNIRP referentni nivoi za profesionalnu izloženost elektromagnetskom polju za opseg frekvencija od 10MHz do 300GHz

Frekvencijski opseg	$E$ [V/m]	$H$ [A/m]	$S$ [W/m <sup>2</sup> ]
10-400 MHz	61	0.16	10
400-2000 MHz	$3 f^{1/2}$	$0.008 f^{1/2}$	$f / 40$
2-300 GHz	137	0.36	50

## 2.1.2 Nacionalni standardi

Mada je usvojena Preporuka saveta Evropske unije [57], državama je ostavljena mogućnost da mogu primeniti svoje sopstvene standarde. Među zemljama u Evropi ima dosta razlika u pogledu gornje granice za RF zračenje koje potiče od mobilne telefonije.

### 2.1.2.1 Granice izloženosti za stanovništvo

#### Evropska unija

Imajući u vidu da Preporuka o granicama izloženosti nije pravno obavezujuća, u zemljama članicama Evropske unije razlikujemo tri različita pristupa [58].

U prvoj grupi zemalja članica Preporuka je povezana sa nacionalnim zakonodavstvom. To znači da će biti primenjena osnovna ograničenja i referentni nivoi iz Preporuke. Države članice iz ove grupe su Kipar, Češka, Estonija, Finska, Francuska, Mađarska, Irska, Malta, Portugal, Rumunija i Španija. Španski region Katalonije ima strože propise od federalne vlade. U Nemačkoj i Slovačkoj su referentni nivoi postali praktično i granice izlaganja.

U drugoj grupi nalaze se zemlje, u kojima granice iz Preporuke nisu obavezujuće ili ne postoje blaža ograničenja ili ne postoje propisi. Države članice iz ove grupe su Austrija, Danska, Letonija, Holandija, Švedska i Velika Britanija. U Velikoj Britaniji su telekomunikacione kompanije potpisale dobrovoljno da poštuju pravila i odredbe u Preporuci.

Preostale zemlje Evropske unije su u trećoj grupi, i u njima su na snazi strožija osnovna ograničenja i/ili referentni nivoi iz predostrožnosti ili zbog pritiska javnosti.

#### Druge zemlje

Industrijalizovane zemlje izvan EU koriste različite načine da ograniče izloženost stanovništva radiofrekventnom elektromagnetskom polju.

Na primer, u Australiji [58] obavezna osnovna ograničenja i referentni nivoi u Standardu za zaštitu od zračenja su identični onima u evropskoj Preporuci [57].

U Rusiji, uslovi za zaštitu stanovništva su postavljeni 1999. godine. Granice za specifične opsege frekvencija su postavljene kasnijim zahtevima. Granica izlaganja za gustine snage za elektromagnetsko polje u opsegu od 300MHz do 300GHz je 2% od referentnih nivoa u evropskoj Preporuci. Razlog za to je da se spreče potencijalni biološki efekti koji se generalno ne vide kao zdravstveni rizik u zapadnim zemljama [58].

Propis o nejonizujućem zračenju u Švajcarskoj je na snazi od 2000. godine. Obavezne granice izloženosti identične su sa referentnim nivoima u evropskoj Preporuci. Strožija granica od 10% od referentnog nivoa u evropskoj Preporuci primenjuje se iz predostrožnosti za jačinu električnog polja za antene mobilne telefonije [58].

U Sjedinjenim američkim državama, savezni zakon za radio predajnike postavlja osnovna ograničenja identična onim u evropskoj Preporuci. Lokalizovana vrednost za SAR u glavi i trupu, usrednjeno za 1g tkiva, ne sme preći 1.6W/kg [59]. Kod referentnih nivoa vrednosti su malo više nego u evropskoj Preporuci jer se primenjuje drugačiji model za izračunavanje.

#### 2.1.2.2 Granice izloženosti za profesionalno osoblje

### **Evropska unija**

Kao i kod izloženosti stanovništva, državama članicama je omogućeno da same postave strože granice izloženosti. Granične vrednosti izlaganja iz Direktive 2004/40/EC [60] su prenešene u nacionalno zakonodavstvo Kipra, Češke, Italije, Letonije, Litvanije, Rumunije i Slovačke [58]. U Finskoj je i dalje na snazi odluka Ministarstva za socijalna pitanja i zdravstvo od 1991. godine koji postavlja granične vrednosti izloženosti identične onima u Direktivi 2004/40/EC [58].

Još uvek nema nacionalnog zakonodavstva sa obavezujućim ograničenjima za radiofrekventno elektromagnetsko polje na radu u Austriji, Belgiji, Danskoj, Francuskoj, Nemačkoj, Grčkoj, Mađarskoj, Irskoj, Malti, Holandiji, Portugaliji, Sloveniji, Španiji i Velikoj Britaniji. Neke države članice imaju dobrovoljne preporuke ili standarde iz Vlade, profesionalnih udruženja ili osiguravajućih društava, koje mogu biti korišćene od strane bezbednosnog i zdravstvenog inspektorata kao mera za adekvatnu kontrolu rizika od elektromagnetskog polja (Austrija, Danska, Francuska, Nemačka, Mađarska, Malta, Velika Britanija) [58].

## **Druge zemlje**

U Australijskom standardu kojim se definiše zaštita od zračenja postavljene su vrednosti granične izloženosti koje su gotovo identične onima u Direktivi 2004/40/EC [58].

Granice izloženosti za radiofrekventno elektromagnetsko polje u Rusiji su strožije od vrednosti u Direktivi 2004/40/EC [58].

U Švajcarskoj, opšta pravila za sprečavanje bolesti uzrokovanih fizičkim agensima propisana su Saveznim zakonom o osiguranju od posledica nezgode. Nacionalni osiguravač od nesreća je precizirao da su granice izloženosti identične sa vrednostima u Direktivi 2004/40/EC i ne mogu biti prekoračene [58].

Granične vrednosti izlaganja u saveznom zakonu za predajnike Sjedinjenih država su identični onima u Direktivi. Iste granične vrednosti izlaganja se koriste u sporazumu o standardizaciji za zaštitu vojnog osoblja u NATO [58].

U tabelama 2.3 i 2.4 date su granične vrednosti za stanovništvo za elektromagnetska polja u naseljenim područjima i granice izloženosti za radnu sredinu za elektromagnetska polja u zemljama članicama Evropske unije i odabranih industrijskih zemalja izvan Evropske unije, respektivno.

Tabela 2.3 Granične vrednosti za stanovništvo za elektromagnetska polja u naseljenim područjima u zemljama članicama Evropske unije i odabраних industrijskih zemalja van Evropske unije (2011) [58]

Država	900MHz			1800MHz			2100MHz		
	$E$ (V/m)	$B$ ( $\mu$ T)	$S$ ( $W/m^2$ )	$E$ (V/m)	$B$ ( $\mu$ T)	$S$ ( $W/m^2$ )	$E$ (V/m)	$B$ ( $\mu$ T)	$S$ ( $W/m^2$ )
Preporuka 1999/519/EC	41	0.14	4.5	58	0.2	9	61	0.2	10
Austrija	41	0.14	4.5	58	0.2	9	61	0.2	10
Belgija (Flandrija)	21 <sup>(1)</sup>	-	-	29 <sup>(1)</sup>	-	-	31 <sup>(1)</sup>	-	-
Bugarska	-	-	0.1	-	-	0.1	-	-	0.1
Kipar	41	0.14	4.5	58	0.2	9	61	0.2	10
Češka	41	0.14	4.5	58	0.2	9	61	0.2	10
Republika Danska	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Estonija	41	0.14	4.5	58	0.2	9	61	0.2	10
Finska	41	0.14	4.5	58	0.2	9	61	0.2	10
Francuska	41	0.14	4.5	58	0.2	9	61	0.2	10
Nemačka	41	0.14	4.5	58	0.2	9	61	0.2	10
Grčka	32 <sup>(2)</sup>	0.11 <sup>(2)</sup>	2.7 <sup>(2)</sup>	45 <sup>(2)</sup>	0.15 <sup>(2)</sup>	5.4 <sup>(2)</sup>	47 <sup>(2)</sup>	0.16 <sup>(2)</sup>	6 <sup>(2)</sup>
Mađarska	41	0.14	4.5	58	0.2	9	61	0.2	10
Irska	41	0.14	4.5	58	0.2	9	61	0.2	10
Italija	6 <sup>(3)</sup>	0.02 <sup>(3)</sup>	0.1 <sup>(3)</sup>	6 <sup>(3)</sup>	0.02 <sup>(3)</sup>	0.1 <sup>(3)</sup>	6 <sup>(3)</sup>	0.02 <sup>(3)</sup>	0.1 <sup>(3)</sup>
Letonija	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Litvanija	-	-	0.1	-	-	0.1	-	-	0.1
Luksemburg	41 <sup>(4)</sup>	0.14	4.5	58 <sup>(4)</sup>	0.2	9	61 <sup>(4)</sup>	0.2	10
Malta	41	0.14	4.5	58	0.2	9	61	0.2	10
Holandija	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Poljska	7	-	0.1	7	-	0.1	7	-	0.1
Portugal	41	0.14	4.5	58	0.2	9	61	0.2	10
Rumunija	41	0.14	4.5	58	0.2	9	61	0.2	10
Slovačka	41	0.14	4.5	58	0.2	9	61	0.2	10
Slovenija	13 <sup>(5)</sup>	0.04 <sup>(5)</sup>	0.45 <sup>(5)</sup>	18 <sup>(5)</sup>	0.06 <sup>(5)</sup>	0.9 <sup>(5)</sup>	19 <sup>(5)</sup>	0.06 <sup>(5)</sup>	1 <sup>(5)</sup>
Španija	41	0.14	4.5	58	0.2	9	61	0.2	10
Švedska	41	0.14	4.5	58	0.2	9	61	0.2	10
UK	41	0.14	4.5	58	0.2	9	61	0.2	10
Australija	41	0.14	4.5	58	0.2	9	61	0.2	10
Rusija	-	-	0.1	-	-	0.1	-	-	0.1
Švajcarska	4 <sup>(6)</sup>	-	-	6 <sup>(6)</sup>	-	-	6 <sup>(6)</sup>	-	-
USA	-	-	6	-	-	10	-	-	10

Napomene:

- 1) Regionalni propisi; maksimum po anteni u Flandriji ili po lokaciji u Briselu: 3V/m na 900MHz, 4.2V/m na 1800MHz, 4.5V/m na 2100MHz; maksimum po anteni u Valoniji: 3V/m
- 2) Za antenske stanice bliže od 300m na "osetljivim" lokacijama (škole, vrtići, bolnice, domovi za negu); i drugde, 35V/m, 0.11 $\mu$ T, 3.1W/m<sup>2</sup> pri 900MHz; 49V/m, 0.16 $\mu$ T, 6.3W/m<sup>2</sup> na 1800MHz; 51V/m, 0.17 $\mu$ T, 7W/m<sup>2</sup> pri 2100MHz
- 3) U blizini kuće i njihovih otvorenih dodataka, u školama i na igralištima, u mestima za boravak duži od 4 sata; i drugde, 20V/m, 0.06 $\mu$ T, 1W/m<sup>2</sup>
- 4) Granica po anteni je 3V/m
- 5) Odnosi se na kuće, bolnice, lečilišta, javne zgrade, turističke zgrade, škole, vrtiće, igrališta, parkove, rekreativna područja; inače granica za jačinu spoljašnjeg električnog i magnetskog polja jednaka je referentnom nivou u 1999/519/EC

6) Ograničenje po lokaciji za nove i postojeće instalacije antena za upotrebu na osjetljivim mestima (zgrada u kojima borave lica za duži vremenski period, igrališta); Granica za ukupno izlaganje iz više antenskih lokacija jednak je referentnom nivo u 1999/519/EC

Tabela 2.4 Granice izloženosti za radnu sredinu za elektromagnetska polja u zemljama članicama Evropske unije i odabranih industrijskih zemalja izvan Evropske unije (2011.) [58]

Država	900MHz			1800MHz			2100MHz		
	<i>E</i> (V/m)	<i>B</i> ( $\mu$ T)	<i>S</i> ( $W/m^2$ )	<i>E</i> (V/m)	<i>B</i> ( $\mu$ T)	<i>S</i> ( $W/m^2$ )	<i>E</i> (V/m)	<i>B</i> ( $\mu$ T)	<i>S</i> ( $W/m^2$ )
Direktiva 2004/40/EC	90	0.3	22.5	127	0.42	45	137	0.45	50
Austrija	90	0.3	22.5	127	0.42	45	137	0.45	50
Belgija (Flandrija)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bugarska	-	-	10	-	-	10	-	-	10
Kipar	90	0.3	22.5	127	0.42	45	137	0.45	50
Češka Republika	90	0.3	22.5	127	0.42	45	137	0.45	50
Danska	90	0.3	22.5	127	0.42	45	137	0.45	50
Estonija	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Finska	90	0.3	22.5	127	0.42	45	137	0.45	50
Francuska	90	0.3	22.5	127	0.42	45	137	0.45	50
Nemačka	92	0.31	22.5	130	0.43	45	137	0.46	50
Grčka	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mađarska	90	0.3	22.5	127	0.42	45	137	0.45	50
Irska	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Italija	90 <sup>(1)</sup>	0.3 <sup>(1)</sup>	22.5 <sup>(1)</sup>	130 <sup>(1)</sup>	0.43 <sup>(1)</sup>	45 <sup>(1)</sup>	137 <sup>(1)</sup>	0.46 <sup>(1)</sup>	50 <sup>(1)</sup>
Letonija	90	0.3	22.5	127	0.42	45	137	0.45	50
Litvanija	90	0.3	22.5	127	0.42	45	137	0.45	50
Luksemburg	41	0.14	4.5	58	0.2	9	61	0.2	10
Malta	90	0.3	22.5	127	0.42	45	137	0.45	50
Holandija	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Poljska	20 <sup>(2)</sup>	0.07 <sup>(2)</sup>	-	20 <sup>(2)</sup>	0.07 <sup>(2)</sup>	-	20 <sup>(2)</sup>	0.07 <sup>(2)</sup>	-
Portugal	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rumunija	90	0.3	22.5	127	0.42	45	137	0.45	50
Slovačka	90	0.3	22.5	127	0.42	45	137	0.45	50
Slovenija	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Španija	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Švedska	60	-	10	60	-	10	60	-	10
UK	90	0.3	22.5	127	0.42	45	137	0.45	50
Australija	92	0.31	22.5	130	0.43	45	137	0.46	50
Rusija	-	-	10 <sup>(3)</sup>	-	-	10 <sup>(3)</sup>	-	-	10 <sup>(3)</sup>
Švajcarska	90	0.3	22.5	127	0.42	45	137	0.45	50
USA	-	-	30	-	-	50	-	-	50

Napomene:

- 1) Primenjuju se nakon isteka roka za prenos Direktive 2004/40/EZ (30 april 2012.)
- 2) Postoje frekvencijski zavisne vremenski-integrirane granice izloženosti
- 3) Maksimalna vrednost izlaganja za celo telo; maksimalna vrednost izlaganja za udove  $50W/m^2$ ; vremenski integrirana ekspozicije  $2W/m^2 \times h$

### 2.1.3 Granice izlaganja nejonizujućim zračenjima kod nas

Usvajanjem Zakona o zaštiti od nejonizujućih zračenja u decembru 2009. godine („Službeni glasnik RS”, br. 36/09), sa pratećim podzakonskim aktima objavljenim u listu „Službeni glasnik RS”, br. 104/09 [61], uređeni su uslovi i mere zaštite zdravlja ljudi i zaštite životne sredine od štetnog dejstva nejonizujućih zračenja u korišćenju izvora nejonizujućih zračenja. Zakon o zaštiti od nejonizujućih zračenja baziran je na dosadašnjim saznanjima iz oblasti zaštite od ovih zračenja i na podacima o regulativi i njenom sadržaju iz ove oblasti zemalja Evropske unije i drugih zemalja.

Pravilnikom su ustanovljena ograničenja za izloženost stanovništva nejonizujućem zračenju, odnosno bazična ograničenja i referentni granični nivoi izlaganja stanovništva električnim, magnetskim i elektromagnetskim poljima različitih frekvencija [61].

Odredbe ovog pravilnika odnose se na zone povećane osetljivosti izvan kontrolisanih (nadziranih) oblasti, osim na zračenje uređaja koji su namenjeni terapiji ili lečenju u zdravstvu ili zračenje radarskih i primopredajnih sistema za odbrambene potrebe, za zaštitu, spasavanje ili pružanje pomoći.

Bazična ograničenja izlaganja stanovništva električnim, magnetskim i elektromagnetskim poljima (0Hz do 300GHz) jesu ograničenja u izlaganju vremenski promenljivim izvorima elektromagnetskih polja koja su zasnovana neposredno na utvrđenim zdravstvenim efektima i biološkim pokazateljima.

Fizičke veličine kojima se ova ograničenja određuju, u zavisnosti od frekvencije polja, su: gustina magnetskog fluksa ili magnetska indukcija,  $\vec{B}$ , gustina struje,  $\vec{J}$ , SAR, i gustina snage,  $S$ .

Bazična ograničenja izloženosti stanovništva električnim, magnetskim i elektromagnetskim poljima (0Hz do 300GHz) sadržana su u tabeli 2.5.

Referentni granični nivoi su dati u tabeli 2.6. Na frekvencijama do 110MHz primenjuju se propisani referentni nivoi radi izbegavanja rizika od kontaktnih struja. Referentni nivoi kontaktnih struja od provodnih objekata dati su u tabeli 2.7. Za frekvencijski opseg od 10MHz do 110MHz, za struju kroz neki ekstremitet primenjuju se propisani referentni nivo od 45mA.

Lokalizovani SAR se utvrđuje kao prosek šestominutnog izlaganja.

Pri simultanom izlaganju poljima sa različitim frekvencijama mora se uzeti u obzir mogućnost zbirnih efekata takvog izlaganja.

Tabela 2.5 Bazična ograničenja izloženosti stanovništva električnim, magnetskim i elektromagnetskim poljima (0 Hz do 300 GHz)

Frekvencijski opseg	$B$ (mT)	$J$ (mA/m <sup>2</sup> )	SAR	SAR	SAR	$S$ (W/m <sup>2</sup> )
			(W/kg) usrednjen za celo telo	(W/kg) lokalizovan na glavu i trup	(W/kg) lokalizovan na ekstremitete	
0 Hz	40					
>0-1Hz		8				
1-4 Hz		8 / $f$				
4-1000Hz		2				
1000Hz-100kHz		$f/500$				
100kHz-10MHz		$f/500$	0,08	2	4	
10MHz-10GHz			0,08	2	4	
10-300GHz						10

Tabela 2.6 Referentni granični nivoi

Frekvencija $f$	$E$ (V/m)	$H$ (A/m)	$B$ (μT)	$S_{ekv}$ (W/m <sup>2</sup> )	Vreme usrednjenja $t$ (minuta)
< 1Hz	5600	12800	16000		
1-8 Hz	4000	12800 / $f^2$	16000 / $f^2$		
8-25 Hz	4000	1600 / $f^2$	2000 / $f$		
0,025-0,8kHz	100 / $f$	1,6 / $f$	2 / $f$		
0,8-3kHz	100 / $f$	2	2,5		
3-100kHz	34,8	2	2,5		
100-150kHz	34,8	2	2,5		6
0,15-1MHz	34,8	0,292 / $f$	0,368 / $f$		6
1-10MHz	34,8 / $f^{1/2}$	0,292 / $f$	0,368 / $f$		6
10-400 MHz	11,2	0,0292	0,0368	0,326	6
400-2000 MHz	0,55 $f^{1/2}$	0,00148 $f^{1/2}$	0,00184 $f^{1/2}$	$f / 1250$	6
2-10GHz	24,4	0,064	0,08	1,6	6
10-300GHz	24,4	0,064	0,08	1,6	68 $f^{1,05}$

Tabela 2.7 Referentni nivoi za kontaktne struje od provodnih objekata

Frekventni opseg	Maksimum kontaktne struje
	mA
0-2,5 kHz	0,5
2,5-100kHz	0,2 $f$
100 kHz-110MHz	20

U tabeli 2.8 dati su referentni nivoi za frekvencije koje će se razmatrati u ovoj disertaciji.

Tabela 2.8 Referentni nivoi za određene frekvencije

$f$ (GHz)	0.9	1.8	2.1	28	39	73
$E$ (V/m)	16.5	23.3	24.4	24.4	24.4	24.4
$H$ (A/m)	0.044	0.063	0.064	0.08	0.08	0.08
$S_{ekv}$ (W/m <sup>2</sup> )	0.72	1.44	1.60	1.60	1.60	1.60

## 2.2 Biološki efekti elektromagnetskog zračenja

Cilj mnogobrojnih istraživanja bioloških posledica usled izloženosti elektromagnetskom zračenju jeste pokušaj da se napravi kompromis između potencijalno štetnog dejstva elektromagnetskog zračenja i koristi koju upotreba mobilnih telefona i drugih mikrotalasnih uređaja donosi ljudima. To je jedino moguće samo ako se potpuno istraže svi štetni efekti i mehanizmi delovanja zračenja na ljude.

Kako su uticaji izlaganja elektromagnetskom polju mobilnih telefona i drugih bežičnih uređaja kumulativni na ljude i okolinu, opasnosti po ljudsko zdravlje koje nosi ovakvo izlaganje nisu vidljive u kratkom periodu. Potreban je dugotrajni period ekspozicije da bi se uočili štetni efekti. Zato široka upotreba mobilnih telefona izaziva sve glasnjia upozorenja o negativnim efektima na ljudsko zdravlje.

Mnogi naučnici su upozorili da dugotrajna izloženost niskom nivou RF zračenja može izazvati širok spektar štetnih zdravstvenih efekata, uključujući maligna oboljenja, poremećaje nervnog sistema, poremećaje imunološkog sistema, štetni uticaj na reproduktivne organe, promene u nivou hormona, glavobolje, razdražljivost, umor, kardiovaskularne efekte itd. [62-107]

Na osnovu brojnih studija, potencijalni zdravstveni efekti kao posledica korišćenja bežičnih uređaja mogu se svrstati u više kategorija:

- ❖ *Razvoj malignih oboljenja i benignih tumora* (gliom - maligni tumor mozga, akustični neurom - benigni tumor mozga, rak parotidne žlezde, leukemija, ...),
- ❖ *Efekti na nervni sistem*. Veliki broj recenziranih studija pokazale su promene u nervnom sistemu pacova, miševa i ljudi nakon izlaganja zračenju mobilnog telefona. Ovo uključuje smanjeni potencijal za učenje, smanjeno vreme reakcije, smanjene motorne funkcije, smanjenu tačnost pamćenja i umanjeno razumevanje. Takođe, veća upotreba mobilnih telefona je u direktnoj vezi sa bržim, ali manje preciznim odgovorima na kognitivne zadatke na visokom



nivou. I prenatalna i postnatalna izlaganja mobilnom telefonu su bila povezana sa problemima u ponašanju, kao što su hiperaktivnost kod dece pred upis u osnovnu školu u uzrastu od šest godina,

- ❖ *Efekti na reproduktivno zdravlje.* Mnoge studije izveštavaju o molekularnim i ćelijskim efektima izlaganja EM polju mobilnog telefona u organima odgovornim za reprodukciju, naročito kod mužjaka. Oksidativni stres na ljudsko seme, opadanje broja spermatozoida, smanjena pokretljivosti sperme i smanjena održivost sperme su sve posledice koje su pronađene u vezi sa izloženošću EM polju mobilnih telefona,
- ❖ *Genotoksični efekti i oštećenje DNK.* Mobilni telefoni emituju nejonizujuće elektromagnetsko zračenje koje može predati energiju obližnjim tkivima na način koji može da menja biohemiju ljudskih tkiva i strukturu ljudske DNK,
- ❖ *Psihološki efekti.* Korisnici pametnih telefona su pod rizikom da postanu zavisnici od njihovih uređaja. Prisutni su simptomi zavisnosti i simptomi kao kod odvikavanja od zabranjenih supstanci. Takođe, zabeležena je pojava anksioznosti, nesanice, depresije, kao i elektromagnetske preosetljivosti.

## 2.2.1 Potencijalni štetni zdravstveni efekti kao posledica korišćenja bežičnih uređaja

### 2.2.1.1 Maligna oboljenja

Švedski istraživač Dr. Lennart Hardell sa svojim saradnicima, sproveo je nekoliko samostalno finansiranih studija o mobilnim telefonima i tumorima, koristeći švedski registar raka i našli su dosledan obrazac povećanja rizika od glioma i akustičnog neuroma posle 10 godina upotrebe mobilnih telefona. Oni su došli do zaključka da je kod odraslih ljudi koji su koristili mobilne telefone 10 godina ili duže, i to uglavnom na jednoj strani glave, rizik od malignog tumora na mozgu bio udvostručen, a još veći kod osoba koje su počele da koriste telefone pre svoje 20 godine [62-65].

Dr. Hardell je sproveo još par studija ispitujući pojavu raka usled korišćenja mobilnih telefona. U jednoj studiji pronađen je dvostruki rizik od raka mozga kada su mobilni telefoni korišćeni ipsilateralno (mobilni telefoni su korišćeni na istoj strani gde je lokacija tumora) u toku 10 ili više godina [66]. U drugoj studiji je pokazano da od početka korišćenja mobilnih

telefona kod tinejdžera i mladih postoji značajni ipsilateralni rizik od raka mozga i skoro identični ipsilateralni rizik od bežičnih telefona [67].

U trećoj studiji ispitivanja uticaja mobilnih i bežičnih telefona na mozak pronađen je rizik od malignog tumora mozga za period korišćenja telefona veći od 5–10 godina, sa više od 195 kumulativnih sati razgovora i za period korišćenja veći ili jednak od 10 godina. Takođe, pronađen je povećani rizik za sve tipove tumora mozga. Za svaku godinu od početka korišćenja telefona, rizik se povećava za 5.4%. Rizik od *astrocytoma* usled korišćenja bežičnog telefona sa više od 195 kumulativnih sati za period od 10 ili više godina kod tinejdžera ili mladih, viši je nego 3 puta u odnosu na osobe koje nisu bile izložene [68].

Prema jednoj studiji upotrebe mobilnih telefona od strane dece i adolescenata (prosečne starosti 13 godina), ukazano je na značajno veći rizik od pojave raka mozga usled izloženosti veće od 2.8 godina od prve upotrebe mobilnog telefona [69].

Nekoliko epidemioloških studija gde je posmatrana dugoročna, učestala upotreba mobilnih telefona više od jedne decenije, su našle značajno veći rizik od raka mozga. Najveća studija raka mozga je bila u 13 zemalja, studija Interfon, gde je ispitivana starosna grupa ljudi od 30 do 59 godina i gde su utvrđena 2708 slučajeva glioma. Utvrđen je više nego dvostruki rizik od raka mozga (gliom) za period korišćenja mobilnog telefona od 10 ili više godina u poređenju sa korisnicima koji su koristili mobilne telefone u periodu od jedne do 1.9 godina. Kod korisnika koji su kratkoročno koristili mobilni telefon nije prijavljen povećan rizik od glioma [70].

Izraelska Interfon studija je pronašla značajno povećan rizik za tumor parotidne žlezde (pljuvačna žlezda u obrazu ispod uva) za više od 266.3 kumulativnih sati ipsilateralnog korišćenja mobilnih telefona, dok je kod najrevnosnijih korisnika (više od 4479 kumulativnih sati) više nego dvostruko povećan rizik benignih tumora parotidne (pljuvačne) žlezde [71].

Švedska Interfon studija tumora parotidne žlezde pronašla je značajan rizik za ipsilateralne korisnike koji su 10 godina ili više koristili mobilne telefone [72].

Prema jednoj studiji pronađen je dvostruko veći rizik od raka mozga kada su mobilni telefoni korišćeni ipsilateralno za period od 10 i više godina [73].

Određen broj istraživača je pokušao da nađe i vezu između leukemije i mobilnih telefona. U studiji na Tajlandu, prema rezultatima utvrđen je trostruko veći rizik od pojave leukemije kod korisnika mobilnih telefona i više nego četverostruko veći rizik za bilo koju limfnu leukemiju [74].

Britanska studija pronašla je značajni rizik za akutnu mijeloidnu leukemiju (AML - *Acute Myeloid Leukemia*) za period korišćenja mobilnih telefona veći od 15 godina [75].

### 2.2.1.2 Efekti na reproduktivno zdravlje

Postoji obimna i rastuća literatura kod životinja i ljudi da hronično izlaganje zračenju mobilnih telefona, značajno smanjuje morfologiju sperme, pokretljivost, održivost, i broj. Često se mobilni telefon nalazi u džepu pantalone što može dovesti do značajnog izlaganja reproduktivnih organa kod muškaraca.

U studiji iz 2005. sa prikupljanjem podataka od novembra 2002. do marta 2004. godine posmatrana je pokretljivosti spermatozoida i uočeno je da se procenat sporo progresivno pokretnih spermatozoida povećava sa povećanjem trajanja dnevnog vremena emitovanja [76].

Bilo je nekoliko studija koje su istraživale negativne efekte mobilnog telefona na pokretljivost spermatozoida. U jednoj studiji nad 304 muškaraca otkriveno je značajno procentualno smanjenje pokretljivosti spermatozoida, u korelaciji sa učestalošću korišćenja mobilnog telefona. U toj studiji, 65.7% pacijenata koji nisu koristili mobilne telefone imali su normalnu pokretljivost (preko 50% pokretnih spermatozoida) u poređenju sa samo 17% pacijenata koji su često (redovna upotreba telefona više od 2 godine) koristili mobilne telefone [77].

Isto tako, u studiji 22 muškaraca prosečne starosti od 24 godina, utvrđeno je da je u uzorcima sperme izložene visokom intenzitetu elektromagnetskog zračenja ( $f=1.8\text{GHz}$  i SAR od  $0.4\text{W/kg}$  do  $27.5\text{W/kg}$ ) došlo do statistički značajnog pada i u pokretljivosti i u vitalnosti spermatozoida [78].

U *in vitro* studiji nad 32 muškarca [79] prilikom izlaganja RF elektromagnetskom zračenju (SAR od  $1.46\text{W/kg}$  tokom 60min) primećeno je značajno smanjenje pokretljivosti sperme i održivosti posle izlaganja. Zaključeno je da RF elektromagnetsko polje emitovano iz mobilnog telefona može povećati oksidativni stres što dovodi do smanjenja pokretljivosti i vitalnosti spermatozoida.

U studiji sa kontrolom temperature ljudske sperme postavljene 3cm ispod laptop računara koji je povezan na Wi-Fi tokom 4h [80] je pokazano da je u uzorcima uglavnom normalne sperme, izloženih *ex vivo*, primećeno značajno smanjenje pokretljivosti spermatozoida i povećanje fragmentacije DNK u ćelijama sperme.

U jednoj drugoj studiji takođe je primećeno značajno povećanje procenta spermatozoida sa nenormalnom morfologijom u vezi sa frekvencijom i trajanjem izloženosti mobilnom telefonu. Dok su kod 55.6% pacijenata, koji nisu koristili mobilni telefon, bili prisutni normalni morfološki parametri, kod pacijenata koji su često koristili mobilni telefon

(redovna upotreba telefona više od 2 godine) samo 16.7% njih je imalo normalnu morfologiju sperme [77].

Takođe u jednoj studiji je pokazano značajno smanjenje broja spermatozoida u odnosu na period korišćenja mobilnog telefona [81]. Ova studija je analizirala 231 muškaraca tokom perioda dužeg od 13 meseci i pokazano je da je kod aktivnih korisnika mobilnih telefona broj spermatozoida bio niži za 30% u odnosu na muškarce koji nisu koristili mobilni telefon.

### 2.2.1.3 Genotoksični efekti i oštećenje DNK

Mnogi istraživači su proučavali mogućnosti RF elektromagnetskog polja da izazove promene u genetskom materijalu ćelije (DNK) i/ili da ošteti genom. Genotoksične supstance mogu izazvati genetske mutacije ili oštećenja ćelija koje mogu da doprinesu razvoju kancerogenih tumora.

*In vitro* REFLEX studija Evropske unije o izlaganju ljudskih ćelija mikrotalasnom zračenju mobilnih telefona (od 2000 do 2004) pokazala je da zračenje mobilnih telefona ima potencijal da ošteti genom izolovanih ljudskih ćelija, ali su nalazi bili veoma kontroverzni. Glavni autor studije tvrdi da postoji dovoljno dokaza da RF zračenje može da promeni genetski materijal izloženih ćelija [82].

Jedno istraživanje švedskih naučnika vezano za efekte RF elektromagnetskog polja na nervne ćelija, vršeno je tokom nekoliko godina. Oni su postavili mobilne telefone sa strane kaveza mladih pacova kako bi simulirali uslove slične kao kod povremenog korišćenja telefona od strane ljudi, i otkrili oštećenja neurona u mozgu mladih pacova nakon 50 dana izlaganja po dva sata nedeljno [63].

U studiji [78] prijavljeno je da je izloženost mužjaka miševa RF elektromagnetskim poljima nakon 7 dana izazvala značajna oštećenja DNK spermatozoida. Takođe je pokazano da je porast defekata integriteta DNK sperme proporcionalan vrednostima SAR usled izlaganja mobilnom telefonu [83].

Nasuprot tome, u studiji [84] nisu pronađene nikakve značajne mane integriteta DNK defekta u posmatranoj prečišćenoj spermi usled izlaganja elektromagnetskom talasu.

Važan zaključak iz gore navedenih studija je da postoji značajno oštećenje DNK usled elektromagnetskog talasa. Međutim, ovo oštećenje može biti posledica ponovljenog izlaganja i ne može se otkriti nakon kratkoročnog izlaganja. Takođe, razlike u prijavljenim rezultatima navedenih studija mogu se pripisati razlikama u frekvenciji korišćenog elektromagnetskog talasa i nivoa SAR.

#### 2.2.1.4 Efekti na nervni sistem

Efekti izloženosti RF elektromagnetskim poljima mobilnih telefona na ljudski nervni sistem su predmet velikog broja studija u poslednjih nekoliko godina.

Na osnovu eksperimenata na životinjama u studijama [85, 86] utvrđeno je da je izloženost mobilnim telefonima kod pacova značajno uticala na njihovu memoriju.

Smanjenje kognitivnih performansi kod ispitanika nakon izlaganja impulsnom elektromagnetskom polju pokazano je u [87]. U jednoj drugoj studiji, gde je vršeno izlaganje RF zračenju standardnog GSM mobilnog telefona koji je bio postavljen pored glave ispitanika, utvrđeno je da je došlo do povećanja vremena potrebnog za odgovore na zadatke u odnosu na vreme potrebno za rešavanje zadataka bez izlaganja mobilnom telefonu [88].

Efekti izlaganja RF elektromagnetskim poljima mobilnih telefona na poremećaj centralnog nervnog sistema (CNS – *Central Nervous System*), kao što su Alchajmerova bolest, migrena, ili vrtoglavica, su bili u fokusu epidemiološke studije u Danskoj, koja predstavlja prvu zemlju koja je istražila moguću povezanost između upotrebe mobilnih telefona i rizika poremećaja CNS. Studija je otkrila slabu, ali statistički značajnu, povezanost između upotrebe mobilnih telefona i migrene i vrtoglavice. Danska studija preporučuje dodatna istraživanja u ovoj oblasti, zajedno sa merama smanjenja RF izloženosti, dok se ne dobije više podataka [89].

U studiji Medicinskog fakulteta Jejl Univerziteta izlagani su miševi mikrotalasnom zračenju još dok su bili u materici [90]. Studija je pokazala da su ovi miševi bili hiperaktivni i da im je bilo oštećeno pamćenje. Tokom trudnoće miševi su zračeni mobilnim telefonom pozicioniranim iznad svakog kaveza iznad flašica za hranjenje na udaljenosti od 4.5-22.3cm od svakog miša u zavisnosti od lokacije miša unutar kaveza. Kontrolne grupe su bile pod istim uslovima, ali telefon nije bio aktivan. Posmatrani efekti su slični hiperaktivnom poremećaju kod dece (*ADHD - Attention Deficit Hyperactivity Disorder*).

Rizik od ADHD utvrđen je u jednoj korejanskoj studiji kod dece u prvom razredu, uzrasta od 7 do 8 godina kao i kod dece uzrasta od 12 do 13 godina [91].

Prema jednoj empirijskoj studiji iz 2013. godine, utvrđena je pojava tzv. digitalne demencije [92]. Ova pojava poznata je još i kao Fear Of Missing Out (FOMO) i predstavlja pravi problem kod dece i mladih. Upravo na posledice česte upotrebe računara, mobilnih telefona ili drugih elektronskih uređaja upozorio je u svojoj knjizi “Digitale demenz” Nemački neurolog Dr. Manfred Spitzer.

Istraživanje efekata mobilnih telefona tokom trudnoće na kasnije probleme kod dece je pokazalo postojanje povećanog rizika za glavobolju u zavisnosti od dužine korišćenja mobilnih telefona od strane majki [93].

U Nemačkoj, u okviru studije Istraživačkog programa mobilnih telekomunikacija, istraživani su problemi u ponašanju kod dece i adolescenata kao posledica izlaganja elektromagnetskim poljima mobilnih telekomunikacija. Utvrđeno je da kako raste izloženost raste i rizik od pojave problema u ponašanju [94].

#### 2.2.1.5 Psihološki efekti

Kao posledica učestale upotrebe mobilnih telefona kod korisnika se mogu pojaviti i psihološki efekti. Psiholozi upozoravaju da su korisnici pametnih telefona posebno pod rizikom da postanu zavisnici od njihovih uređaja. U nedavnoj studiji, korisnici su proveravali svoje telefone u proseku 34 puta dnevno [95]. Korisnici mogu da provere svoje telefone iz navike ili prinudno, ali stalna provera može biti način da se izbegne interakcija sa ljudima.

Neki ljudi kada su bez svojih pametnih telefona mogu da dožive simptome slične onima kao kod odvikavanja od korišćenja nedozvoljenih supstanci, tu se misli na anksioznost, nesanicu, depresiju. Većina studija koje su sprovedene u cilju utvrđivanja potencijalnih psiholoških efekata mobilnih telefona su bile fokusirane na mlade odrasle osobe i adolescente. Prema nedavnoj studiji Univerziteta Kolumbija, pokazano je da upotreba tekstualnih poruka negativno utiče na komunikaciju, odgovornost i odnose sa drugima u ranim i kasnim adolescentnim grupama [96].

Takođe je zabeleženo da je česta upotreba mobilnog telefona povezana sa stresom, poremećajem spavanja i simptomima depresije među mladima [97]. U drugoj studiji se, kao zajednička psihološka reakcija kod adolescenata, ističe povlačenje ovih simptoma kada se mobilni telefoni ne koriste [98].

Neki pojedinci doživljavaju negativne zdravstvene simptome usled izlaganja elektromagnetskim poljima. Ljudi sa elektromagnetskom preosetljivošću (EHS - *Electromagnetic Hypersensitivity*) imaju simptome od čak niskog nivoa izloženosti nejonizujućem elektromagnetskom zračenju. Zabrinutost da mobilni telefoni mogu da budu povezani sa EHS su u velikoj meri rezultat žalbi korisnika mobilnih telefona na glavobolje, mučninu, vrtoglavicu, zamagljen vid i druge simptome [99-101].

### 2.2.2 Prenatalna izloženost

U jednoj turskoj studiji pokazano je da je prenatalna izloženost elektromagnetskom zračenju na 900MHz u materici pacova dovela do smanjenja broja zrnastih ćelija u zupčastom girusu (*dentate gyrus*-deo hipokampusa i/ili hipokampusne formacije) pacova [102].

Prema jednoj drugoj studiji, kada su trudnice bile izložene elektromagnetskom polju sa mobilnih telefona u režimu pozivanja tokom 10 minuta dnevno za vreme trudnoće i posle porođaja utvrđeno je statistički značajno povećanje pulsa fetusa i novorođenih beba. Studija je obuhvatila 90 žena sa normalnom trudnoćom. Autori ukazuju da to može da dovede od fiziološkog odgovora na pulsirajuća magnetska polja, i preporučuju izbegavanje upotrebe mobilnog telefona tokom ranih nedelja trudnoće [103].

### 2.2.3 Termički i netermički efekti

Povećanje temperature tkiva usled izlaganja elektromagnetskom talasu naziva se termički efekat. Termički efekti mogu izazvati poremećaj funkcije ćelija [93]. Porast temperature tkiva u nekom organu je povezan sa disbalansom između proizvodnje toplote i rasipanja toplote.

Proizvodnja toplotne energije zavisi od SAR i gustine snage emitovanog elektromagnetskog talasa koja treba da pređe  $100\text{mW}/\text{cm}^2$  kako bi imala uticaj na povećanje temperature biološkog tkiva [104].

Prijavljeno je da termički efekti elektromagnetskog zračenja izazivaju kataraktu i efekte na mrežnjači, rožnjači i drugim očnim delovima [105].

Većina bioloških posledica usled uticaja elektromagnetskog talasa mobilnog telefona mogu se objasniti kao netermički efekti. Ovi efekti uključuju sve interakcije elektromagnetskog talasa sa biološkim tkivima bez proizvodnje toplote ili merljivog porasta temperature. Magnetsko polje ima veći štetni potencijal na živi organizam zbog svoje sposobnosti da prodire kroz ljudska tela, dok električno polje ima slabiju mogućnost penetracije [105]. U stvari, indukovane naizmjenične struje u našim telima koje potiču od izlaganje elektromagnetskom talasu mobilnog telefona mogu objasniti biološke netermičke efekte u tkivima i na ćelijskim nivoima.

Studije o netermičkim efektima RF elektromagnetskog polja mobilnih telefona su relativno nove. Istraživači preporučuju dalje proučavanje efekata na očna sočiva i epitelne ćelije sočiva [106, 107].

### 3. Numerički modeli

Kreiranje matematičkog modela čoveka koji bi opisao prodrta elektromagnetska polja je veoma složen proces. Mnogo je pogodnije koristiti fizičke ili virtuelne modele ljudskog tela u vidu fantoma i voxela za određivanje apsorbovane doze u organima i tkivima.

Za izradu numeričkih modela korišćeni su programski paketi za 3D dizajn i proračun elektromagnetskog polja metodom konačnih elemenata. Programski paketi koji su korišćeni su 3ds Max [108] i CST Studio Suite 2012, odnosno njegov deo CST Microwave Studio, koji se koristi za proračune u oblasti mikrotalasa [109].

#### 3.1 Numeričke metode za rešavanje elektromagnetskih problema

Rešavanje elektromagnetskih problema je najčešće veoma zahtevan proces koji iziskuje poznavanje odgovarajućih analitičkih i numeričkih metoda. Svaki problem teorije polja je neophodno definisati na pravi način postavljanjem Maksvelovih jednačina u diferencijalnom i integralnom obliku i graničnih uslova.

Čitav taj postupak se dodatno usložnjava kod proračuna elektromagnetskog polja u ljudskom telu iz razloga što je ljudsko telo nehomogena, nelinearna i disperzivna sredina. Kako se ljudski organizam sastoji iz više različitih organa, neophodno je svaki od tih organa opisati odgovarajućim elektromagnetskim veličinama. Za svaki organ je potrebno definisati odgovarajuću dielektričnu konstantu,  $\epsilon$ , magnetsku permeabilnost,  $\mu$ , i provodnost,  $\sigma$ .

Kod numeričkog rešavanja neophodno je na korektan način matematičkim modelom opisati problem korišćenjem diferencijalnih jednačina, integralnih jednačina ili varijacionih izraza. Takođe treba oblast diskretizacionog modela definisati algebarskim jednačinama.

U zavisnosti od toga na koji način se vrši diskretizacija prostora razvijen je čitav niz različitih numeričkih metoda koje možemo grupisati na sledeći način:

- Metodi konačnih razlika (*FDM – Finite Difference Methods*):
  - Metod konačnih razlika u vremenskom domenu (*FDTD - The Finite Difference Time-Domain Method*)
  - Metod operatora podrške (*SOM - The Support Operator Method*)
- Metodi konačne zapremine (*FVM – Finite Volume Methods*):
  - Metod diskretnog integraljenja površine (*DSIM - The Discrete Surface Integral Method*)



- Tehnika konačnih integrala (*FIT - The Finite Integration Technique Method*)
- Metodi konačnih elemenata (*FEM - Finite Element Methods*):
  - Metod konačnih elemenata u vremenskom domenu (*TDFEM - Time-Domain Finite Element Method*)
- Metod momenta (*MoM - Method of Moments*),
- Metod vodova (*TLM - Transmission-Line Matrix Method*)
- Čelijske metode.

Budući da će za kreiranje modela glave deteta i odrasle osobe i telefona, kao celine, i analizu prostorne raspodele elektromagnetskog polja biti korišćen programski paket koji je zasnovan na tehnici konačnih integrala FIT, ovaj metod će biti detaljnije predstavljen u nastavku.

### 3.1.1 Tehnika konačnih integrala - FIT

Sve makroskopske elektromagnetske pojave mogu se matematički opisati potpunim sistemom Maksvelovih jednačina. Tehnika konačnih integrala koju je razvio Weiland još 1977. godine obezbeđuje posebnu reformulaciju Maksvelovih jednačina u njihovoj integralnoj formi podesnu za kompjutere i omogućava simulaciju realnih problema elektromagnetskog polja sa kompleksnom geometrijom [110-119].

Ova diskretizaciona šema za Maksvelove jednačine oslanja se na korišćenje integralnih balansa i tako omogućava verifikaciju stabilnosti i očuvanje osobina diskretnih polja.

Prvi diskretizacioni korak FIT metode sastoji se u ograničavanju problema elektromagnetskog polja, koji obično predstavlja otvoreni problem graničnih uslova, na ograničeni prostor  $\Omega \in R^3$ , u kome se nalazi prostor od interesa.  $R^3$  predstavlja trodimenzionalni realni Euklidov prostor.

Sledeći korak sastoji se u dekompoziciji oblasti  $\Omega$  u konačan broj manjih domena, a svi oni predstavljaju mrežu ćelija  $V_i$  kao što su tetrahedroni ili heksahedroni pod pretpostavkom da sve ćelije moraju da naležu jedna na drugu, tj. presek dve različite ćelije je ili prazan ili mora da bude dvodimenzionalni poligon, jednodimenziona ivica ili tačka. Ove ćelije formiraju skup  $G$ .

Značajno je da svaka ivica ćelije uključuje početnu orijentaciju tako da se unija tih ivica ćelija može opisati kao usmereni graf.

U svrhu jednostavnosti, pretpostavljeno je da je  $\Omega$  trodimenzionalan prostor u obliku paralelopipeda i da se skup ćelija  $G$  formira na sledeći način u Dekartovom koordinatnom sistemu:

$$G := \left\{ V_{i,j,k} \in \mathbb{R}^3 \mid V_{i,j,k} := [x_i, x_{i+1}] \times [y_i, y_{i+1}] \times [z_i, z_{i+1}], \right. \\ \left. i = 1, \dots, I-1, j = 1, \dots, J-1, k = 1, \dots, K-1 \right\}, \quad (3.1)$$

gde su čvorovi  $(x_i, y_i, z_i)$  pobrojani sa koordinatama  $i, j$  i  $k$  duž  $x, y$  i  $z$  ose. Ovo rezultira ukupnim brojem tačaka  $N_p := I \cdot J \cdot K$  za  $(I-1) \cdot (J-1) \cdot (K-1)$  ćelija mreže.

Nakon određivanja mrežnog skupa ćelija  $G$ , dalje predstavljanje FIT teorije može biti ograničeno na jediničnu ćeliju zapremine  $V_n$ .

Jednačina koja predstavlja Faradejev zakon u integralnoj formi:

$$\oint_{C_e} \vec{E}(\vec{r}, t) \cdot d\vec{l} = - \iint_S \frac{\partial}{\partial t} \vec{B}(\vec{r}, t) \cdot d\vec{S}, \quad \forall C_e, S \in \mathbb{R}^3, \quad (3.2)$$

može biti napisana za površinu  $S_z(i, j, k)$  zapremine  $V_n$  što je prikazano na slici 3.1, kao obična diferencijalna jednačina

$$\hat{e}_x(i, j, k) + \hat{e}_y(i+1, j, k) - \hat{e}_x(i, j+1, k) - \hat{e}_y(i, j, k) = - \frac{d}{dt} \hat{b}_z(i, j, k), \quad (3.3)$$

gde je skalarna veličina  $\hat{e}_x(i, j, k) = \int_{(x_i, y_j, z_k)}^{(x_{i+1}, y_j, z_k)} \vec{E} \cdot d\vec{l}$  električni napon duž jedne ivice površine

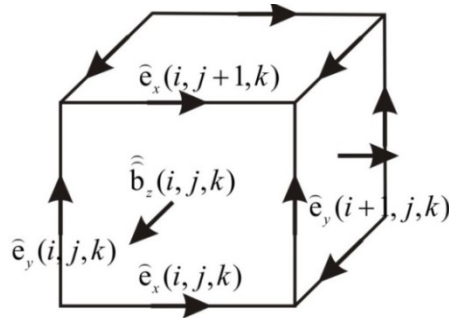
$S_z(i, j, k)$  i predstavlja vrednost integrala električnog polja duž te ivice. Skalarna veličina  $\hat{b}_z(i, j, k) = \int_{S_z(i, j, k)} \vec{B} \cdot d\vec{S}$  predstavlja magnetski fluks, tj. vrednost integrala magnetske

indukcije kroz površinu  $S_z(i, j, k)$ . Može se primetiti da će orijentacija ivica ćelija imati uticaja na znak unutar jednačine (3.3). Treba istaći da je jednačina (3.3) jedan poseban prikaz jednačine (3.2) za površinu ćelije koja se razmatra.

Jednačina (3.3) svih površina ćelija skupa  $G$  može se predstaviti u formi matrice

$$\underbrace{\begin{pmatrix} \dots & \dots & \dots \\ 1 & \dots & 1 & \dots & -1 & \dots & 1 \\ \dots & \dots & \dots \end{pmatrix}}_{C:=} \underbrace{\begin{pmatrix} \hat{e}_{n1} \\ \vdots \\ \hat{e}_{n2} \\ \vdots \\ \hat{e}_{n3} \\ \vdots \\ \hat{e}_{n4} \\ \vdots \\ \hat{e} \end{pmatrix}}_{\hat{e}} = -\frac{d}{dt} \underbrace{\begin{pmatrix} \vdots \\ \hat{b} \\ \vdots \\ \vdots \end{pmatrix}}_{\hat{b}}. \quad (3.4)$$

Matrica  $C$  sadrži samo topološku informaciju o odnosu ivica ćelija unutar  $G$  i o njihovoj orijentaciji, otuda ona ima samo matrične koeficijente  $c_{i,j} \in \{-1, 0, 1\}$ . Ona predstavlja diskretni rotor operator na skupu  $G$ .



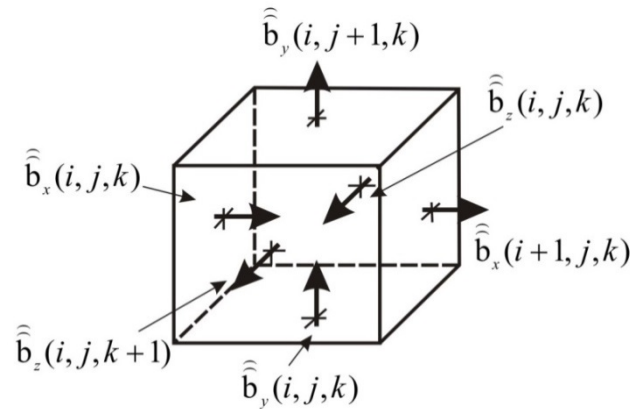
Slika 3.1 Ćelija  $V_{i,j,k-1}$  iz skupa ćelija  $G$

Drugi diferencijalni operator je divergencija. Četvrta Maksvelova jednačine za slučaj nepostojanja magnetskih opterećenja je

$$\iint_S \vec{B}(\vec{r}, t) \cdot d\vec{S} = 0, \quad \forall S \in R^3. \quad (3.5)$$

Rešavanjem površinskog integrala (3.5) za datu ćeliju kao što je pokazano na slici 3.2, dobija se

$$-\hat{b}_x(i, j, k) + \hat{b}_x(i+1, j, k) - \hat{b}_y(i, j, k) + \hat{b}_y(i, j+1, k) - \hat{b}_z(i, j, k) + \hat{b}_z(i, j, k+1) = 0. \quad (3.6)$$



Slika 3.2 Raspodela 6 površinskih magnetskih flukseva

Ponovo, ova relacija za pojedinačnu ćeliju može biti proširena na čitav skup ćelija  $G$  i to daje posebnu matricu divergencije

$$\underbrace{\begin{pmatrix} \dots & \dots \\ \cdot & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & \cdot \\ \dots & \dots \end{pmatrix}}_{S:=} \underbrace{\begin{pmatrix} \vdots \\ \hat{b}_{m1} \\ \hat{b}_{m2} \\ \hat{b}_{m3} \\ \hat{b}_{m4} \\ \hat{b}_{m5} \\ \hat{b}_{m6} \\ \vdots \end{pmatrix}}_{\hat{b}} = 0, \quad (3.7)$$

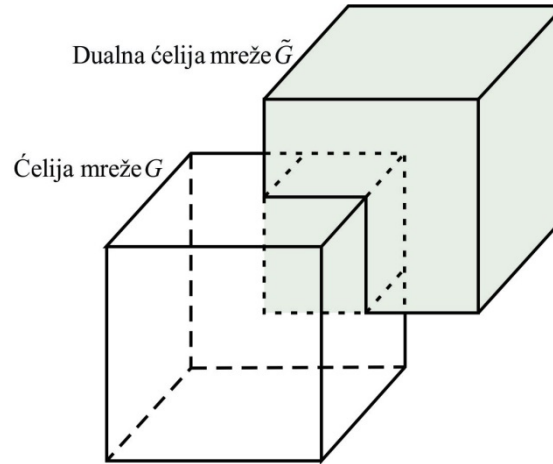
matrica  $S$  kao i matrica  $C$  takođe zavisi samo od topologije mreže.

Diskretizacija preostale 2 Maksvelove jednačine zahteva uvođenje nove mreže ćelija  $\tilde{G}$ , koja je dualna mreži  $G$ , a to znači da su središta stranica ćelija mreže  $G$  čvorovi mreže  $\tilde{G}$ .

Diskretizacija Amperovog zakona u integralnoj formi

$$\oint_{\tilde{C}_e} \vec{H}(\vec{r}, t) \cdot d\vec{l} = - \int_{\tilde{S}} \left( \frac{\partial}{\partial t} \vec{D}(\vec{r}, t) + \vec{J}(\vec{r}, t) \right) \cdot d\vec{S}, \quad \forall \tilde{C}_e, S \in \mathbb{R}^3, \quad (3.8)$$

može biti izvedena za proizvoljnu površinu  $\tilde{S}$  dualne ćelije  $\tilde{V}$ , potpuno analogno Faradejevom zakonu sumiranjem magnetskih napona mreže u svrhu dobijanja struja pomeraja i kondukcionihi struja kroz razmatranu površinu ćelije.



Slika 3.3 Prostorni raspored ćelije mreže  $G$  i dualne ćelije mreže  $\tilde{G}$

Na kraju, Gausov zakon u integralnoj formi može biti diskretizovan za dualne ćelije mreže. Obe ove diskretizacije za skup dualnih ćelija mreže će kao rezultat dati matrične jednačine koje sadrže topološke operatore mreže  $\tilde{C}$  za dualni diskretni rotor i  $\tilde{S}$  za dualnu diskretnu divergenciju [111].

Za par skupova ćelija  $\{G, \tilde{G}\}$  kompletni sistem Maksvelovih jednačina mreže (MGE - *Maxwell-Grid-Equation*), je dat kao:

$$C\hat{e} = -\frac{d}{dt}\hat{b}, \quad (3.9)$$

$$\tilde{C}\hat{h} = \frac{d}{dt}\hat{d} + \hat{j}, \quad (3.10)$$

$$\hat{S}\hat{b} = 0, \quad (3.11)$$

$$\tilde{S}\hat{d} = q, \quad (3.12)$$

gde je  $\widehat{d}$  električni fluks,  $\widehat{j}$  fluks gustine električne struje i  $q$  količina slobodnih naelektrisanja.

### 3.1.1.1 Algebarske osobine matričnih operatora

Jedno od bitnih svojstava diskretnog predstavljanja Maksvelovih jednačina leži u analogiji sa vektorskom analitičkom jednačinom

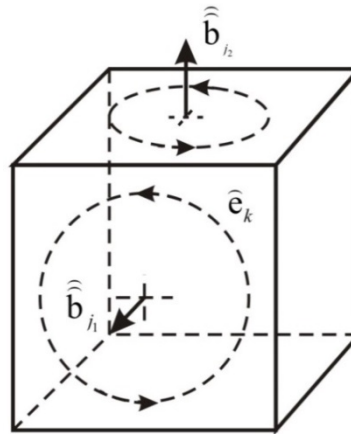
$$\text{div rot} = 0, \quad (3.13)$$

koja za matrične jednačine postaje

$$SC = 0, \quad (3.14)$$

$$\widetilde{S}\widetilde{C} = 0, \quad (3.15)$$

za par skupova ćelija  $\{G, \widetilde{G}\}$ . Ove dve relacije proizilaze iz činjenice da se za sve ćelije mreže izračunavanje diskretne divergencije  $S$  sastoji u sabiranju komponenti fluksa. Za ove komponente fluksa bilo koji napon mreže (levo-pomnožen sa diskretnom rotor-matricom  $C$ ) je svaki uračunat dva puta sa različitim znakom u rotor-zbiru dajući nultu divergenciju ukupnog zbira, slika 3.4. Ova slika ćelije  $V_i \in G$  pokazuje osobinu  $SC = 0$  incidentnih matrica  $C$  i  $S$ . Električni napon mreže  $\widehat{e}_k$  po konturi  $L_k$  javlja se jednom sa pozitivnim, a jednom sa negativnim znakom u rotor-zbiru magnetskih flukseva  $\widehat{b}_{j_1}$  i  $\widehat{b}_{j_2}$ .



Slika 3.4 Čelija  $V_i \in G$

Iz dualnosti mreža  $G$  i  $\tilde{G}$  sledi važna osobina za FIT, data kroz relaciju između diskretnih rotor-matrica

$$C = \tilde{C}^T. \quad (3.16)$$

Kombinacija jednačina (3.14) i (3.15) i identiteta (3.16) rezultira diskretnim jednačinama

$$\tilde{C}S^T = 0, \quad (3.17)$$

$$C\tilde{S}^T = 0, \quad (3.18)$$

gde su obe analogne sa vektorskim-analitičkim identitetom

$$\text{rot grad} \equiv 0. \quad (3.19)$$

Iz (3.17) i (3.18) se vidi da će diskretna polja predstavljena kao gradijenti vektora potencijala čvorova biti bezvrtložna i na diskretnom nivou.

Ovaj pristup diskretizacije za rezultat ima celobrojne matrice  $C$ ,  $\tilde{C}$ ,  $S$ ,  $\tilde{S}$ , koje sadrže jedino informacije o relacijama incidentnosti dualnog ćelijskog kompleksa.

FIT nema problema sa nestabilnošću jer sistem mrežnih jednačina zadovoljava princip održanja energije i naelektrisanja. Dualizam diskretnih Maksvelovih jednačina garantuje da će ovako postavljeni numerički sistem imati numerički stabilna rešenja.

## 3.2 Mobilni telefon kao izvor zračenja

### 3.2.1 Antena mobilnog telefona

Pored mogućnosti koje nude bežični uređaji svakako bitna karakteristika jeste i njihova kompaktnost za upotrebu svuda i na svakom mestu. To pre svega zahteva razvoj uređaja čije su dimenzije pogodne za nošenje a da se pri tome ne izgubi na njihovoj funkcionalnosti.

Smanjenje dimenzija bežičnih uređaja iziskuje i smanjenje dimenzija njihovih sastavnih komponenti. Svakako bitna komponenta jednog mobilnog telefona je antena preko koje uređaj komunicira sa baznim stanicama i drugim uređajima. Da bi se ispunio uslov minijaturizacije, korišćene antene u mobilnim telefonima moraju odgovarati njihovim dimenzijama. Planarne antene, kao što su mikrostrip i štampane antene imaju male dimenzije, malu težinu, prilagodljive su za montažu, nisku cenu, mogućnost masovne proizvodnje, mogućnost rada u više frekvencijskih opsega i veliku mehaničku pouzdanost. Planarne antene su takođe veoma atraktivne za primenu u komunikacionim uređajima za široke mobilne telekomunikacije, kao što su mobilne mreže, bežične lokalne mreže itd. [120, 121].

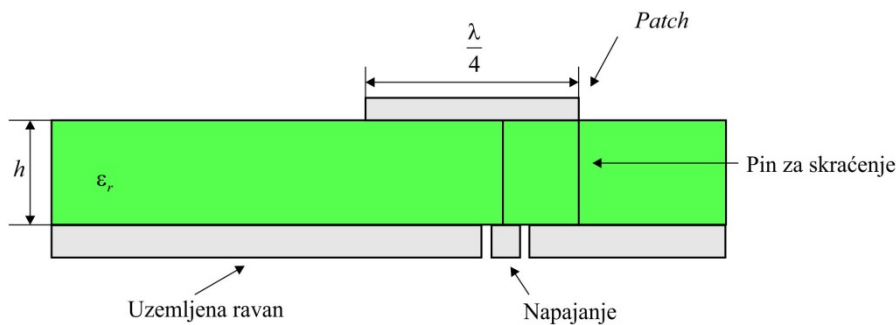
Za optimalne performanse sistema, antena mora da ima visoku efikasnost zračenja, male dimenzije, odgovarajuće karakteristike zračenja, mali nivo zračenja prema glavi korisnika i mogućnost podešavanje impedanse gubitaka. U grupu antena sa poboljšanim performansama spadaju i PIFA (PIFA - *Planar Inverted F Antenna*) antene. Prednosti upotrebe PIFA antene su pre svega:

- ❖ mogućnost skrivene ugradnje u kućištu mobilnog telefona za razliku od *whip/rod/helix* antena,
- ❖ smanjeno zračenje iza, prema glavi korisnika, pri čemu se smanjuje apsorpcija snage elektromagnetskog talasa i poboljšavaju performanse antene,
- ❖ ima umereno do visoko pojačanje i u vertikalnom i horizontalnom stanju polarizacije. Ova funkcija je veoma korisna u nekim bežičnim komunikacijama gde orijentacija antene nije fiksna a refleksija je prisutna iz različitih pravaca okruženja. U tim



slučajevima, važan parametar koji treba razmotriti je ukupno polje koje je zbir vektora horizontalne i vertikalne polarizacije.

PIFA se generalno sastoji od uzemljene ravni, gornje ploče, napajanja smeštenog između uzemljene ravni i gornje ploče, kao i metalne trake koja povezuje uzemljenu ravan i gornju ploču. Izgled PIFA sa strane je prikazan na slici 3.5 [122].



Slika 3.5 Planar Inverted-F Antena (PIFA)

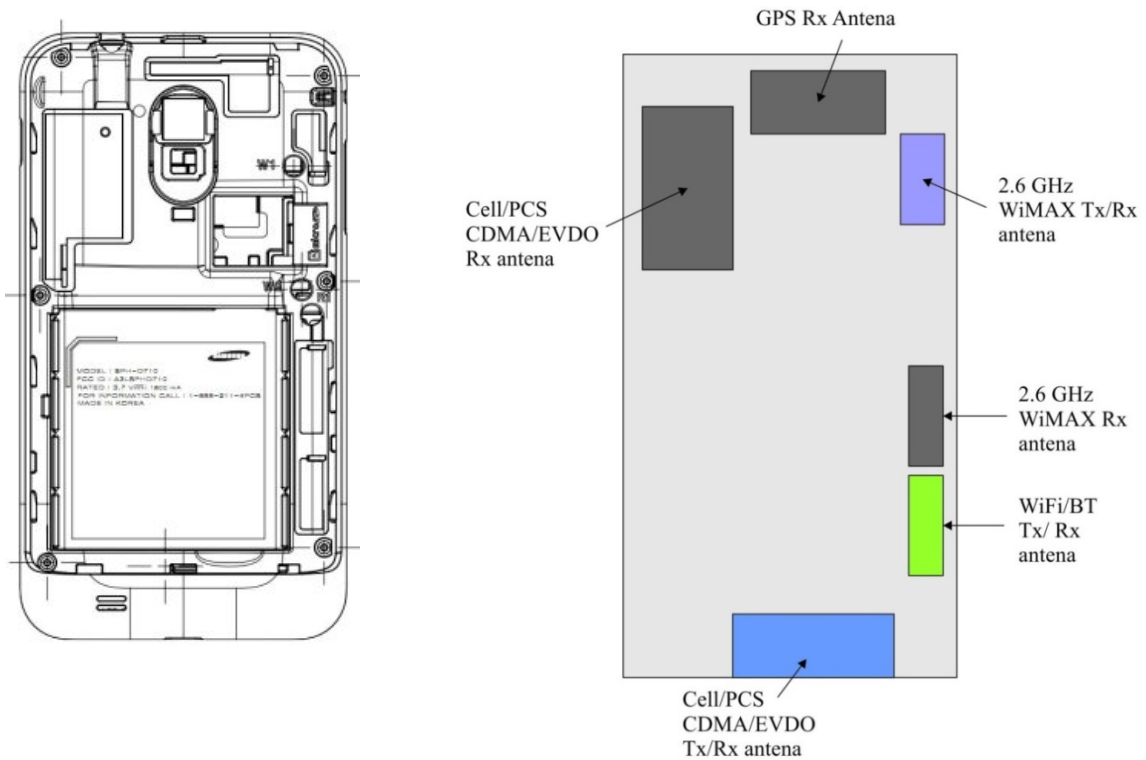
Kod PIFA antene propusni opseg zavisi od veličine uzemljene ravni. Promenom veličine uzemljene ravni, propusni opseg PIFA se može podesiti. Na primer, smanjenje veličine uzemljene ravni može efikasno proširiti propusni opseg antenskog sistema.

Uzak propusni opseg PIFA je jedno od ograničenja za njenu komercijalnu primenu za bežične mobilne uređaje. Smanjenje dimenzija antene može da utiče na karakteristiku zračenja, propusni opseg, pojačanje i efikasnost zračenja.

### 3.2.1.1 Primena PIFA antene

Pozicija PIFA antene u mobilnom telefonu biće prikazana na primeru Samsung Galaxy S android smart telefona. Telefon ima jednu predajnu/prijemnu (Tx/Rx) antenu i jednu samo prijemnu antenu (poznatu kao *diversity* antena). Zadnji deo telefona sa rasporedom antena prikazan je na slici 3.6. Telefon ima 6 antena. Tx/Rx mobilna antena je plavi pravougaonik na dnu a *diversity* mobilna antena je u gornjem levom regionu. GPS antena (1.575GHz) je na vrhu, a WiFi antena (dual-band, koja radi na 2.4GHz i 5GHz) je zeleni kvadrat na donjoj desnoj strani. Ovaj telefon ima WiMax antene (rade na 2.6GHz), jednu za Tx/Rx i drugu kao *diversity* (samo Rx) antenu.

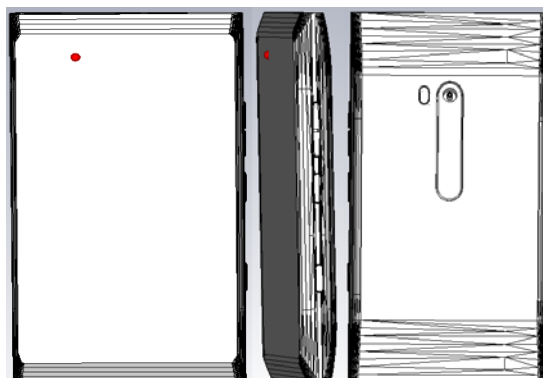
Sve ove antene su PIFA antene. Postoji jedna velika uzemljena ravan na kojoj su smešteni ploča i ekran osjetljiv na dodir, i to je uzemljena ravan za sve antene. Važno je napomenuti da cela uzemljena ravan (tj. ceo telefon) čini antenu [122].



Slika 3.6. Izgled zadnjeg dela telefona bez poklopca i raspored antena [122]

### 3.2.2 Model mobilnog telefona

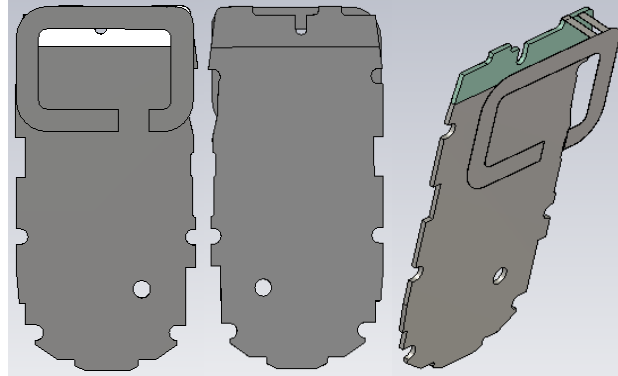
Kao izvor elektromagnetskog zračenja koristi se aktuelni model pametnog mobilnog telefona. U procesu modelovanja telefona za svaki od njegovih delova neophodno je zadati odgovarajuće elektromagnetske osobine koje opisuju materijal od koga je taj deo napravljen. Sastavni delovi telefona su: kućište telefona sa displejem (slika 3.7) i antena.



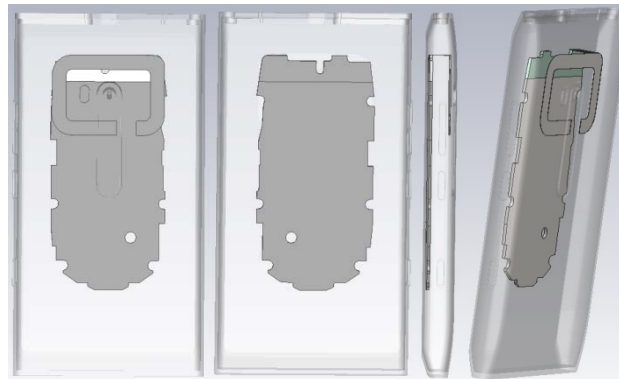
Slika 3.7 Spoljašnji izgled mobilnog telefona

Izvor zračenja je modelovan kao PIFA antena [109], snage  $P=1W$  [123], impedanse  $Z = 50\Omega$  i radne frekvencije od 0.9GHz, 1.8GHz, 2.1GHz, 2.8GHz, 3.2GHz i

73GHz. Na slikama 3.8 i 3.9 prikazan je izgled PIFA antene koja se koristi za simulaciju prostiranja elektromagnetskog talasa u ovoj disertaciji kao i njena pozicija u okviru mobilnog telefona.



Slika 3.8 Izgled PIFA antene [109]



Slika 3.9 Pozicija PIFA antene unutar mobilnog telefona

### 3.3 Numerički model glave deteta

Kao što je već rečeno, biološke sredine su nehomogene, nelinearne i disperzivne pa je raspodela apsorbirane mikrotalasne energije veoma složena. Zato je neophodno prilikom modelovanja glave čoveka uzeti u obzir sve parametre koji mogu da utiču na tačnost dobijenih rezultata.

Da bi što približnije dobili informacije o raspodeli elektromagnetskog polja u glavi deteta potrebno je modelovati glavu tako da što vernije predstavlja glavu deteta po svojim anatomskim i morfološkim karakteristikama. Za sva tkiva/organe moraju biti zadate elektromagnetske osobine koje su odgovarajuće za to tkivo/organ.

Čitav proces modelovanja prolazi kroz nekoliko faza:

- Spoljašnji oblik tkiva i organa se dizajnira u okviru programskog paketa za 3D dizajn. Ovako kreirani objekti su u obliku ljuske. Takođe, neophodno je da sva tkiva i organi (sastavni delovi modela) budu u odgovarajućoj srazmeri koja odgovara stvarnom anatomskom rasporedu u glavi osobe čija se glava kreira.
- Svako tkivo ili organ se zasebno kreira kao pun (*solid*) objekat, tj. kao zasebna celina i kao takvi se koriste u softveru za simulaciju elektromagnetskih 3D problema.
- Kako uveženi objekti predstavljaju nezavisne celine jedni u odnosu na druge, potrebno ih je povezati u jedinstvenu celinu. Imajući u vidu da su kod glave osobe čiji se model kreira tkiva i organi jedni unutar drugih, potrebno ih je postaviti na odgovarajućoj poziciji unutar modela. To se postiže isecanjem prostora unutar jednog objekta upravo objektom koji treba da zauzme tu poziciju. Ono o čemu treba voditi posebno pažnju prilikom ovakvih procesa je da nema preklapanja objekata tj. da idealno naležu jedni na druge kako bi se na pravilan način uzeli u obzir granični uslovi na razdvojnoj površini dva tkiva/organa.
- Nakon sklapanja modela vrši se definisanje elektromagnetskih osobina novonastalog objekta. Ti objekti treba da predstavljaju tkiva i organe i kao takve ih treba opisati u softveru. Pored dodeljivanja oznake svakom tkivu i organu neophodno je svaki od njih ispravno opisati sa aspekta elektromagnetskih osobina koje su svojstvene tim tkivima i organima. Elektromagnetske osobine koje se definišu su: relativna dielektrična konstanta, relativna magnetska permeabilnost, specifična provodnost, gustina, toplotni kapacitet i toplotna provodnost. Kako su elektromagnetske osobine tkiva i organa frekvencijski zavisne potrebno je njihove vrednosti uskladiti sa problemom koji se rešava.
- Kako prostor u kome se simuliraju problemi od interesa mora da bude ograničen, potrebno je definisati i odgovarajuće granice prostora u kome se vrši proračun prostiranja elektromagnetskog talasa.
- U fazi koja prethodi postupku simulacije prostiranja elektromagnetskog talasa neophodno je definisati mrežu za čitav prostor od interesa. Softver sam podešava gustinu mreže u zavisnosti od složenosti modela i problema, a postoji

i mogućnost ručnog podešavanja svih parametara mreže (broj linija mreže za datu talasnu dužinu, minimalna granica mreže, najmanji korak mreže). Ova opcija je izuzetno pogodna jer pruža mogućnost finog definisanja mreže, ravnomernog rasporeda i gustine mreže.

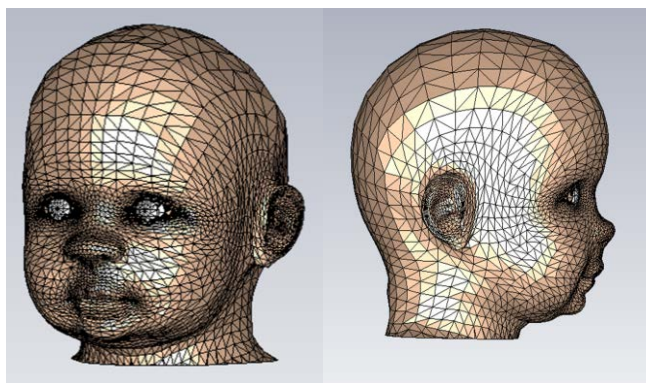
- U poslednjoj fazi se vrši proračun komponenata elektromagnetskog polja. Konkretno u okviru ove faze započinje proces simulacije prostiranja elektromagnetskog talasa od izvora zračenja. Neposredno pre početka procesa simulacije neophodno je izabrati veličine od interesa za analizu određenog problema (jačina električnog polja, jačina magnetnog polja, analiza dalekog polja, gustina snage gubitaka).

Model glave deteta je kreiran tako da odgovara po dimenzijama glavi sedmogodišnjeg deteta i sastoji se iz sledećih tkiva/organa:

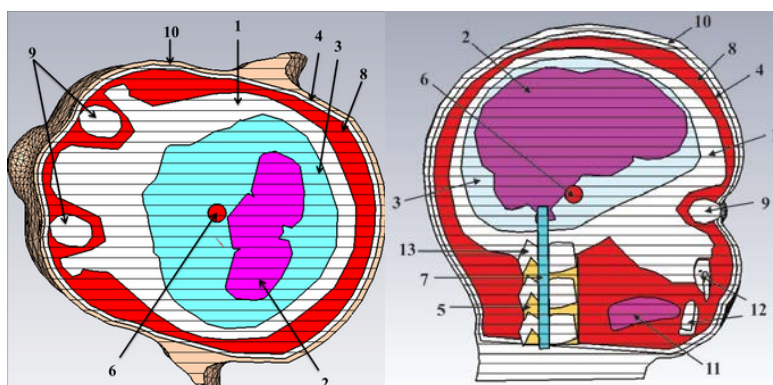
1. lobanja,
2. mozak,
3. moždana voda,
4. masno tkivo,
5. hrskavica,
6. hipofiza,
7. kičmena moždina,
8. mišići glave,
9. oči,
10. koža,
11. jezik,
12. vilica sa zubima,
13. pršljenovi.

Ilustracije radi, na slici 3.10 prikazan je spoljašnji izgled modela glave deteta generisan u programu CST.

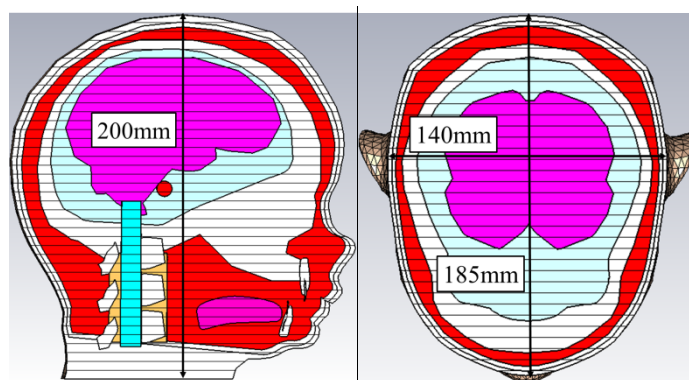
Proizvoljni presek modela glave deteta sa pozicijom opisanih tkiva/organa dat je na slici 3.11. Numeričke oznake za tkiva/organe na slici 3.11 odgovaraju rednom broju ispred tkiva/organa. Na slici 3.12 dati su poprečni preseki modela glave deteta sa zadatim dimenzijama glave.



Slika 3.10 Spoljašnji izgled modela glave deteta



Slika 3.11 Proizvoljni horizontalni i vertikalni poprečni presek modela glave deteta



Slika 3.12 Dimenzije modela dečije glave za dva različita poprečna preseka

U tabelama 3.1, 3.2, 3.3 date su elektromagnetske osobine tkiva/organa glave deteta koje su korišćene u simulaciji za različite radne frekvencije mobilnog telefona [124].

Tabela 3.1 Elektromagnetske osobine tkiva za frekvencije od 0.9GHz i 1.8GHz

	Tkiva/organi	0.9GHz			1.8GHz		
		$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
1.	Kost	12.45	0.143	1908	11.8	0.275	1908
2.	Mozak*	45.805	0.7665	1046	46.1	1.710	1046
3.	Moždana voda	68.60	2.410	1007	67.2	2.920	1007
4.	Masno tkivo	11.30	0.109	911	11.0	0.190	911
5.	Hrskavica	42.70	0.782	1100	40.2	1.290	1100
6.	Hipofiza	59.70	1.040	1053	58.1	1.500	1053
7.	Kičmena moždina	32.50	0.574	1075	30.9	0.843	1075
8.	Mišići glave	55.00	0.943	1090	53.5	1.340	1090
9.	Oko*	49.60	0.994	1052	46.3	1.369	1052
10.	Koža	41.40	0.867	1109	38.9	1.180	1109
11.	Jezik	55.30	0.936	1090	53.6	1.370	1090
12.	Zubi	12.50	0.143	2180	11.8	0.275	2180
13.	Pršljenovi	12.45	0.143	1908	11.8	0.275	1908

\* Elektromagnetske osobine organa su uzete kao srednja vrednost.

Tabela 3.2 Elektromagnetske osobine tkiva za frekvencije od 2.1GHz i 28GHz

	Tkiva/organi	2.1GHz			28GHz		
		$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
1.	Kost	11.60	0.328	1908	5.17	4.94	1908
2.	Mozak*	45.50	1.880	1046	18.6	25.85	1046
3.	Moždana voda	66.80	3.150	1007	28.2	43.8	1007
4.	Masno tkivo	10.90	0.224	911	6.09	5.04	911
5.	Hrskavica	39.50	1.490	1100	13.2	20	1100
6.	Hipofiza	57.70	1.700	1053	24.5	36.2	1053
7.	Kičmena moždina	30.50	0.951	1075	13.9	17.6	1075
8.	Mišići glave	53.20	1.510	1090	24.4	33.6	1090
9.	Oko*	47.88	1.530	1052	20.15	30.86	1052
10.	Koža	38.40	1.310	1109	16.6	25.8	1109
11.	Jezik	53.10	1.560	1090	22.7	33	1090
12.	Zubi	11.60	0.328	2180	5.17	4.94	2180
13.	Pršljenovi	11.60	0.328	1908	5.17	4.94	1908

\* Elektromagnetske osobine organa su uzete kao srednja vrednost.

Tabela 3.3 Elektromagnetske osobine tkiva za frekvencije od 39GHz i 73GHz

	Tkiva/organi	39 GHz			73 GHz		
		$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
1.	Kost	4.48	5.94	1908	3.58	7.77	1908
2.	Mozak*	14.3	32.05	1046	8.83	41.8	1046
3.	Moždana voda	21.1	54.1	1007	11.9	70.3	1007
4.	Masno tkivo	5.27	6.47	911	4.08	9.26	911
5.	Hrskavica	10.5	23.4	1100	7.25	29.2	1100
6.	Hipofiza	18.5	45	1053	10.8	58.7	1053
7.	Kičmena moždina	11	21.7	1075	7.26	28.3	1075
8.	Mišići glave	18.6	42.5	1090	10.9	56.9	1090
9.	Oko*	14.97	37.9	1052	8.6	48.13	1052
10.	Koža	12	31.4	1109	6.82	37.9	1109
11.	Jezik	17.2	41	1090	10.2	53.5	1090
12.	Zubi	4.48	5.94	2180	3.58	7.77	2180
13.	Pršljenovi	4.48	5.94	1908	3.58	7.77	1908

\* Elektromagnetske osobine organa su uzete kao srednja vrednost.

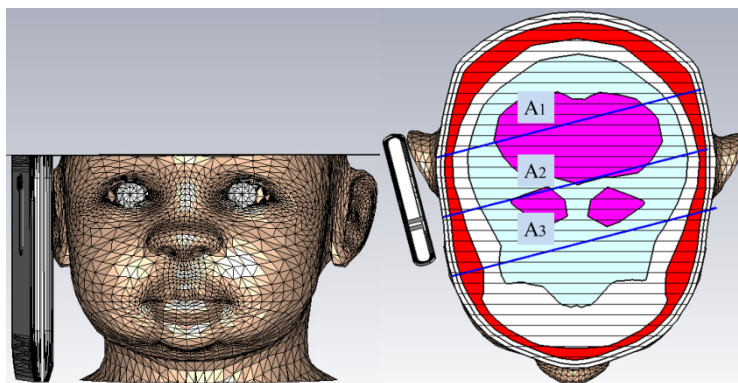


## 4. Raspodela elektromagnetskog polja unutar modela glave deteta

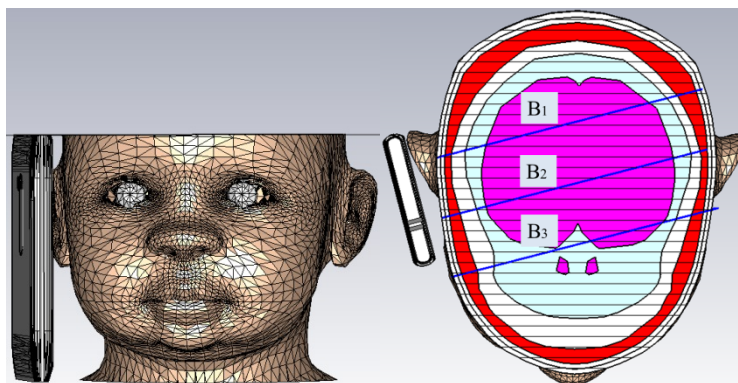
Kao što je već napomenuto, za numeričko izračunavanje prostiranja elektromagnetskog talasa korišćen je FIT metod, metod konačnih integrala. To podrazumeva da kreiran model glave deteta mora da bude predstavljen konačnim brojem elemenata, tj. ćelija. U tu svrhu neophodno je kreirati mrežu prostora od interesa sa dovoljno velikim brojem ćelija kako bi bila obezbeđena dovoljna tačnost rezultata.

Čitav model je izdeljen na sitne ćelije u obliku heksahedrona. Pored toga što upravo broj ćelija diktira tačnost rezultata, neophodno je izvršiti prilagođenje njihovog broja talasnoj dužini elektromagnetskog talasa koji se prostire od izvora zračenja. Budući da je proces simulacije prostiranja elektromagnetskog talasa vršen za više različitih nosećih frekvencija, korišćene su dve ćelijske mreže modela. Za frekvencije od 0.9 GHz, 1.8 GHz i 2.1 GHz model glave deteta se sastoji od 8,648,046 ćelija, dok za frekvencije iz milimetarskog opsega, 28 GHz, 39 GHz i 73 GHz broj ćelija je 42,261,030.

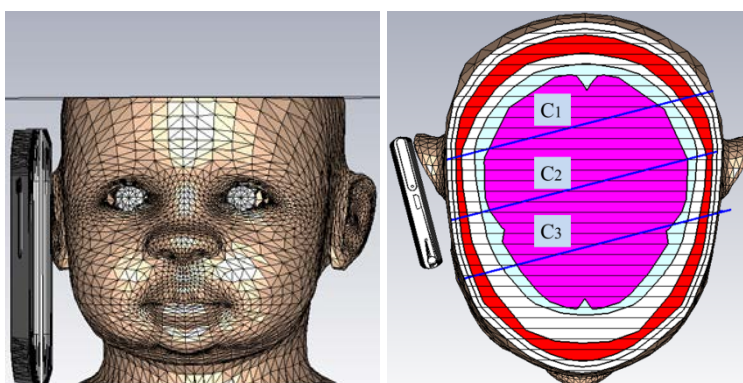
Kao rezultati simulacije zračenja mobilnog telefona u glavi modela deteta razmatrane su sledeće veličine: intenzitet električnog polja, intenzitet magnetskog polja, gustina snage gubitaka i vrednosti za SAR usrednjene za 1g i 10g. Rezultati raspodele ovih veličina proračunati su za različite horizontalne preseke. U okviru svakog preseka dobijeni rezultati prikazani su duž više pravaca koje leže u horizontalnim presecima (A, B, C, D i E) modela glave deteta. Prikaz preseka i pravaca po kojima će se vršiti procena dobijenih rezultata dati su na slikama 4.1-4.5.



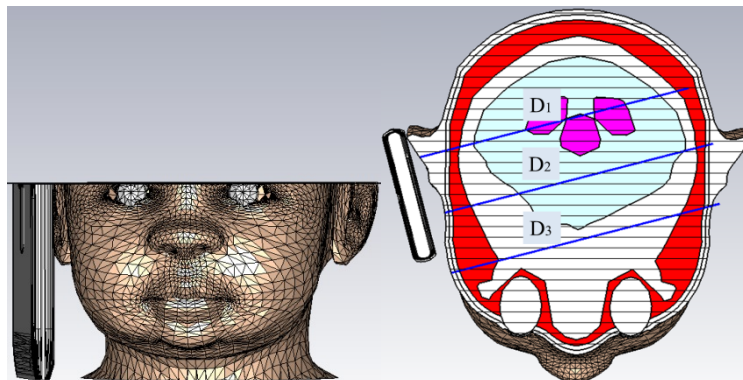
Slika 4.1 Presek A i pravci A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub> i A<sub>3</sub> za procenu rezultata



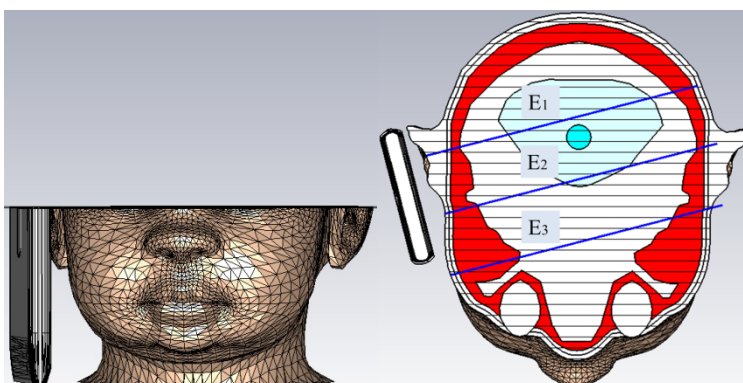
Slika 4.2 Presek B i pravci B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub> i B<sub>3</sub> za procenu rezultata



Slika 4.3 Presek C i pravci C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> i C<sub>3</sub> za procenu rezultata



Slika 4.4 Presek D i pravci D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub> i D<sub>3</sub> za procenu rezultata



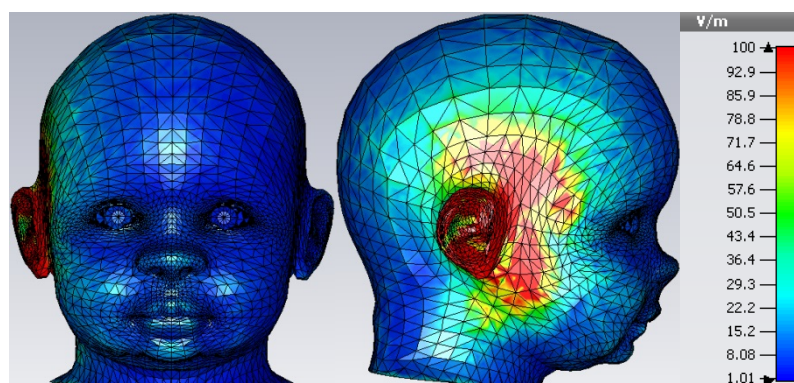
Slika 4.5 Presek E i pravci E<sub>1</sub>, E<sub>2</sub> i E<sub>3</sub> za procenu rezultata

Šema izbora preseka je sledeća: presek A odgovara nivou napajanja PIFA antene, preseki B i C su izabrani tako da se nalaze iznad preseka A i da prolaze kroz mozak modela deteta dok se preseki D i E nalaze ispod preseka A u nivou očiju.

## 4.1 Raspodela elektromagnetskog polja za $f = 0.9\text{GHz}$

### 4.1.1 Vrednost intenziteta električnog polja za $f = 0.9\text{GHz}$

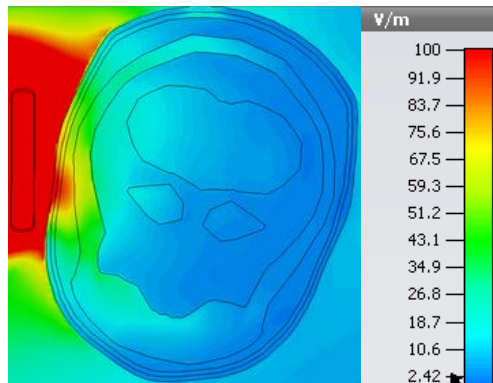
Na slici 4.6 date su vrednosti intenziteta električnog polja po površini modela glave deteta tokom korišćenja mobilnog telefona. Oblasti na površini kože glave deteta prikazane crvenom bojom predstavljaju oblasti koje su izložene najvišim vrednostima intenziteta električnog polja. Važno je napomenuti da je zbog preglednosti prikaza rezultata, maksimalna vrednost električnog polja u paleti boja ograničena na  $100\text{V/m}$ . Naime, vrednost električnog polja je svakako najveća u okolini antene mobilnog telefona i značajno je veća nego u glavi modela. Ukoliko bi se u paleti boja koristila stvarna maksimalna vrednost polja promene vrednosti polja unutar glave bi bile gotovo neuočljive na slikama. Budući da su za analizu najbitnije promene unutar glave bilo je neophodno izvršiti podešavanje grafičkog prikaza raspodele veličina od interesa. To znači da vrednosti polja u oblastima prikazanim crvenom bojom mogu da budu i veće od gornje granice iz palete boja. Maksimalne vrednosti polja za različite preseke se mogu videti iz 1D prikaza raspodele polja (videti u nastavku analize).



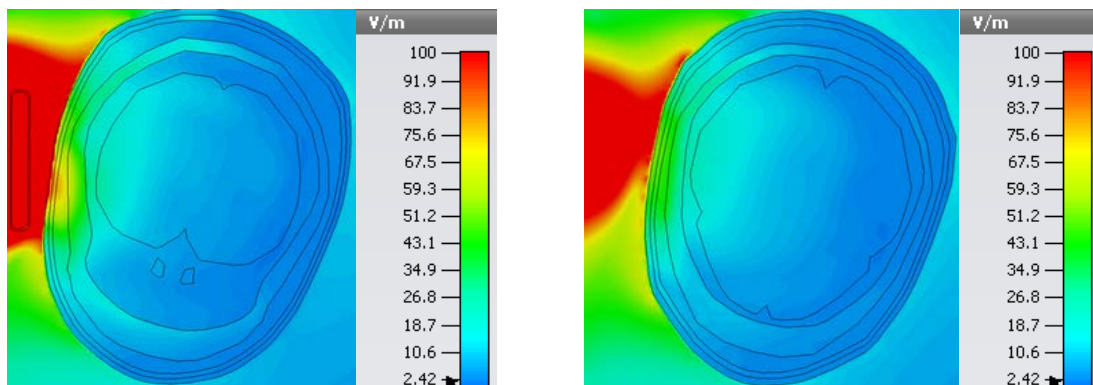
Slika 4.6 Intenzitet električnog polja  $E[\text{V/m}]$  po površini modela

Na slikama 4.7-4.9 date su vrednosti intenziteta električnog polja unutar glave modela deteta za više različitih horizontalnih preseka (slike 4.1-4.5). Sa slika se vide vrednosti električnog polja koje potiče od izvora zračenja za različita tkiva i organe u glavi deteta.

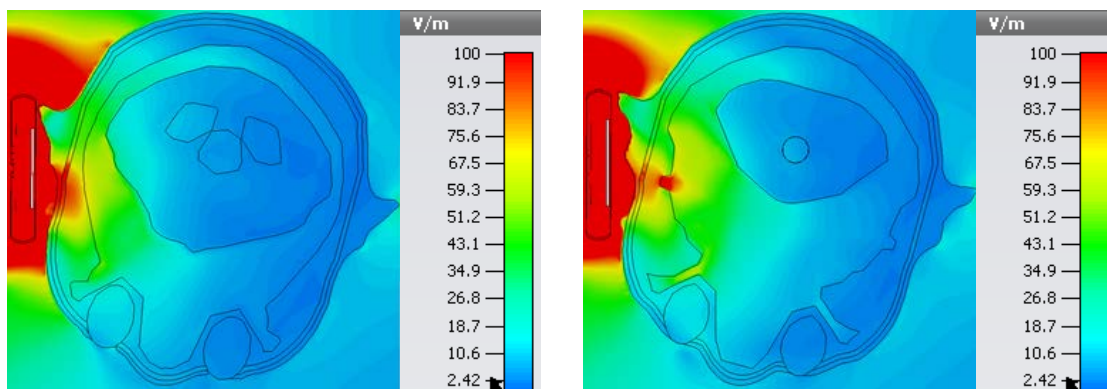
Imajući u vidu da je prema Pravilniku o granicama izlaganja nejonizujućim zračenjima (videti poglavlje 2.1.3) referentni granični nivo za električno polje na 0.9GHz 16.5V/m u slobodnom prostoru, bez prisustva čoveka, sa slika se vidi da su vrednosti u pojedinim delovima glave deteta daleko iznad ove granice. Svakako, vrednosti intenziteta električnog polja kao i dubina prodiranja elektromagnetskog talasa najveće su u oblasti koja je blizu antene mobilnog telefona.



Slika 4.7 Vrednosti intenziteta električnog polja za presek A

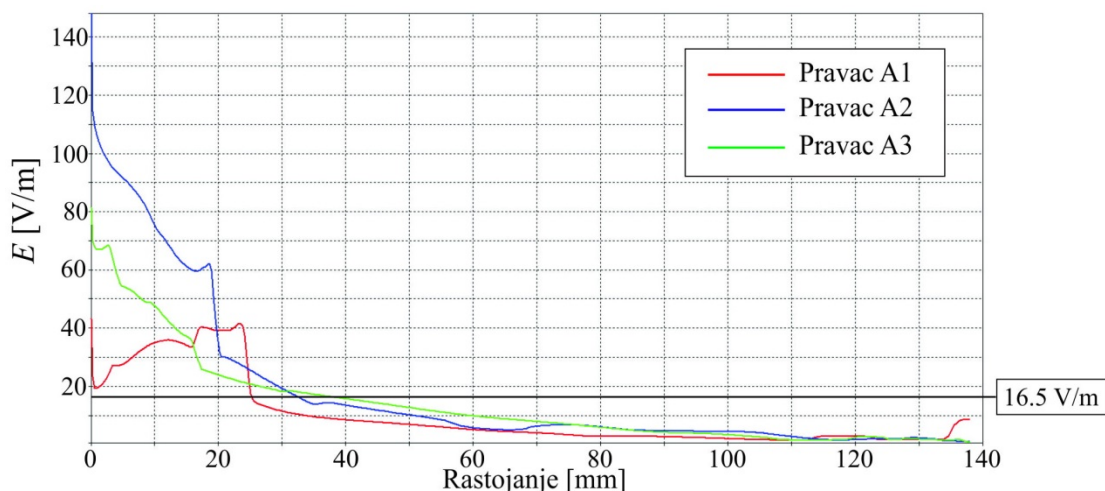


a) B b) C  
Slika 4.8 Vrednosti intenziteta električnog polja za preseke B i C



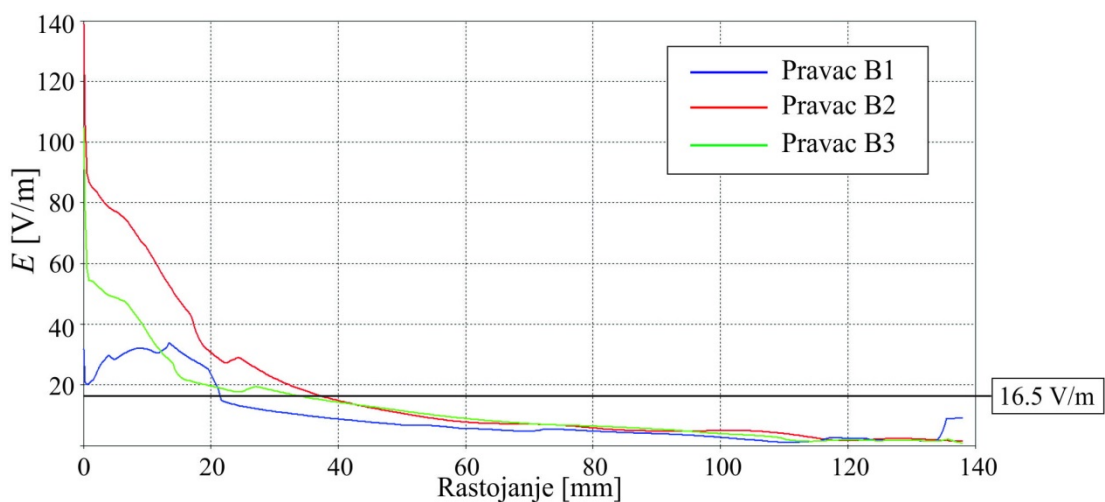
a) D b) E  
Slika 4.9 Vrednosti intenziteta električnog polja za preseke D i E

Na slikama 4.10-4.14 prikazana je zavisnost vrednosti intenziteta električnog polja od rastojanja za pravce (slike 4.1-4.5) koji pripadaju različitim presecima.

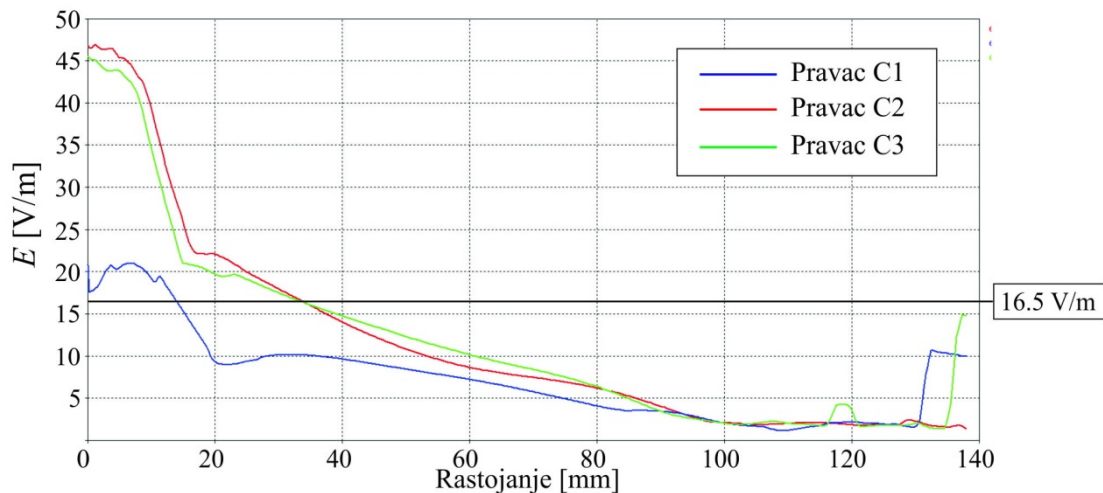


Slika 4.10 Grafik zavisnosti intenziteta električnog polja za presek A duž pravaca A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub> i A<sub>3</sub>

Na slici 4.10 dat je grafik zavisnosti intenziteta električnog polja od rastojanja duž pravaca A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub> i A<sub>3</sub>. Ono što je zajedničko za sve tri krive jeste da je vrednost intenziteta električnog polja u površinskim slojevima glave deteta znatno iznad referentnih graničnih nivoa. Možemo videti da je najviša vrednost intenziteta električnog polja na liniji A<sub>1</sub> čak 150V/m na ulazu u glavu deteta i da vrednost polja pada na vrednost ispod referentnog graničnog nivoa tek na 35mm od početka. Evidentno je da je prodor polja prilično veliki i da se visoke vrednosti protežu na više tkiva i organa. Ne smemo zanemariti činjenicu da su Pravilnikom propisane vrednosti polja u slobodnom prostoru, bez prisustva čoveka i da ove vrednosti u telu moraju da budu daleko manje kao posledica apsorpcije u tkivima i organima.

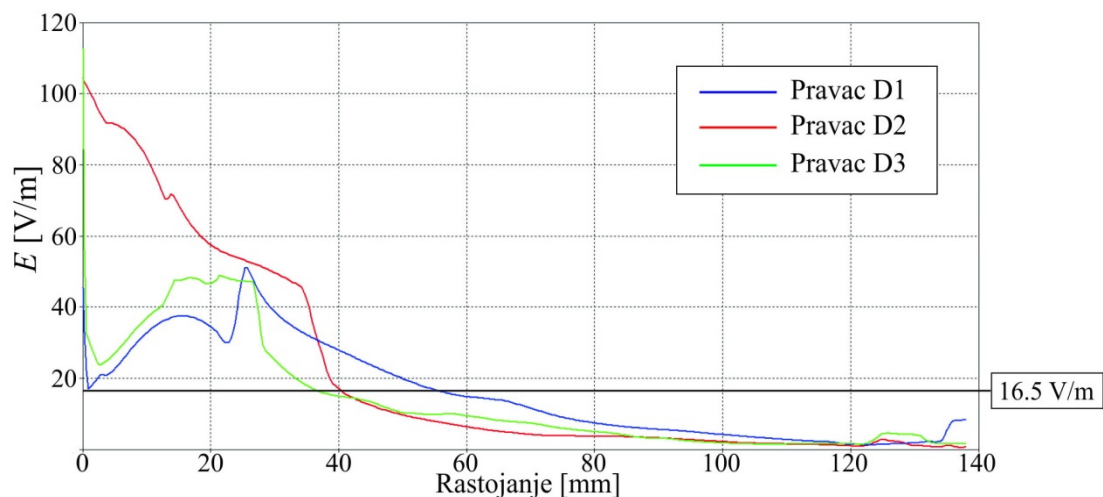


Slika 4.11 Grafik zavisnosti intenziteta električnog polja za presek B duž pravaca B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub> i B<sub>3</sub>

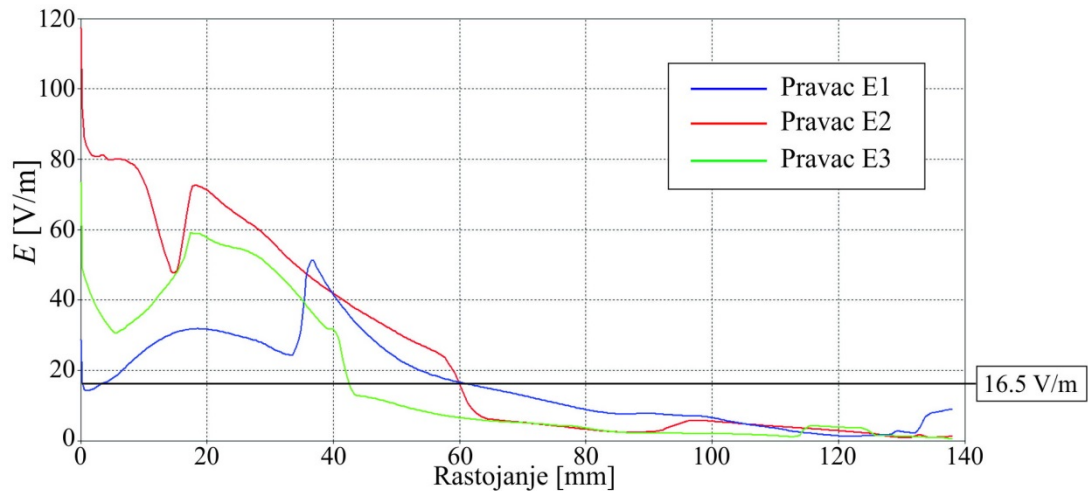


Slika 4.12 Grafik zavisnosti intenziteta električnog polja za presek C duž pravaca  $C_1$ ,  $C_2$  i  $C_3$

Kako presek B odgovara gornjoj ivici telefona a presek C se nalazi iznad telefona za očekivati je bilo da će doći do smanjenja maksimalnih vrednosti intenziteta električnog polja, prvenstveno za presek C. Međutim, u oba preseka je primetno prisustvo visokih vrednosti električnog polja. Za sva tri preseka, slike 4.10-4.12, vrednosti intenziteta električnog polja su iznad referentnog graničnog nivoa do oko 37mm od početka pravaca, na 40mm vrednost intenziteta polja je 15V/m i tek na 60mm pada ispod 10V/m.



Slika 4.13 Grafik zavisnosti intenziteta električnog polja za presek D duž pravaca  $D_1$ ,  $D_2$  i  $D_3$

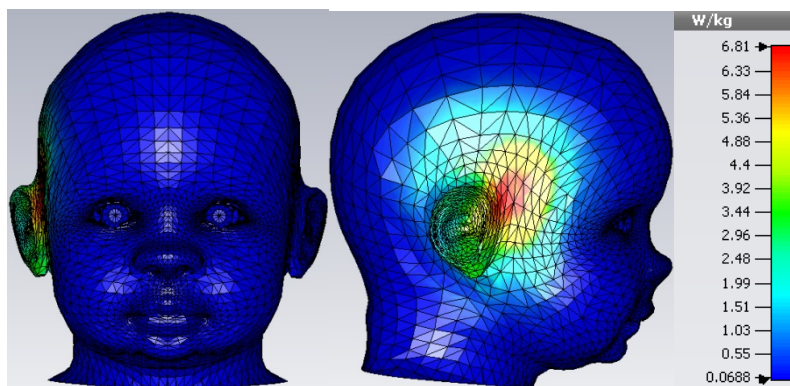


Slika 4.14 Grafik zavisnosti intenziteta električnog polja za presek E duž pravaca  $E_1$ ,  $E_2$  i  $E_3$

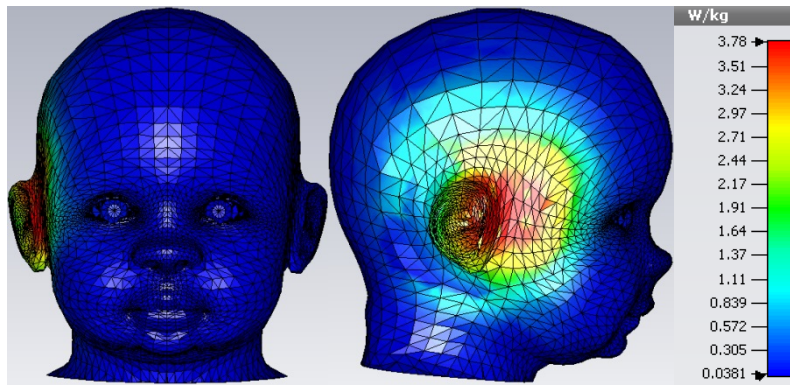
Za preseke D i E primetnije su više vrednosti jer se oba preseka nalaze u oblastima gde je antena telefona. Vidimo da su, za razliku od prva tri preseka, vrednosti polja na 40mm negde oko 40V/m, na 60mm 20V/m a da tek nakon 80mm vrednost pada na 10V/m i manje. Ono što je evidentno jeste da su prisutne visoke vrednosti intenziteta električnog polja u određenim oblastima glave modela, prvenstveno u oblastima gde se nalazi antena mobilnog telefona.

#### 4.1.2 Raspodela $SAR_{1g}$ i $SAR_{10g}$ za $f = 0.9GHz$

Na slikama 4.15 i 4.16 dat je prikaz prostorne raspodele  $SAR_{1g}$  i  $SAR_{10g}$  i njihova maksimalna vrednost uz samu površinu modela glave deteta. Na slikama 4.17-4.21 data je raspodela  $SAR_{1g}$  i  $SAR_{10g}$  unutar glave deteta za različite preseke.

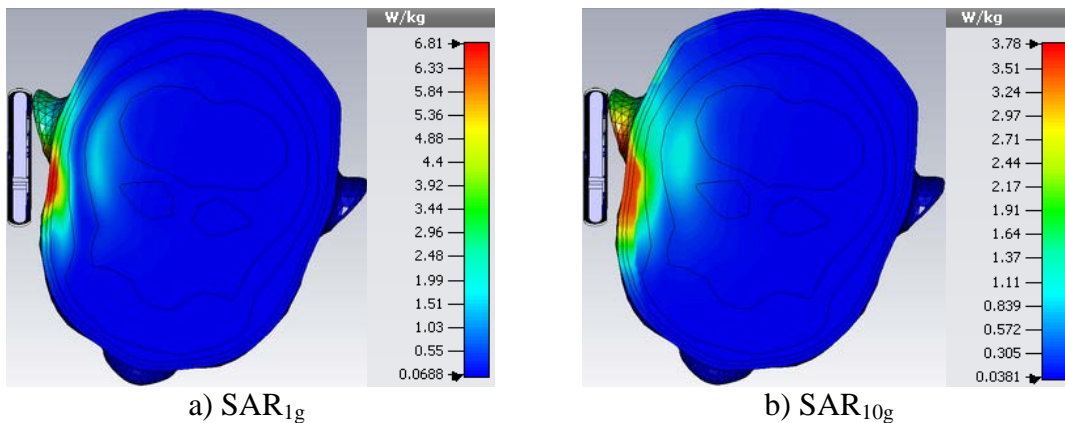


Slika 4.15 Raspodela  $SAR_{1g}$  uz samu površinu modela

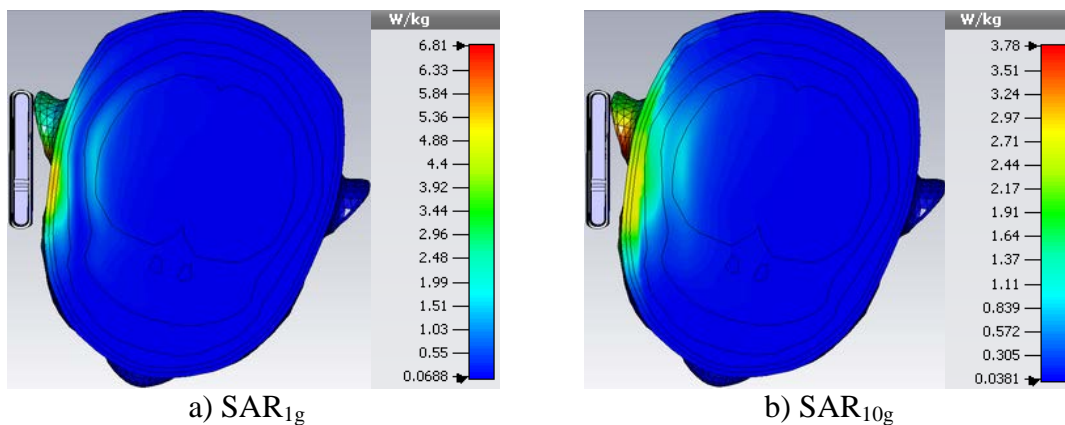


Slika 4.16 Raspodela  $SAR_{10g}$  uz samu površinu modela

Na osnovu datih vrednosti za SAR i u slučaju  $SAR_{1g}$  i  $SAR_{10g}$  vidimo da su maksimalne vrednosti znatno iznad bazičnih ograničenja za SAR,  $1.6W/kg$  za  $SAR_{1g}$  [59] i  $2W/kg$  za  $SAR_{10g}$  [61] (videti poglavlje 2.1.3). Na slikama 4.22-4.31 data je zavisnost vrednosti  $SAR_{1g}$  i  $SAR_{10g}$  od rastojanja za različite preseke.

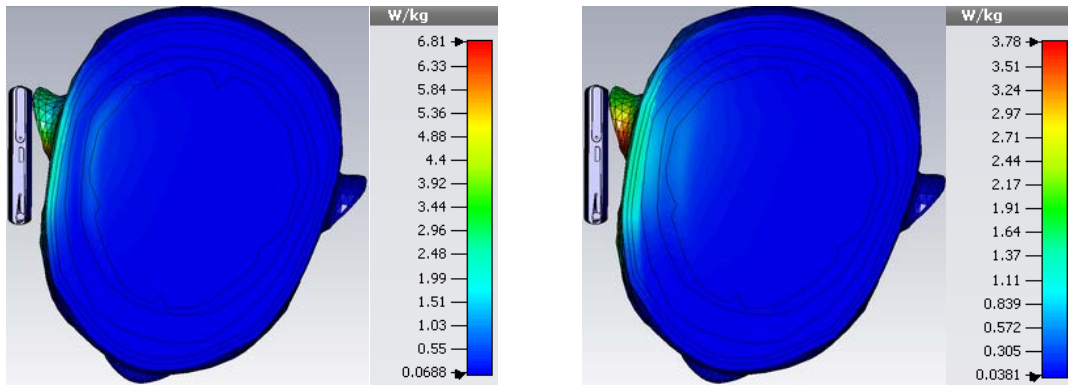


Slika 4.17 Raspodela  $SAR_{1g}$  i  $SAR_{10g}$  za horizontalni presek A

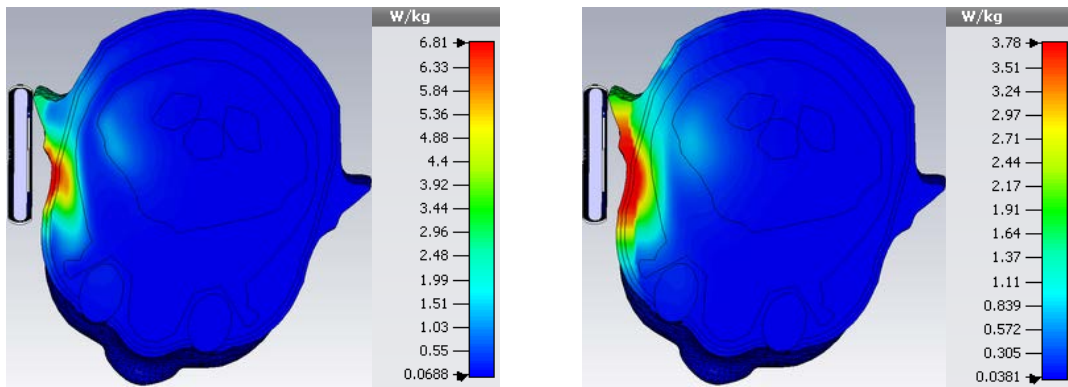


Slika 4.18 Raspodela  $SAR_{1g}$  i  $SAR_{10g}$  za horizontalni presek B

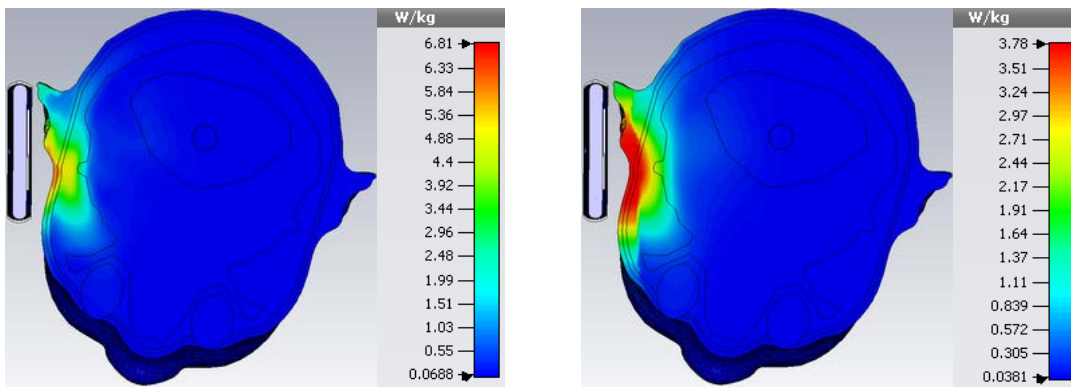




a) SAR<sub>1g</sub> b) SAR<sub>10g</sub>  
Slika 4.19 Raspodela SAR<sub>1g</sub> i SAR<sub>10g</sub> za horizontalni presek C

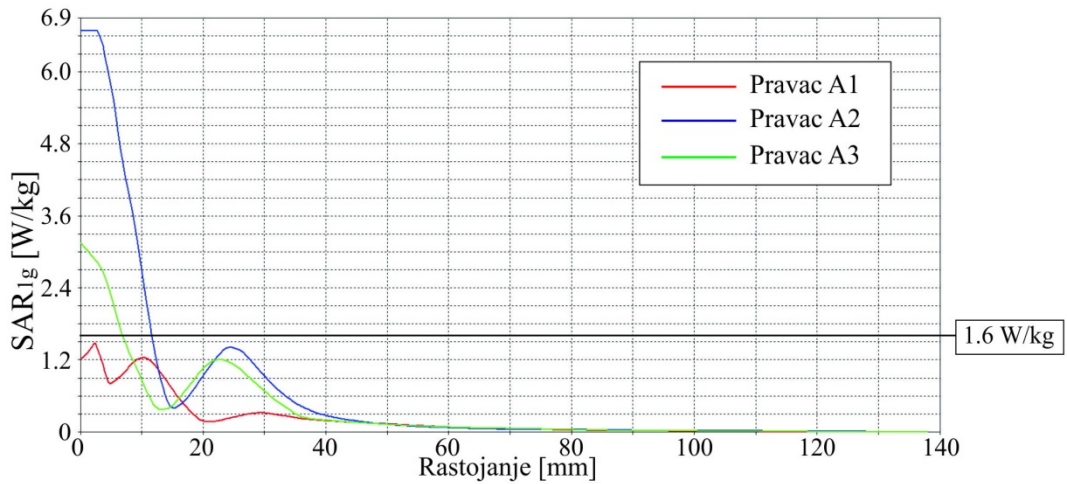


a) SAR<sub>1g</sub> b) SAR<sub>10g</sub>  
Slika 4.20 Raspodela SAR<sub>1g</sub> i SAR<sub>10g</sub> za horizontalni presek D

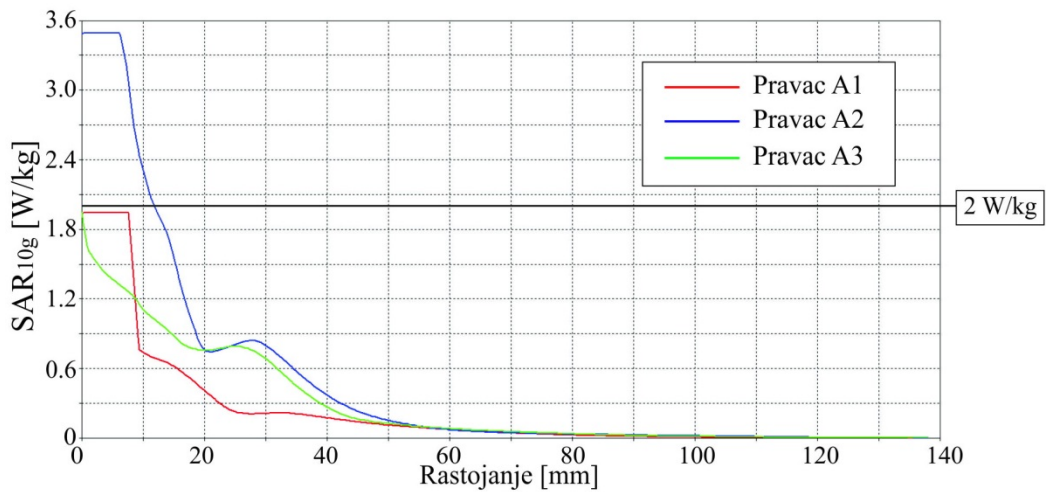


a) SAR<sub>1g</sub> b) SAR<sub>10g</sub>  
Slika 4.21 Raspodela SAR<sub>1g</sub> i SAR<sub>10g</sub> za horizontalni presek E

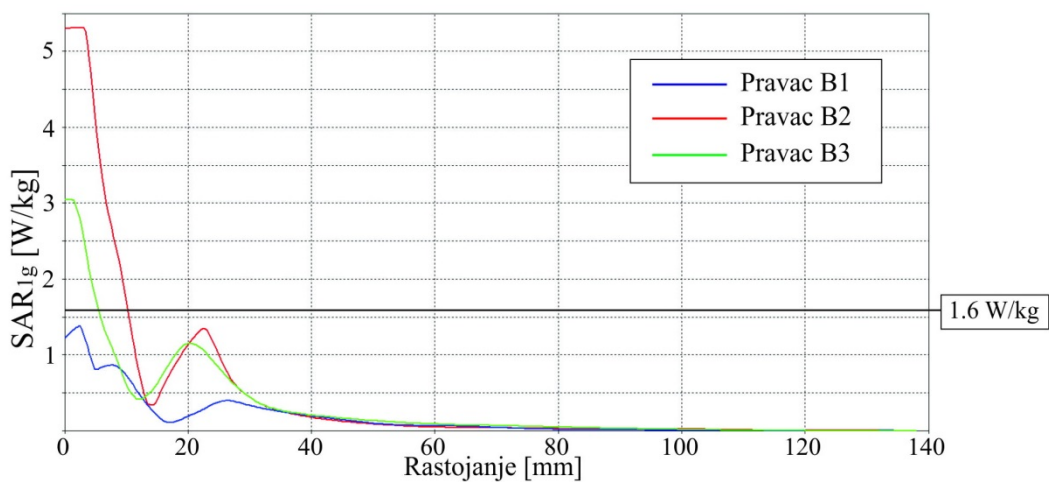
Sa slika je evidentno da su bazična ograničenja premašena u površinskim slojevima, prvenstveno u koži, masnom tkivu i mišićima.



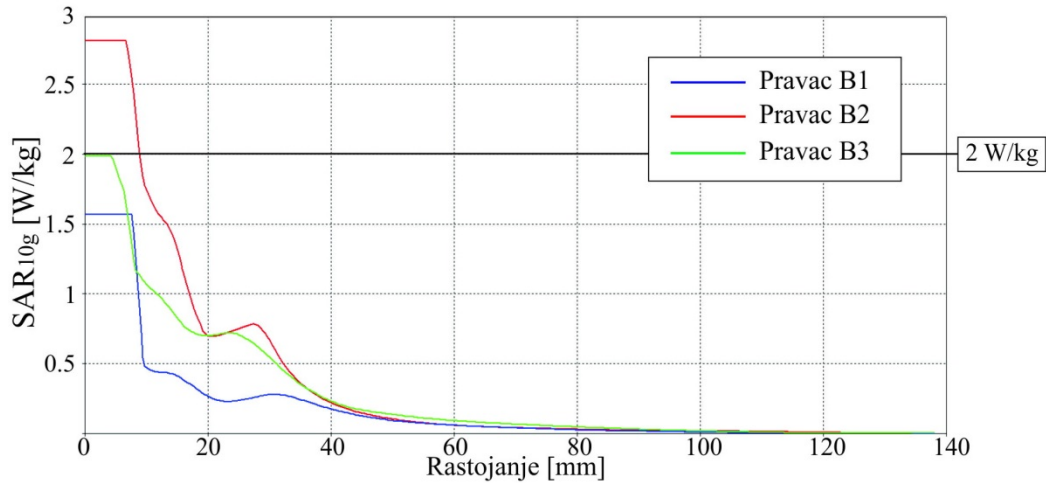
Slika 4.22 Grafik raspodele SAR<sub>1g</sub> za presek A duž pravaca A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub> i A<sub>3</sub>



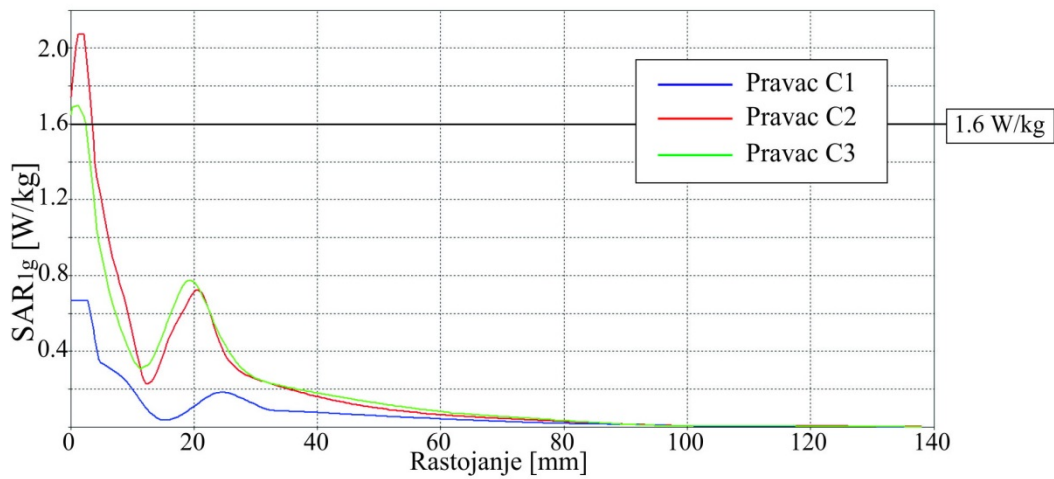
Slika 4.23 Grafik raspodele SAR<sub>10g</sub> za presek A duž pravaca A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub> i A<sub>3</sub>



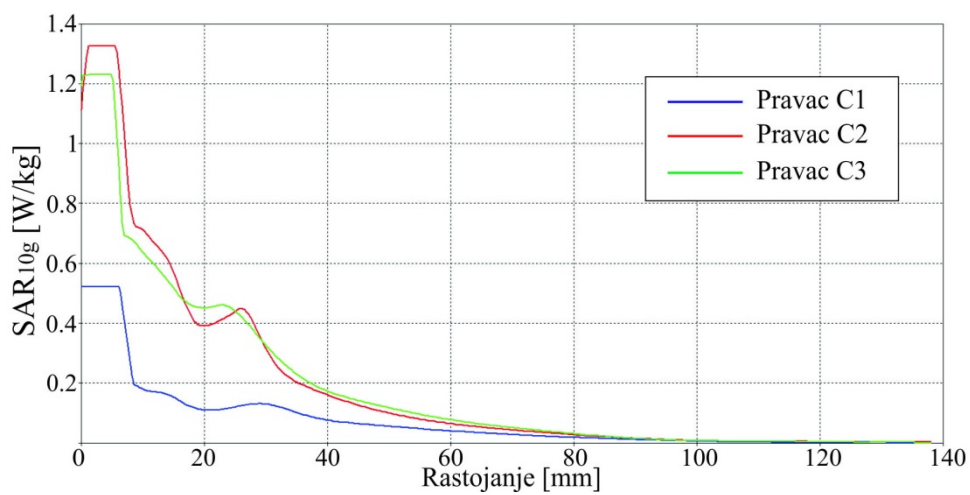
Slika 4.24 Grafik raspodele SAR<sub>1g</sub> za presek B duž pravaca B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub> i B<sub>3</sub>



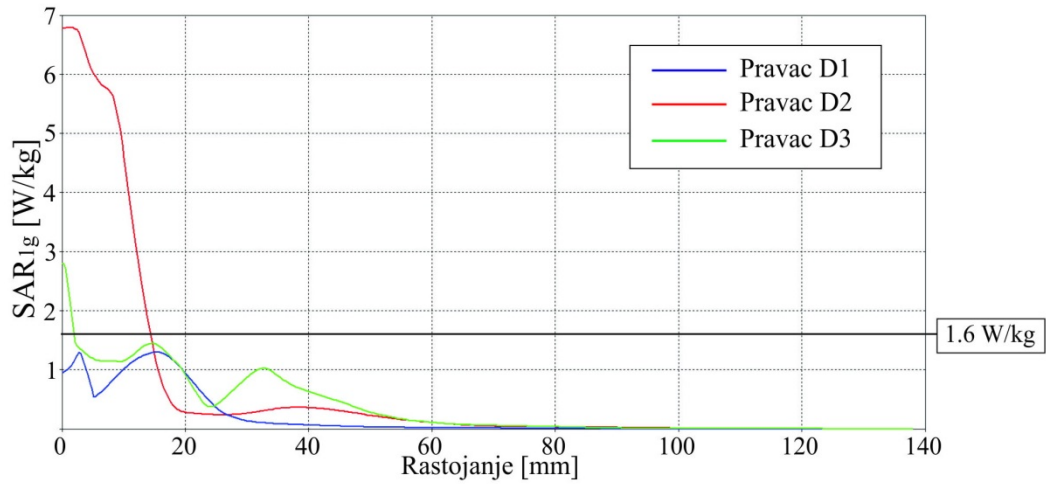
Slika 4.25 Grafik raspodele SAR<sub>10g</sub> za presek B duž pravaca B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub> i B<sub>3</sub>



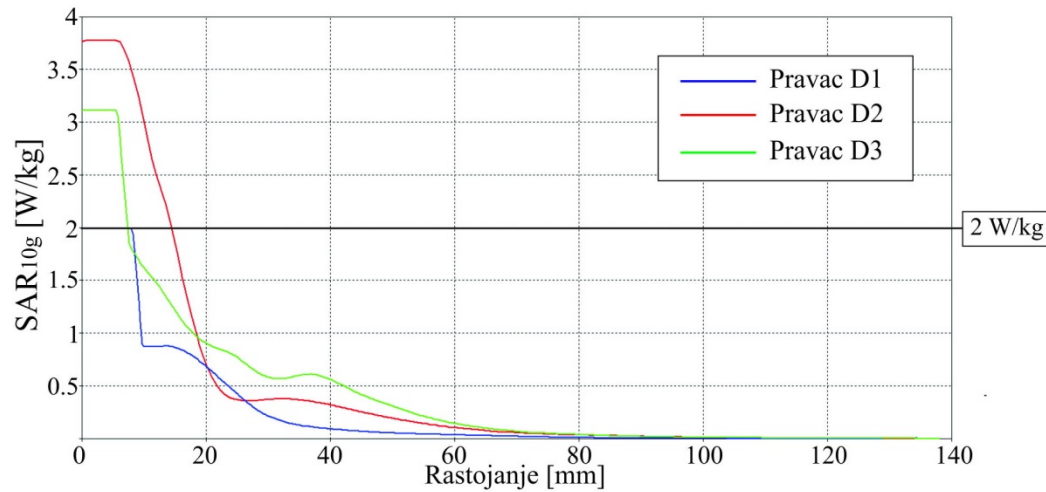
Slika 4.26 Grafik raspodele SAR<sub>1g</sub> za presek C duž pravaca C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> i C<sub>3</sub>



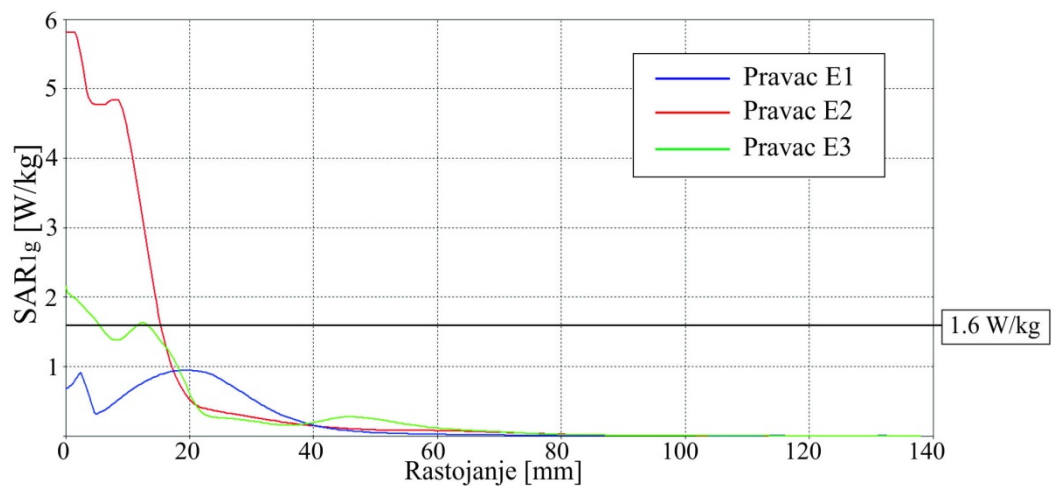
Slika 4.27 Grafik raspodele SAR<sub>10g</sub> za presek C duž pravaca C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> i C<sub>3</sub>



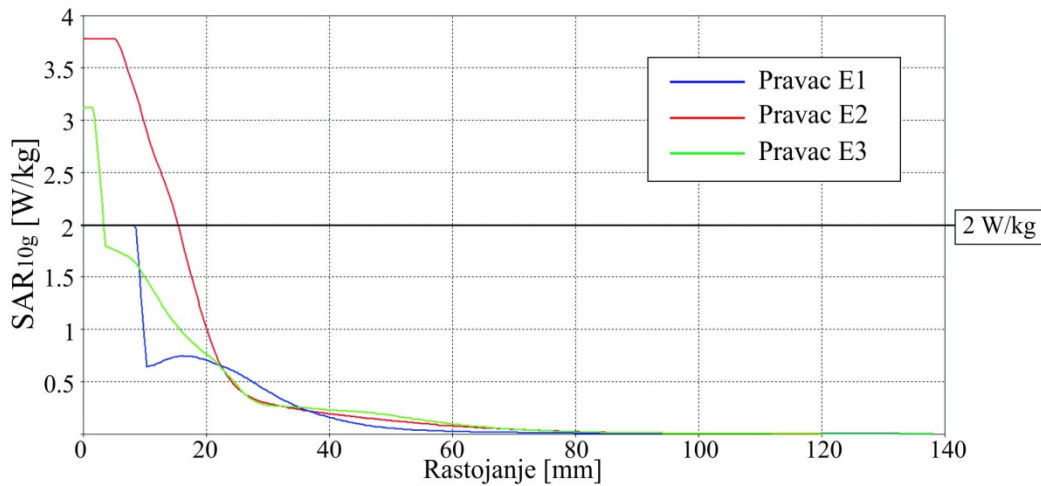
Slika 4.28 Grafik raspodele  $SAR_{1g}$  za presek D duž pravaca  $D_1$ ,  $D_2$  i  $D_3$



Slika 4.29 Grafik raspodele  $SAR_{10g}$  za presek D duž pravaca  $D_1$ ,  $D_2$  i  $D_3$



Slika 4.30 Grafik raspodele  $SAR_{1g}$  za presek E duž pravaca  $E_1$ ,  $E_2$  i  $E_3$

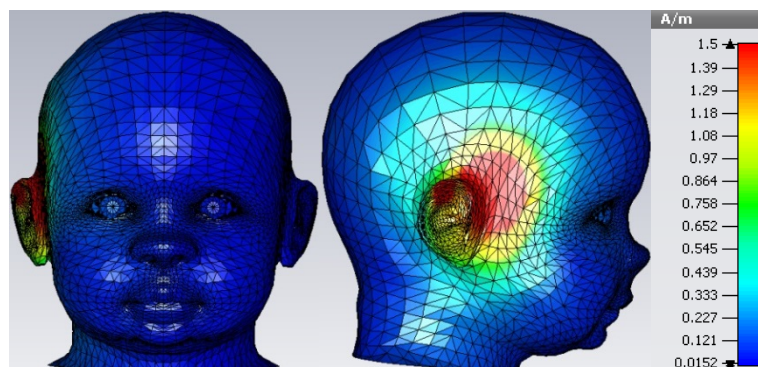


Slika 4.31 Grafik raspodele SAR<sub>10g</sub> za presek E duž pravaca E<sub>1</sub>, E<sub>2</sub> i E<sub>3</sub>

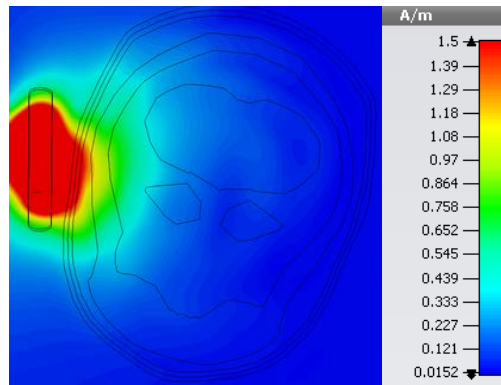
Sa grafika vidimo da za svaki presek vrednosti za SAR<sub>1g</sub> i SAR<sub>10g</sub> (izuzev vrednosti za SAR<sub>10g</sub> za presek C) premašuju maksimalno dozvoljenu vrednosti od 1.6 i 2W/kg, respektivno. U slučaju SAR<sub>1g</sub> to premašenje ide i do 4 puta dok je u slučaju SAR<sub>10g</sub> 2 puta. Za preseke A i B visoke vrednosti za SAR<sub>1g</sub> i SAR<sub>10g</sub> su prisutne u tkivima do dubine od 10mm nakon čega vrednost pada ispod 1.6W/kg i 2W/kg, dok je kod preseka D i E to do 18mm. Za sve preseke nakon 80mm te vrednosti postaju zanemarljivo male ili gotovo jednake nuli, što znači da do ove dubine dolazi do gotovo potpunog apsorbovanja elektromagnetske energije. Imajući u vidu rastojanje do koga su prisutne SAR vrednosti, možemo zaključiti da elektromagnetski talas prodire duboko u mozak deteta.

#### 4.1.3 Vrednost jačine magnetskog polja za $f = 0.9\text{GHz}$

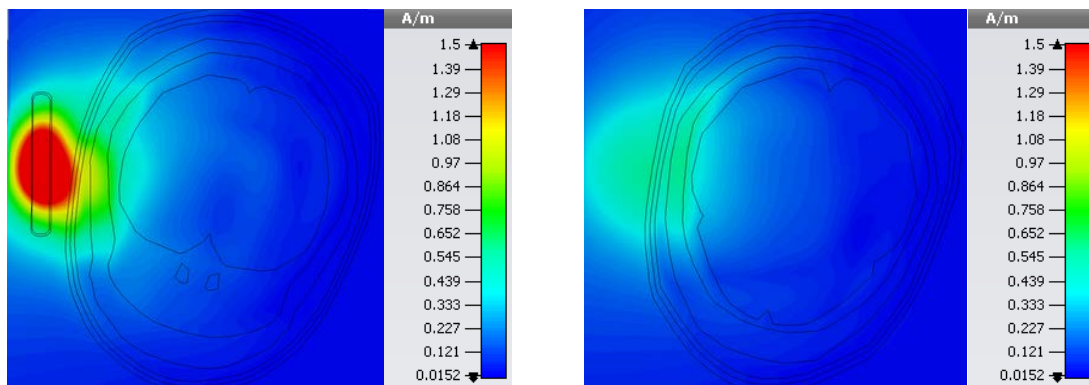
Na slici 4.32 date su vrednosti jačine magnetskog polja na površini modela glave deteta. Na slikama 4.33-4.35 date su vrednosti jačine magnetskog polja unutar glave deteta za različite preseke.



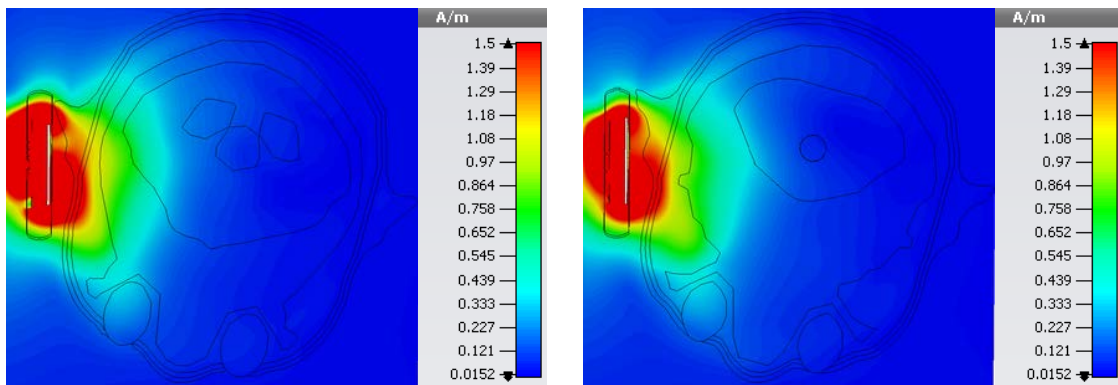
Slika 4.32 Jačina magnetskog polja  $H$  [A/m] po površini modela



Slika 4.33 Jačina magnetskog polja za presek A



a) B b) C  
Slika 4.34 Jačina magnetskog polja za preseke B i C



a) D b) E  
Slika 4.35 Jačina magnetskog polja za preseke D i E

Maksimalna vrednost polja u paleti boja, kao i u slučaju intenziteta električnog polja, je podešena na 1.5A/m radi preglednosti i lakše uočljivosti razlike u raspodeli polja (videti 4.1.1). Budući da je referentni granični nivo za jačinu magnetskog polja 0.044A/m, vidimo da je ova vrednost premašena u velikom delu glave deteta. Kod preseka D i E prisutne su izuzetno visoke vrednosti magnetskog polja u koži, masnom tkivu i mišićima.

#### 4.1.4 Raspodela gustine snage gubitaka za $f = 0.9\text{GHz}$

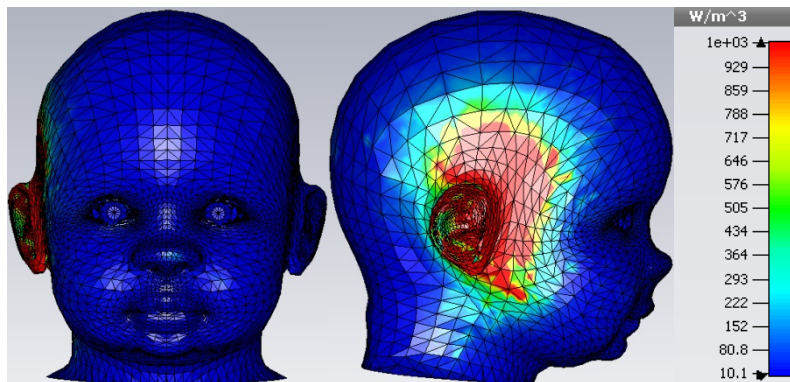
Gustina snage gubitaka definiše se kao apsorbovana snaga po jedinici zapremine u jedinici vremena:

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d}{dt} \left( \frac{dW}{dV} \right). \quad (4.1)$$

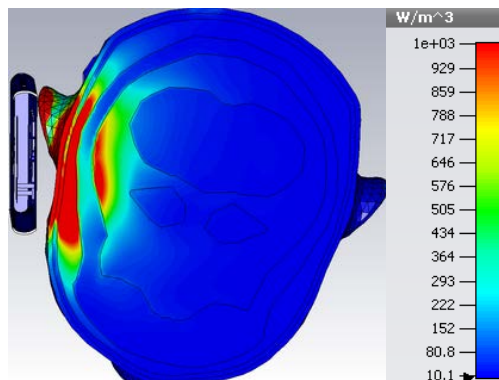
Kako se dielektrična svojstva bioloških materijala izvode iz kompleksne relativne dielektrične konstante  $\underline{\epsilon}_r$  (videti poglavlje 1), na osnovu izraza (1.2) i (1.5) gustinu snage gubitaka možemo predstaviti u sledećem obliku

$$\frac{dP}{dV} = \omega \epsilon_0 \epsilon_r'' E^2. \quad (4.2)$$

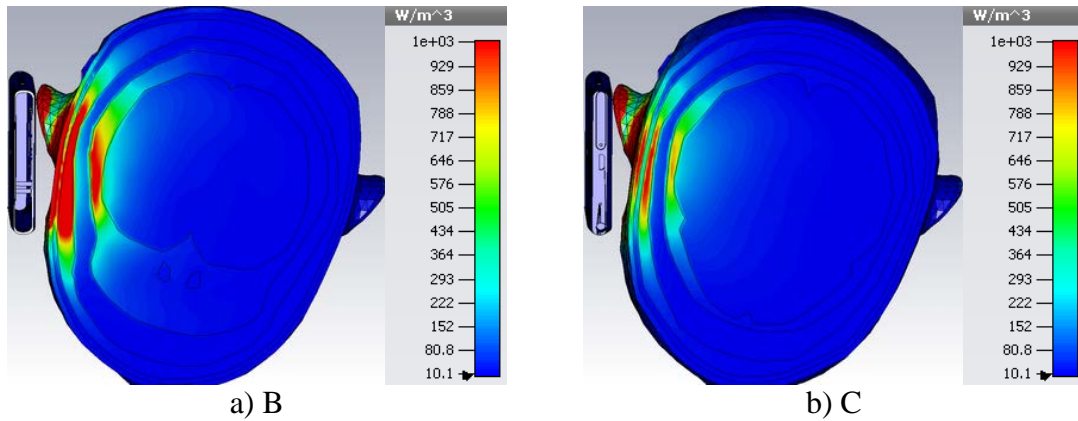
Na slici 4.36 dat je prikaz prostorne raspodele gustine snage gubitaka uz samu površinu modela glave deteta. Na slikama 4.37-4.39 data je raspodela gustine snage gubitaka unutar glave deteta za različite preseke.



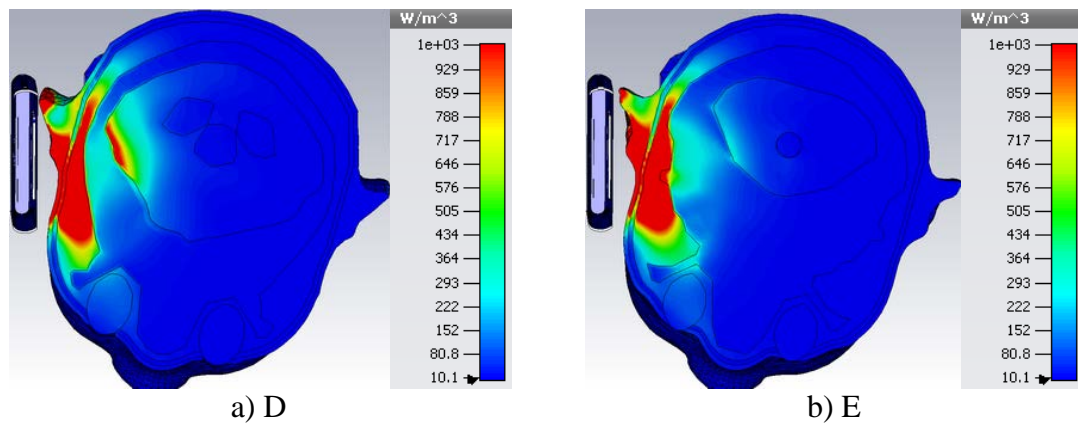
Slika 4.36 Raspodela gustine snage gubitaka uz samu površinu modela



Slika 4.37 Raspodela gustine snage gubitaka za presek A



Slika 4.38 Raspodela gustine snage gubitaka za preseke B i C



Slika 4.39 Raspodela gustine snage gubitaka za preseke D i E

Kao i pri prethodnim analizama raspodele polja i ovde je izvršeno podešavanje maksimalne vrednosti gustine snage gubitaka u paleti boja na određenu vrednost, u ovom slučaju na  $1000\text{W/m}^3$  radi bolje preglednosti (videti 4.1.1).

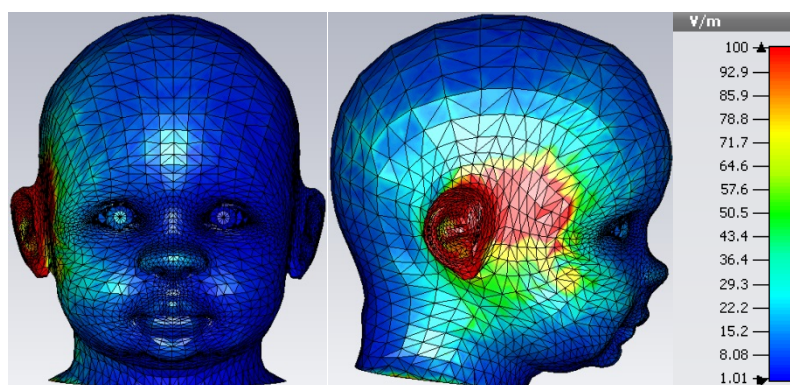
Na osnovu slika 4.37-4.39 vidimo da ne postoji konstantno opadanja vrednosti gustine snage gubitaka sa udaljavanjem od izvora kao kod prethodnih veličina, već nakon oblasti sa manjom gustinom snage gubitaka sledi oblast sa većom gustinom snage gubitaka i obratno.



## 4.2 Raspodela elektromagnetskog polja za $f = 1.8\text{GHz}$

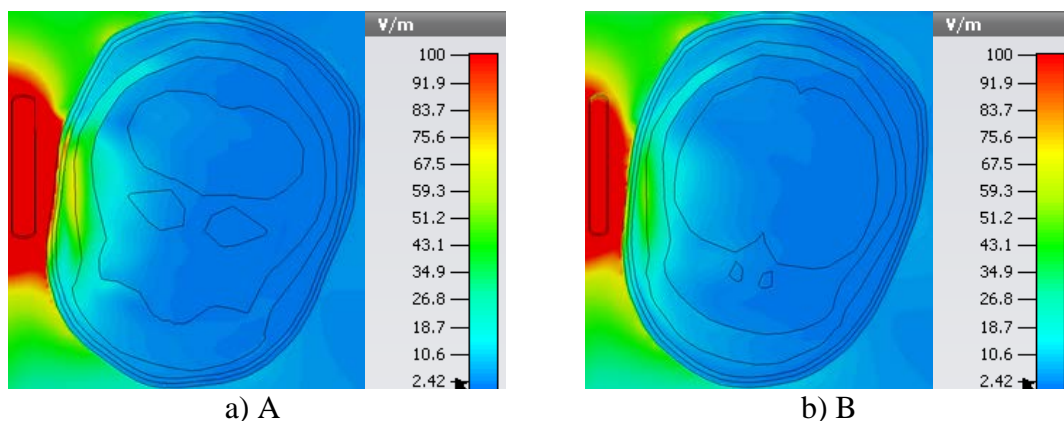
### 4.2.1 Vrednost intenziteta električnog polja za $f = 1.8\text{GHz}$

Na slici 4.40 data je vrednost intenziteta električnog polja po površini modela glave deteta. Oblast sa najvišim vrednostima intenziteta električnog polja odgovara oblasti u čijoj se blizini nalazi antena mobilnog telefona. I u ovom slučaju je izvršeno podešavanje vrednosti polja u paleti boja.

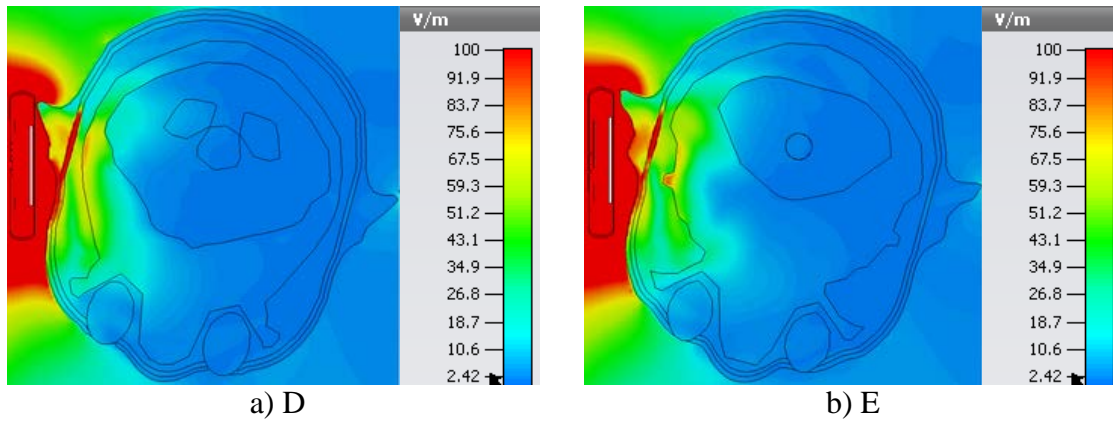


Slika 4.40 Vrednost intenziteta električnog polja  $E[\text{V/m}]$  po površini modela

Na slikama 4.41 i 4.42 data je vrednost intenziteta električnog polja unutar glave modela deteta za različite horizontalne preseke. Prema Pravilniku o granicama izlaganja nejonizujućim zračenjima (videti poglavlje 2.1.3) referentni granični nivo za električno polje na  $1.8\text{GHz}$  je  $23.3\text{V/m}$ . Sa slika se vidi da su vrednosti u pojedinim delovima glave deteta daleko iznad ove granice, i to nekoliko puta.



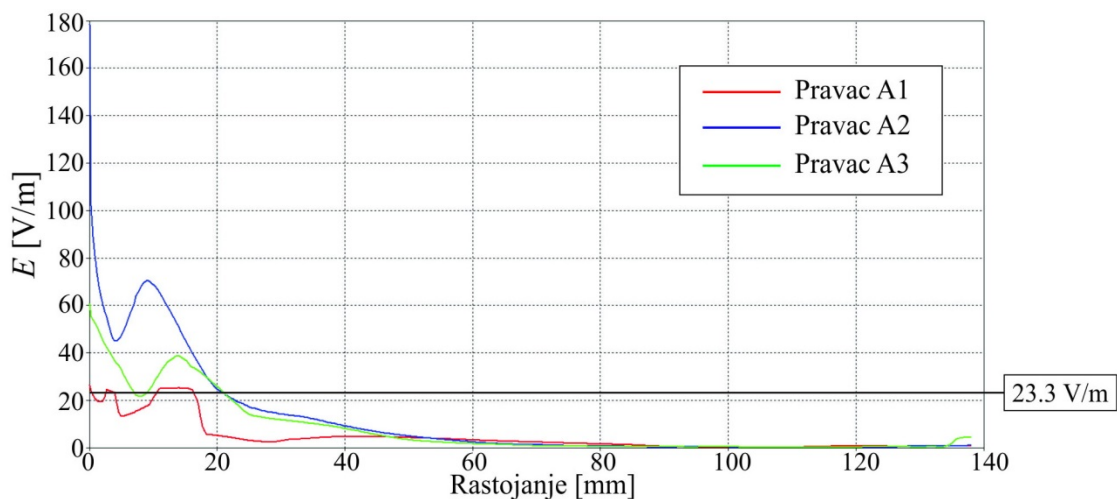
Slika 4.41 Vrednost intenziteta električnog polja za preseke A i B



Slika 4.42 Vrednost intenziteta električnog polja za preseke D i E

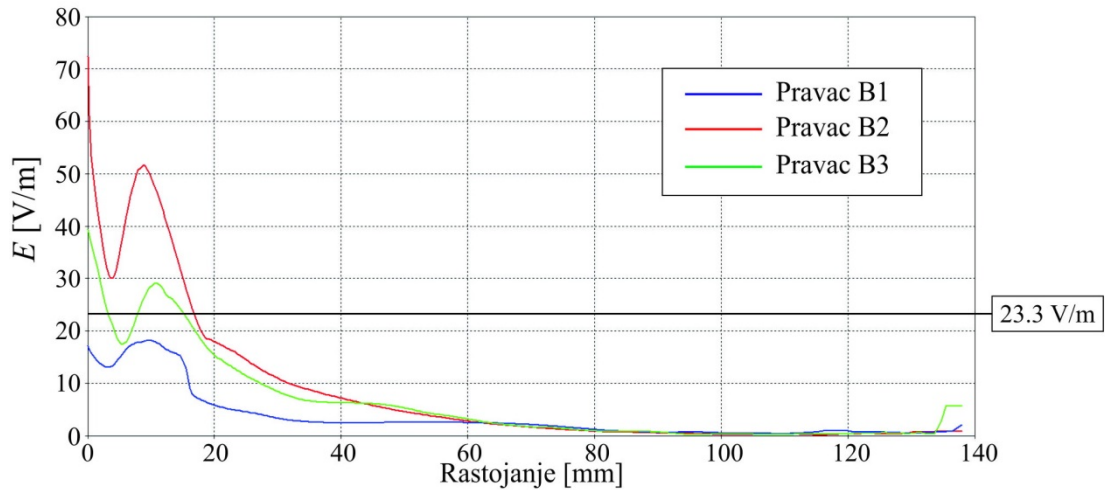
Vrednosti intenziteta električnog polja kao i dubina prodiranja elektromagnetskog talasa su veće u oblastima koje su bliže anteni mobilnog telefona. Vrednosti polja u glavi takođe zavise i od elektromagnetskih osobina tkiva/organa za datu frekvenciju nosećeg signala mobilnog telefona kao i graničnih uslova između dva tkiva/organa. Shodno tome sa slike 4.42, za preseke D i E mogu se primetiti oblasti sa većim intenzitetom električnog polja iako nisu najbliže izvoru zračenja.

Na slikama 4.43-4.46 prikazana je zavisnost vrednosti intenziteta električnog polja od rastojanja za pravce koji pripadaju razmatranim presecima.



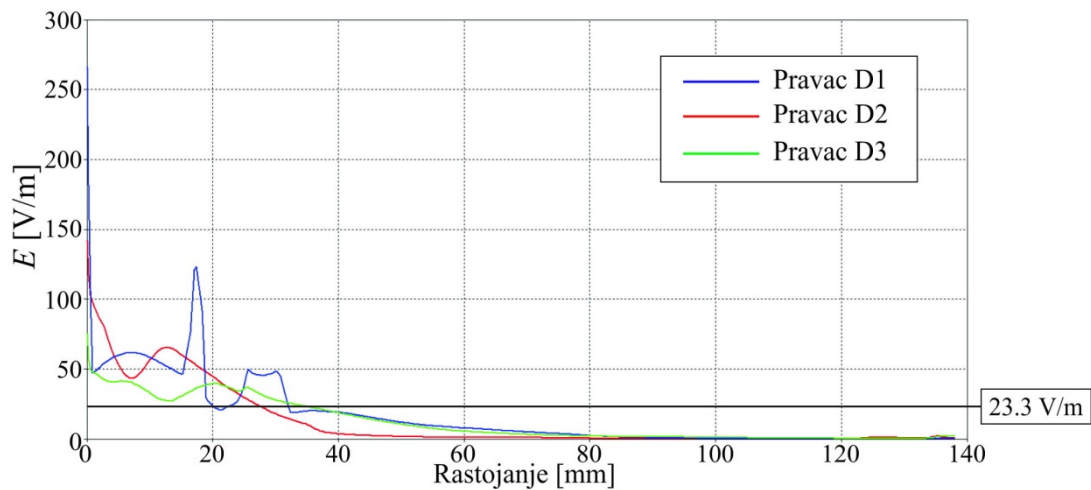
Slika 4.43 Grafik zavisnosti intenziteta električnog polja za presek A duž pravaca A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub> i A<sub>3</sub>

Na slici 4.43 data je vrednost intenziteta električnog polja duž pravaca A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub> i A<sub>3</sub>. Možemo videti da je najviša vrednost električnog polja duž pravca A<sub>1</sub> čak 180V/m na ulazu u glavu deteta i da vrednost polja pada na vrednost ispod referentnog graničnog nivoa tek na 23mm od početka. Dakle, možemo zaključiti da su u površinskim slojevima glave prisutne izuzetno visoke vrednosti električnog polja, daleko iznad onih propisanih standardom.

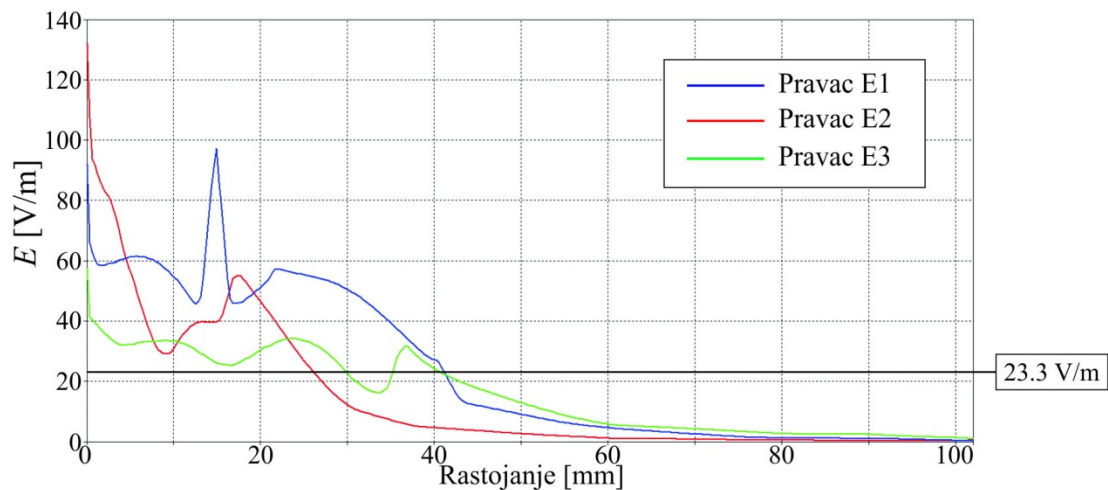


Slika 4.44 Grafik zavisnosti intenziteta električnog polja za presek B duž pravaca B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub> i B<sub>3</sub>

Kod preseka B primetne su nešto niže vrednosti polja, od oko 73V/m na ulazu, 52V/m na 10mm do oko 20V/m na 18mm. Na oko 80mm te vrednosti postaju gotovo zanemarljive.



Slika 4.45 Grafik zavisnosti intenziteta električnog polja za presek D duž pravaca D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub> i D<sub>3</sub>

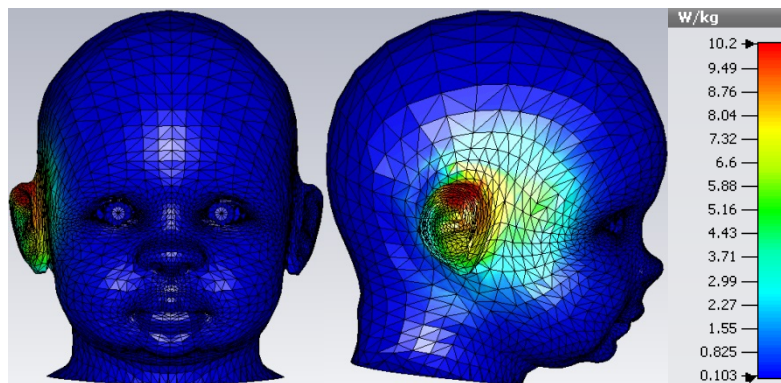


Slika 4.46 Grafik zavisnosti intenziteta električnog polja za presek E duž pravaca E<sub>1</sub>, E<sub>2</sub> i E<sub>3</sub>

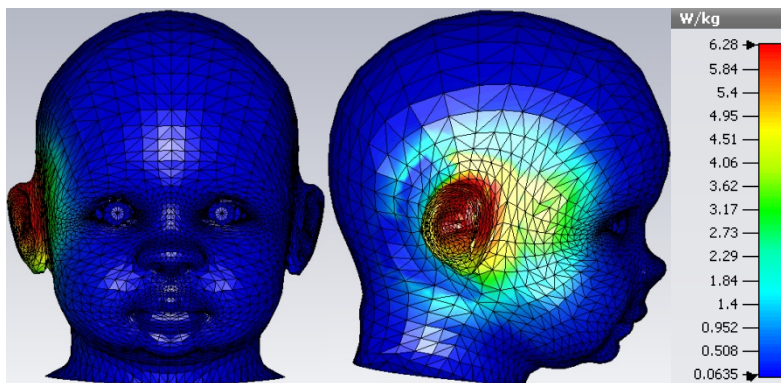
Za preseke D i E prisutne su izuzetno visoke vrednosti polja na ulazu u glavu od 132V/m za E do čak 260V/m za D. I kod preseka D i kod preseka E vrednost polja tek na oko 40mm pada na 20V/m, na 60mm je 5V/m a na 100mm postaje zanemarljiva.

#### 4.2.2 Raspodela $SAR_{1g}$ i $SAR_{10g}$ za $f = 1.8\text{GHz}$

Na slikama 4.47 i 4.48 dat je prikaz prostorne raspodele  $SAR_{1g}$  i  $SAR_{10g}$  i njihova maksimalna vrednost uz samu površinu modela glave deteta.

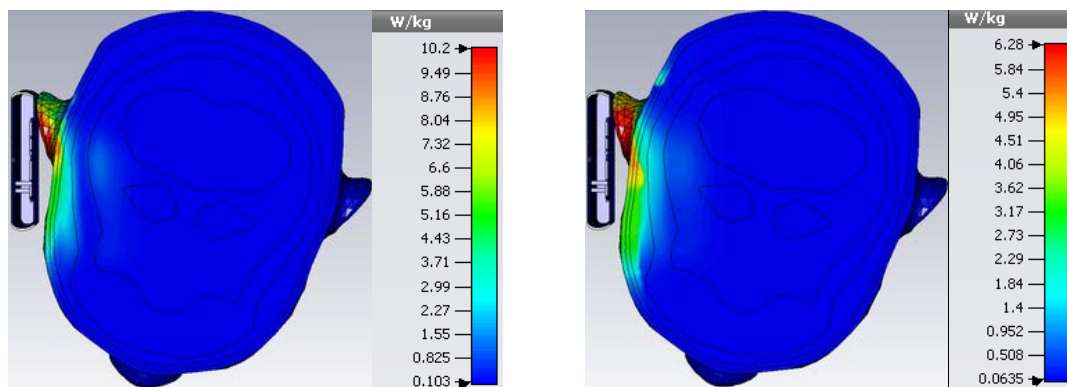


Slika 4.47 Raspodela  $SAR_{1g}$  uz samu površinu modela



Slika 4.48 Raspodela  $SAR_{10g}$  uz samu površinu modela

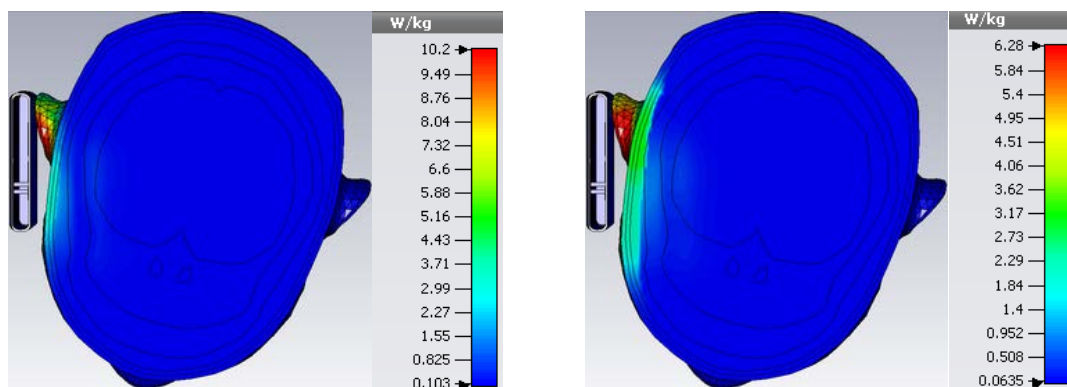
Na osnovu datih vrednosti za  $SAR_{1g}$  i  $SAR_{10g}$  vidimo da su maksimalne vrednosti znatno iznad bazičnih ograničenja za SAR. Na slikama 4.49-4.52 data je raspodela  $SAR_{1g}$  i  $SAR_{10g}$  unutar glave deteta za različite preseke.



a) SAR<sub>1g</sub>

b) SAR<sub>10g</sub>

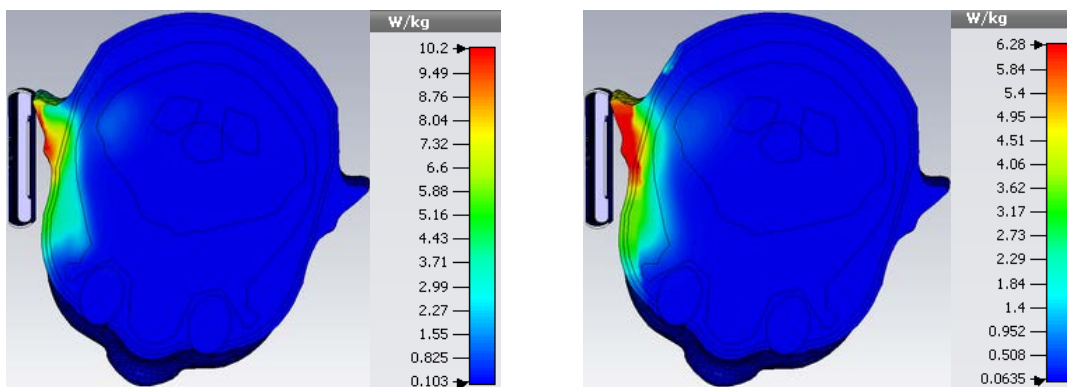
Slika 4.49 Raspodela SAR<sub>1g</sub> i SAR<sub>10g</sub> za horizontalni presek A



a) SAR<sub>1g</sub>

b) SAR<sub>10g</sub>

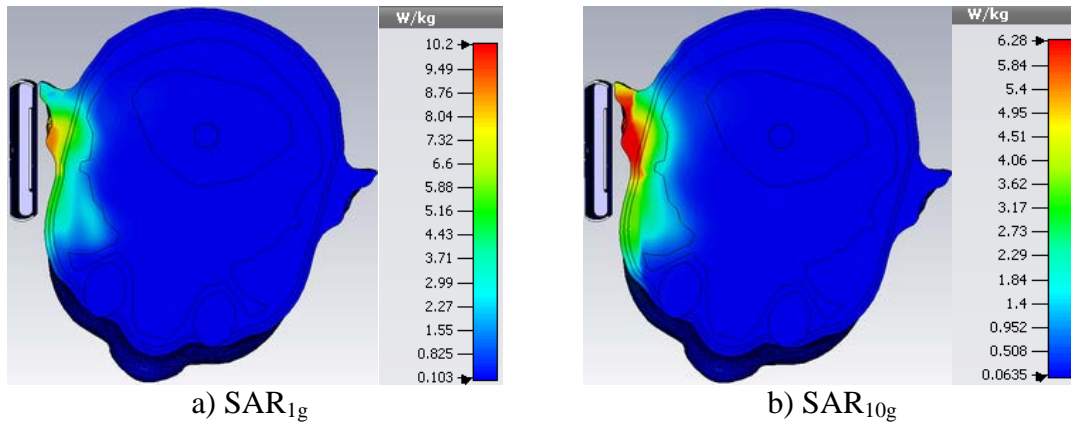
Slika 4.50 Raspodela SAR<sub>1g</sub> i SAR<sub>10g</sub> za horizontalni presek B



a) SAR<sub>1g</sub>

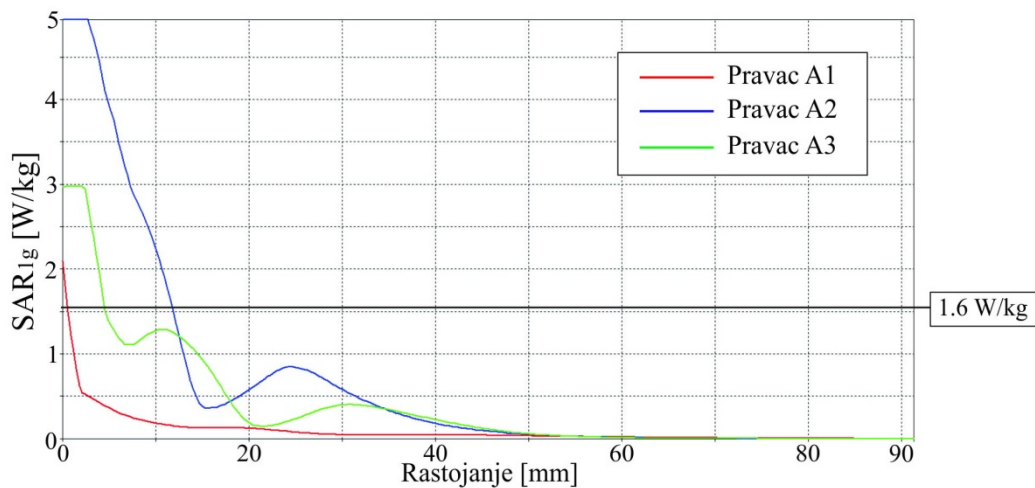
b) SAR<sub>10g</sub>

Slika 4.51 Raspodela SAR<sub>1g</sub> i SAR<sub>10g</sub> za horizontalni presek D

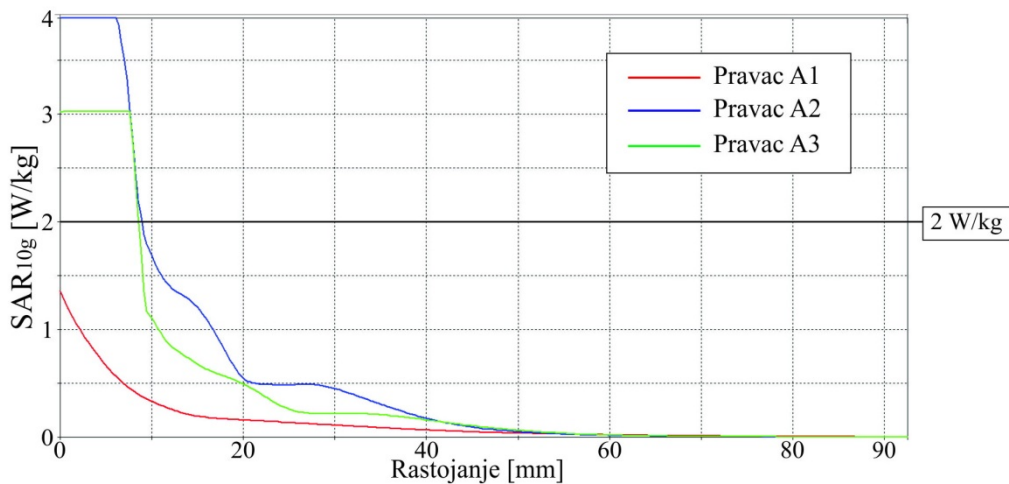


Slika 4.52 Raspodela SAR<sub>1g</sub> i SAR<sub>10g</sub> za horizontalni presek E

Sa slika je evidentno da su bazična ograničenja premašena u površinskim slojevima, prvenstveno u koži, masnom tkivu i mišićima. Te vrednosti idu do 10.2W/kg za SAR<sub>1g</sub> i 6.28W/kg za SAR<sub>10g</sub>. Na slikama 4.53-4.60 data je zavisnost vrednosti SAR<sub>1g</sub> i SAR<sub>10g</sub> od rastojanja za različite preseke.

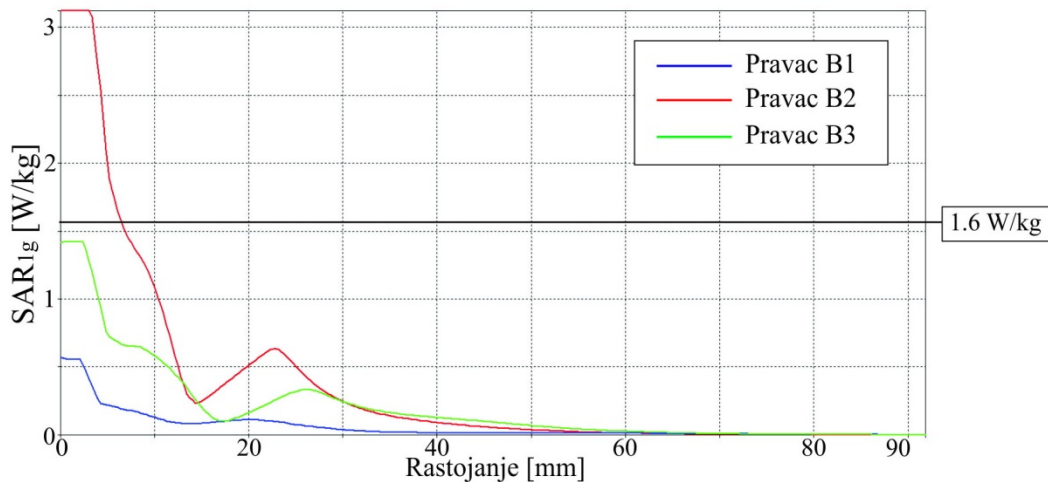


Slika 4.53 Grafik raspodele SAR<sub>1g</sub> za presek A duž pravaca A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub> i A<sub>3</sub>

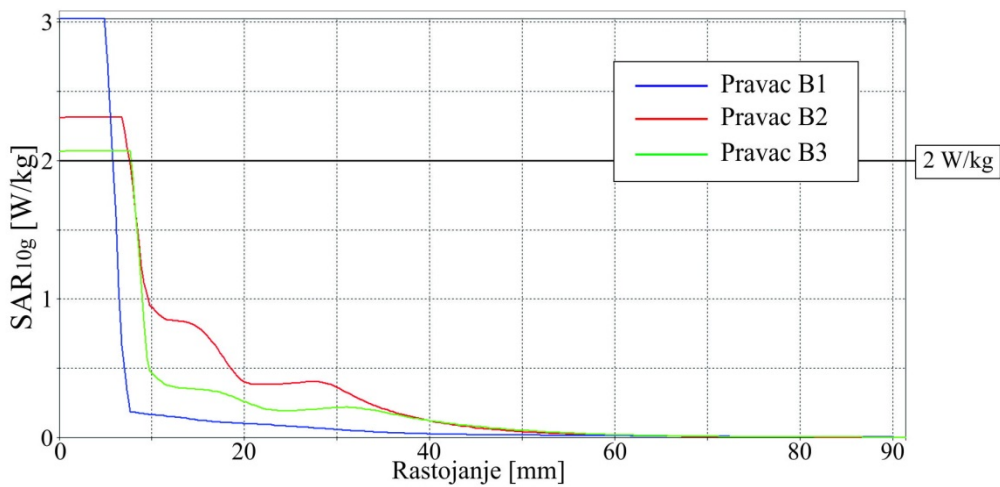


Slika 4.54 Grafik raspodele SAR<sub>10g</sub> za presek A duž pravaca A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub> i A<sub>3</sub>

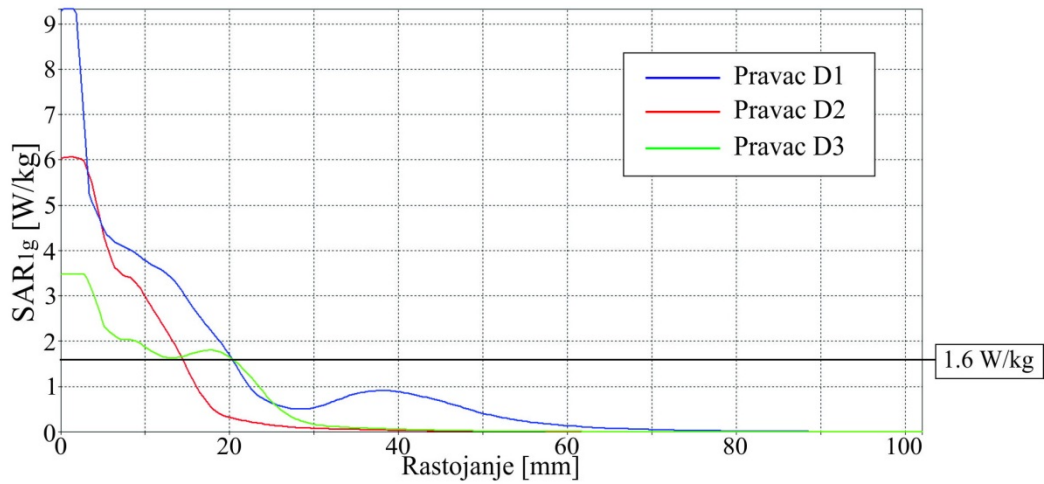
Za presek A, maksimalna vrednost za  $SAR_{1g}$  je oko 3 puta viša od bazičnog ograničenja dok je kod  $SAR_{10g}$  to oko 2 puta. Kod oba SAR visoke vrednosti su prisutne u tkivima do dubine od 10mm nakon čega vrednost pada ispod  $2W/kg$ . Nakon 50mm te vrednosti postaju zanemarljivo male ili gotovo jednake nuli, što znači da do ove dubine dolazi do gotovo potpunog apsorbovanja elektromagnetske energije.



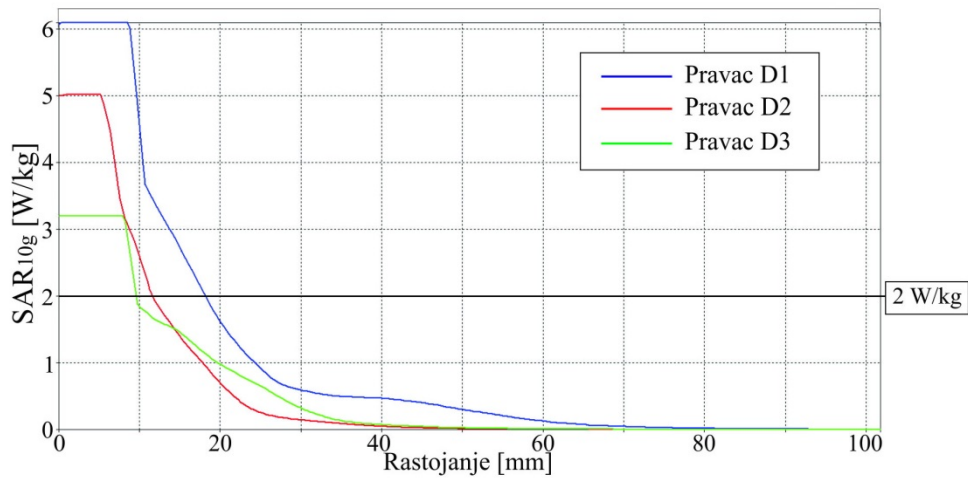
Slika 4.55 Grafik raspodele  $SAR_{1g}$  za presek B duž pravaca  $B_1$ ,  $B_2$  i  $B_3$



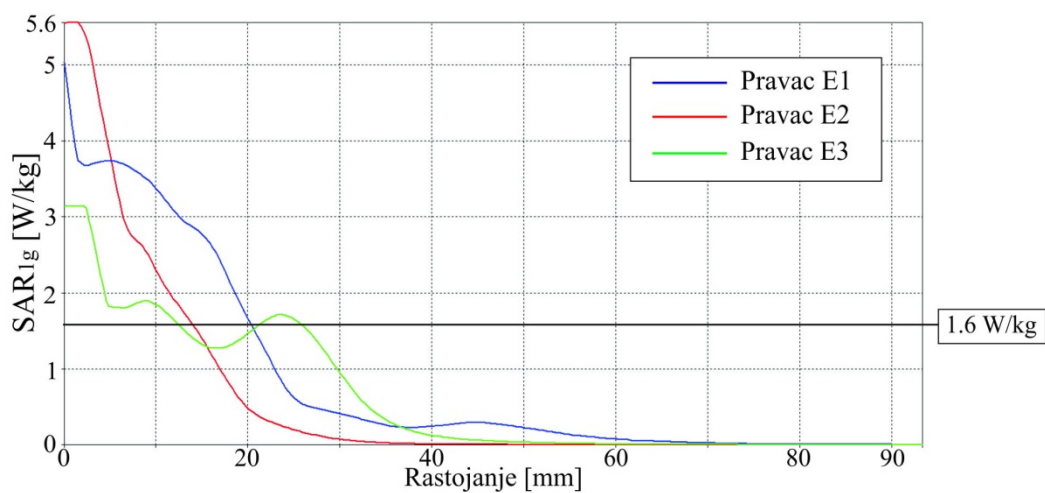
Slika 4.56 Grafik raspodele  $SAR_{10g}$  za presek B duž pravaca  $B_1$ ,  $B_2$  i  $B_3$



Slika 4.57 Grafik raspodele SAR<sub>1g</sub> za presek D duž pravaca D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub> i D<sub>3</sub>

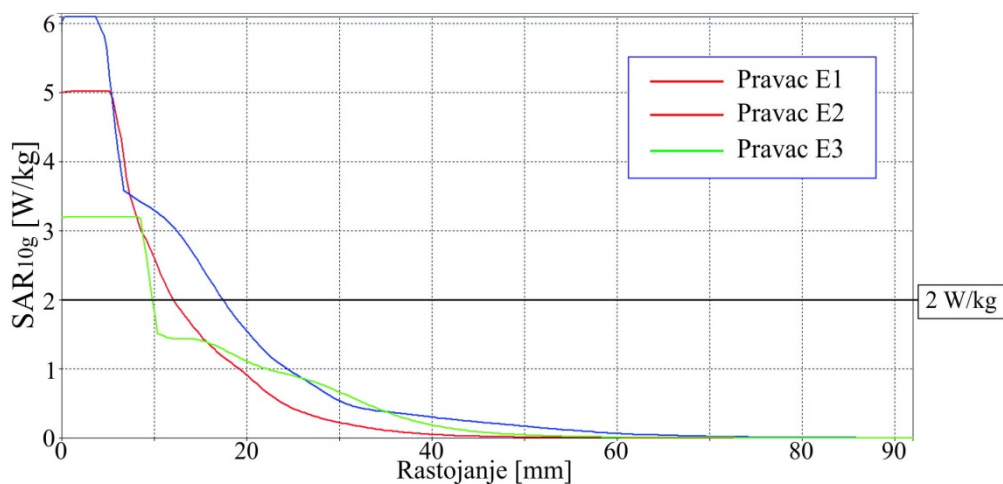


Slika 4.58 Grafik raspodele SAR<sub>10g</sub> za presek D duž pravaca D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub> i D<sub>3</sub>



Slika 4.59 Grafik raspodele SAR<sub>1g</sub> za presek E duž pravaca E<sub>1</sub>, E<sub>2</sub> i E<sub>3</sub>





Slika 4.60 Grafik raspodele SAR<sub>10g</sub> za presek E duž pravaca E<sub>1</sub>, E<sub>2</sub> i E<sub>3</sub>

Za presek B, maksimalna vrednost za SAR<sub>1g</sub> je oko 2 puta viša od bazičnog ograničenja dok je kod SAR<sub>10g</sub> to oko 1.5 puta. Kod oba SAR visoke vrednosti su prisutne u tkivima do dubine od 7mm nakon čega vrednost pada ispod 2W/kg. Kao i za presek A, nakon 50mm te vrednosti postaju zanemarljivo male ili gotovo jednake nuli.

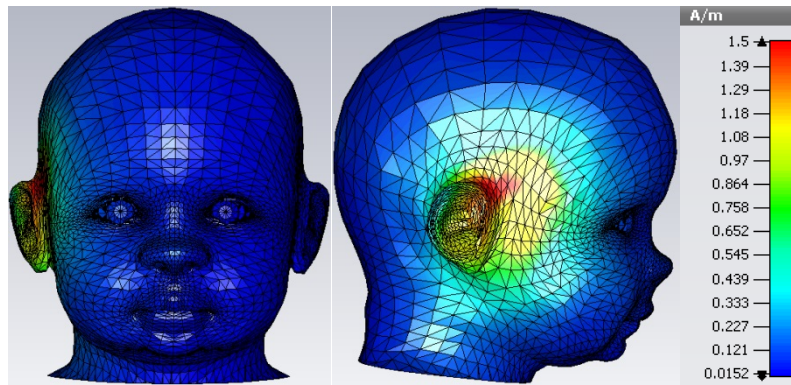
Za presek D, maksimalna vrednost za SAR<sub>1g</sub> je izuzetno visoka i do gotovo 6 puta viša od bazičnog ograničenja dok je kod SAR<sub>10g</sub> to oko 3 puta. Kod oba SAR visoke vrednosti su prisutne u tkivima do dubine od oko 18mm nakon čega vrednost pada ispod 2W/kg, dok im vrednosti nakon 65mm postaju zanemarljivo male ili gotovo jednake nuli.

Za presek E, maksimalne vrednosti za SAR<sub>1g</sub> i SAR<sub>10g</sub> su oko 3.5 puta više od vrednosti bazičnih ograničenja. Visoke vrednosti, iznad 2W/kg su prisutne u tkivima do dubine od oko 18mm nakon čega im vrednosti padaju ispod ove granice i na oko 60mm postaju zanemarljivo male ili gotovo jednake nuli.

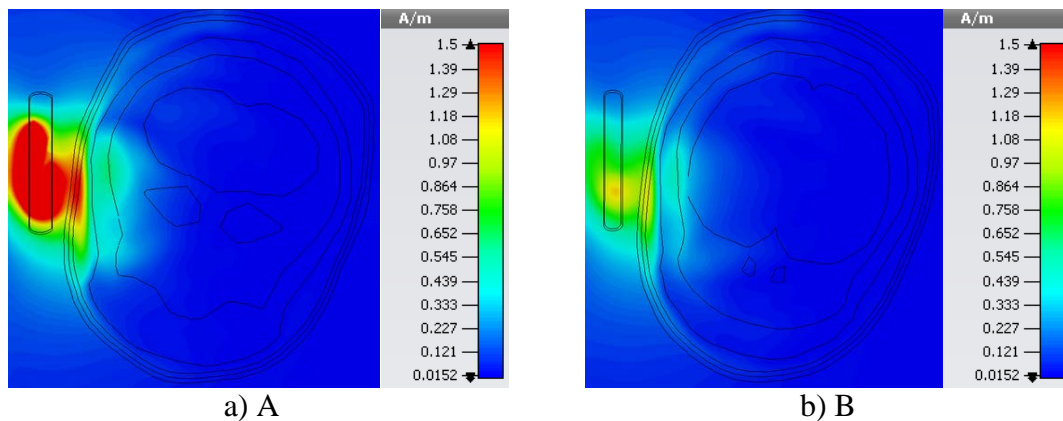
Ono što je evidentno, za presek D su prisutne izuzetno visoke vrednosti za SAR u površinskim slojevima glave deteta kada telefon radi sa maksimalnom snagom od 1W.

#### 4.2.3 Vrednost jačine magnetskog polja za $f = 1.8\text{GHz}$

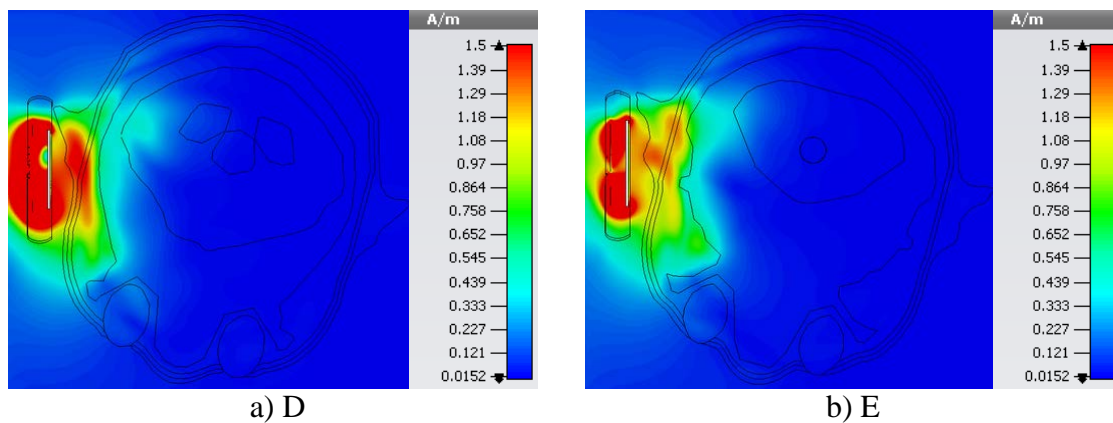
Na slici 4.61 date su vrednosti jačine magnetskog polja na površini modela glave deteta. Na slikama 4.62 i 4.63 date su vrednosti jačine magnetskog polja unutar glave deteta za različite preseke.



Slika 4.61 Jačina magnetskog polja  $H$  [A/m] po površini modela



Slika 4.62 Jačina magnetskog polja za preseke A i B

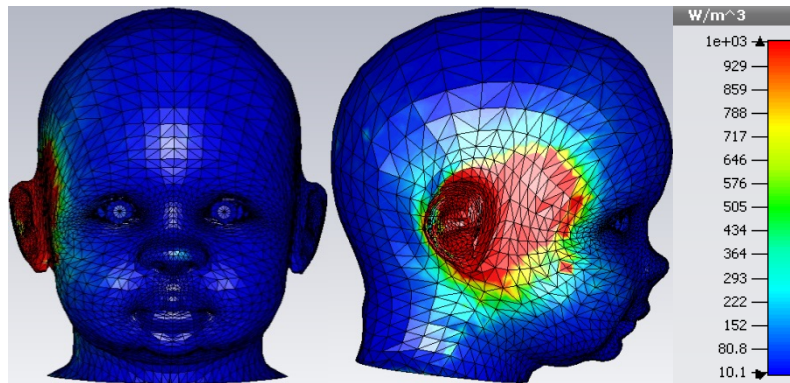


Slika 4.63 Jačina magnetskog polja za preseke D i E

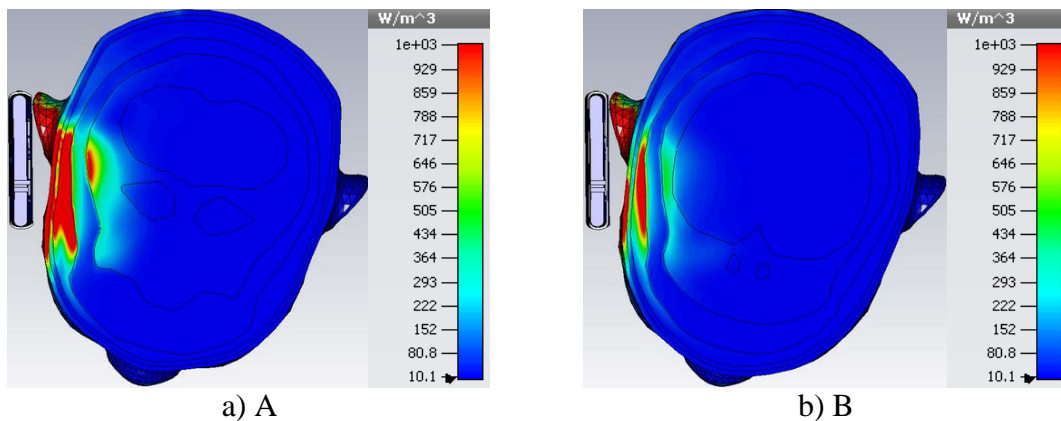
Maksimalna vrednost polja je podešena na  $1.5\text{A/m}$  radi preglednosti i lakše uočljivosti razlike u raspodeli polja. Budući da je referentni granični nivo za jačinu magnetskog polja približno  $0.063\text{A/m}$  za  $1.8\text{GHz}$ , vidimo da je ova vrednost premašena u velikom delu glave deteta. Kod preseka A, D i E prisutne su visoke vrednosti magnetskog polja u koži, masnom tkivu i mišićima.

#### 4.2.4 Raspodela gustine snage gubitaka za $f = 1.8\text{GHz}$

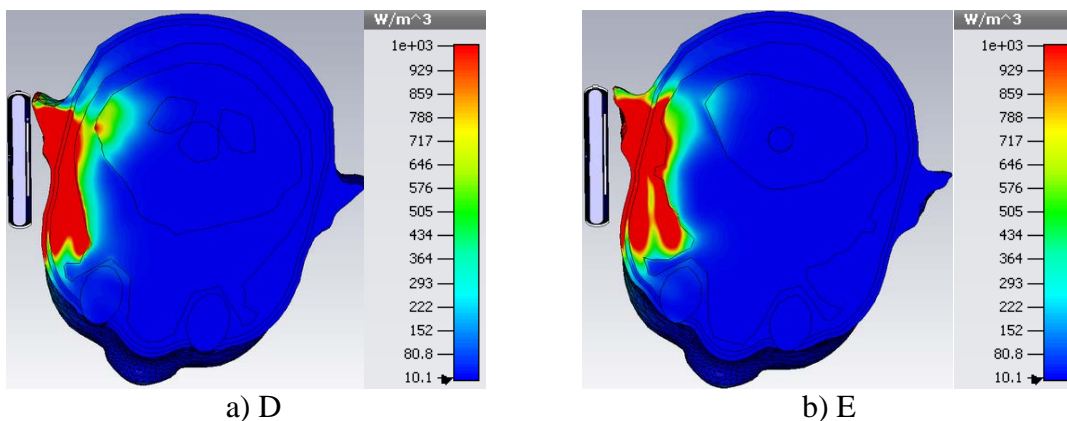
Na slici 4.64 dat je prikaz prostorne raspodele gustine snage gubitaka uz samu površinu modela glave deteta. Na slikama 4.65 i 4.66 data je raspodela gustine snage gubitaka unutar glave deteta za različite preseke.



Slika 4.64 Raspodela gustine snage gubitaka uz samu površinu modela



Slika 4.65 Raspodela gustine snage gubitaka za preseke A i B



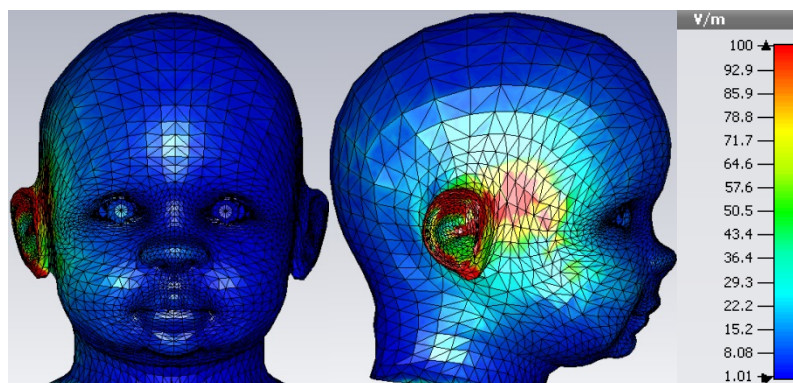
Slika 4.66 Raspodela gustine snage gubitaka za preseke D i E

Na osnovu slika 4.65 i 4.66 vidimo da su u određenim oblastima prisutne velike vrednosti gustine snage gubitaka. To je svakako najviše izraženo za preseke D i E.

### 4.3 Raspodela elektromagnetskog polja za $f = 2.1\text{GHz}$

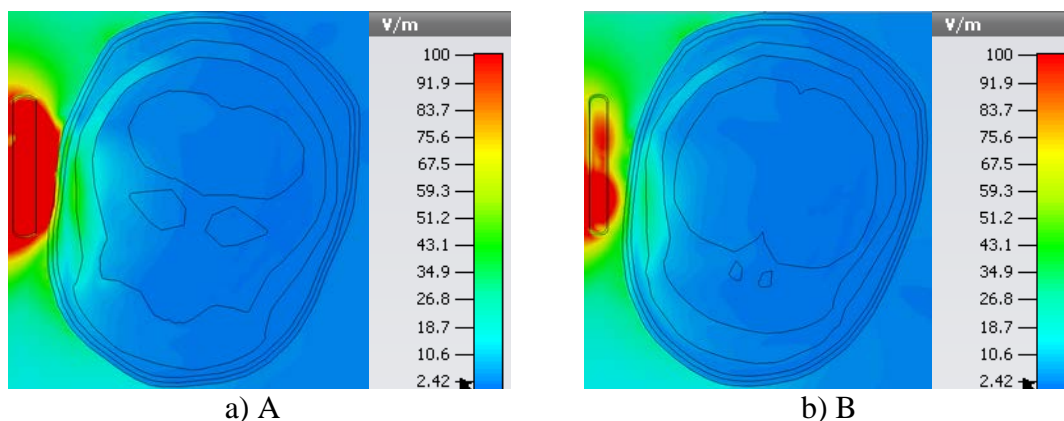
#### 4.3.1 Vrednost intenziteta električnog polja za $f = 2.1\text{GHz}$

Na slici 4.67 data je vrednost intenziteta električnog polja po površini modela glave deteta. Oblast sa najvišim vrednostima električnog polja odgovara oblasti gde se nalazi antena mobilnog telefona. I u slučaju emitovanja telefona na frekvenciji od 2.1GHz izvršeno je podešavanje vrednosti polja u paleti boja.

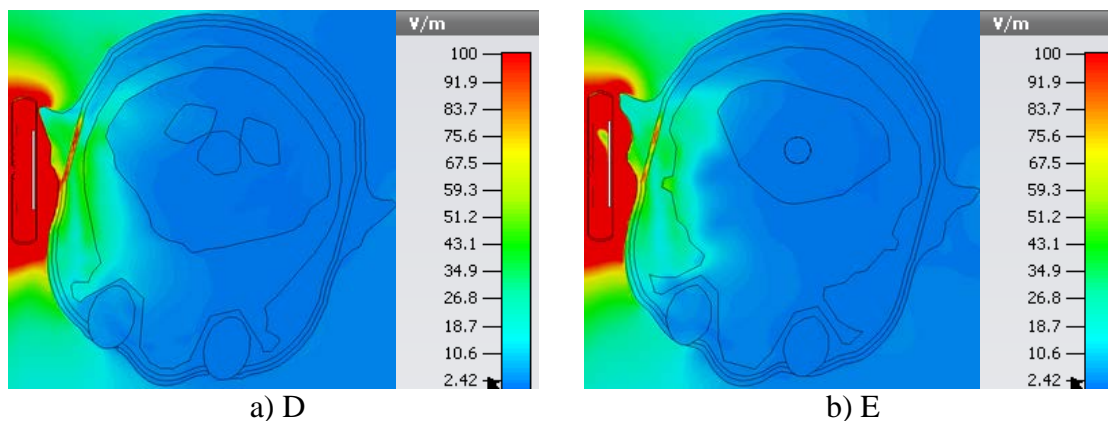


Slika 4.67 Vrednost intenziteta električnog polja  $E[\text{V/m}]$  po površini modela

Na slikama 4.68 i 4.69 data je vrednost intenziteta električnog polja unutar glave modela deteta za različite horizontalne preseke. Prema Pravilniku o granicama izlaganja nejonizujućim zračenjima (videti poglavlje 2.1.3) referentni granični nivo za električno polje na 2.1GHz je 24.4V/m. Sa slika se vidi da su vrednosti u pojedinim delovima glave deteta daleko iznad ove granice.



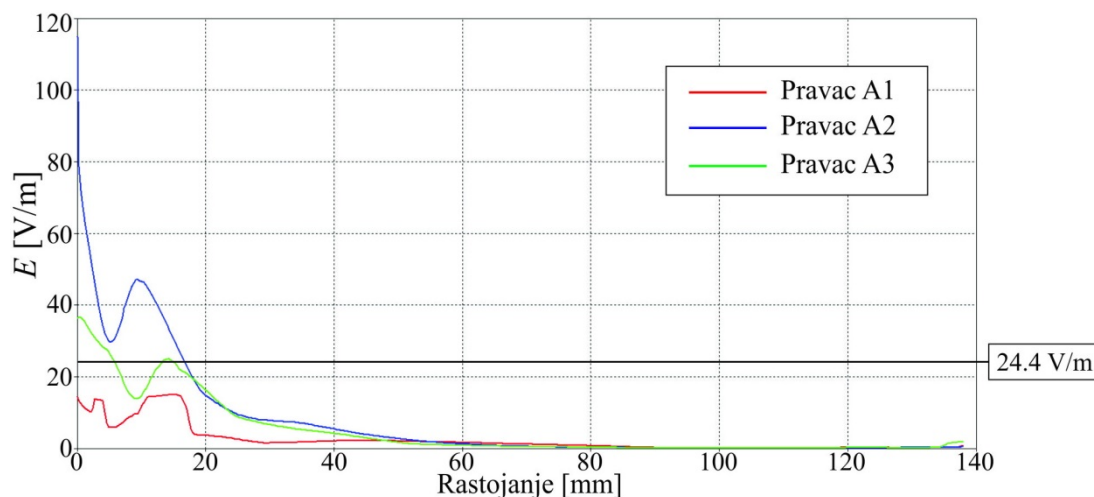
Slika 4.68 Vrednost intenziteta električnog polja za preseke A i B



Slika 4.69 Vrednost intenziteta električnog polja za preseke D i E

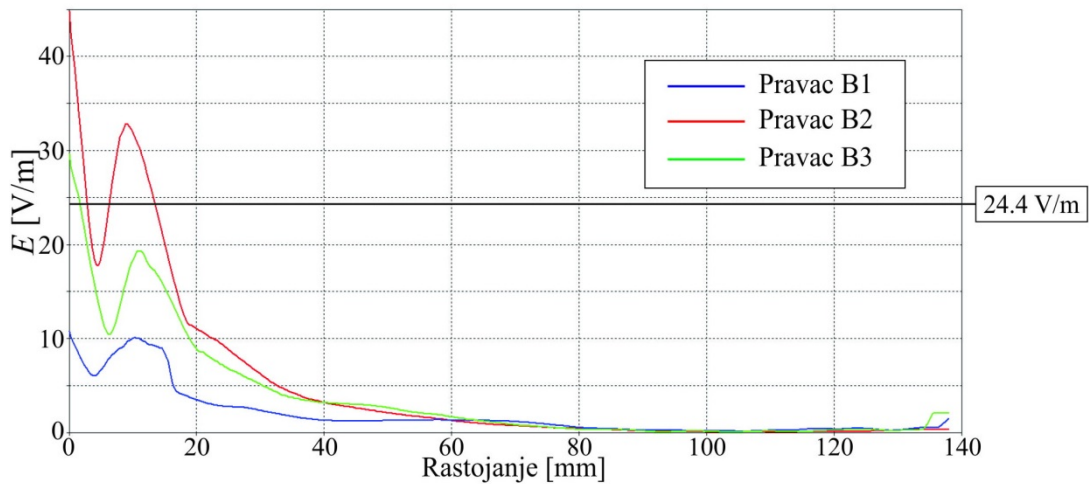
Sa prethodnih slika može se primetiti da je jačina polja unutar glave, a samim tim i dubina prodiranja polja na frekvenciji 2.1GHz manja nego u slučaju 0.9GHz i 1.8GHz. Kao i u slučaju drugih frekvencija i ovde se javljaju „vruće tačke“ (oblasti u kojima su vrednosti polja značajno veće u odnosu na vrednosti u oblasti koje ih okružuju) u unutrašnjosti modela ali su te vrednosti niže nego u slučaju 0.9GHz i 1.8GHz.

Na slikama 4.70-4.73 prikazana je zavisnost vrednosti električnog polja od rastojanja za pravce koji pripadaju različitim presecima.



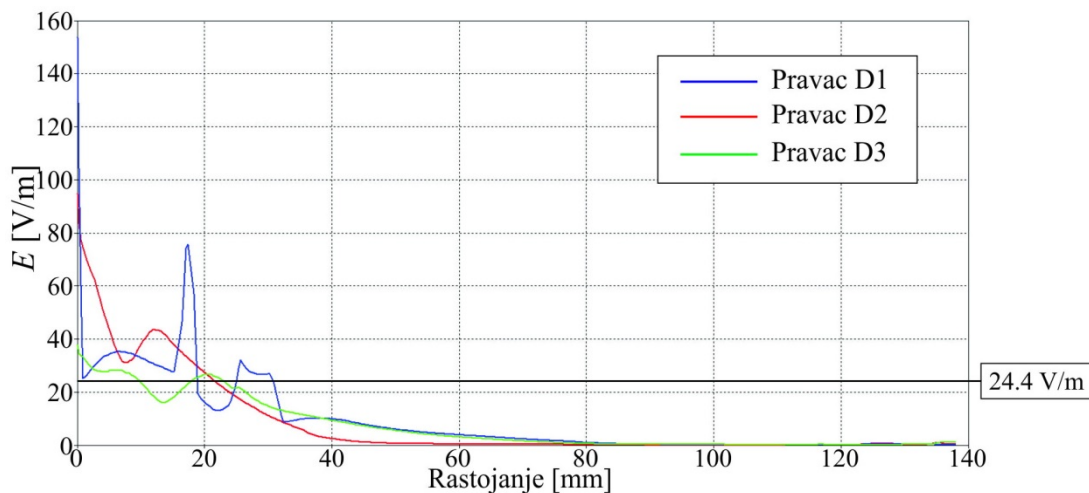
Slika 4.70 Grafik zavisnosti intenziteta električnog polja za presek A duž pravaca A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub> i A<sub>3</sub>

Na slici 4.70 data je vrednost intenziteta električnog polja duž pravaca A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub> i A<sub>3</sub>. Možemo videti da je najviša vrednost intenziteta električnog polja na liniji A<sub>1</sub> 118V/m na ulazu u glavu deteta i da vrednost intenziteta električnog polja na 17mm od početka pravca pada ispod referentnog graničnog nivoa. Dakle, možemo zaključiti da su u površinskim slojevima glave prisutne izuzetno visoke vrednosti intenziteta električnog polja.

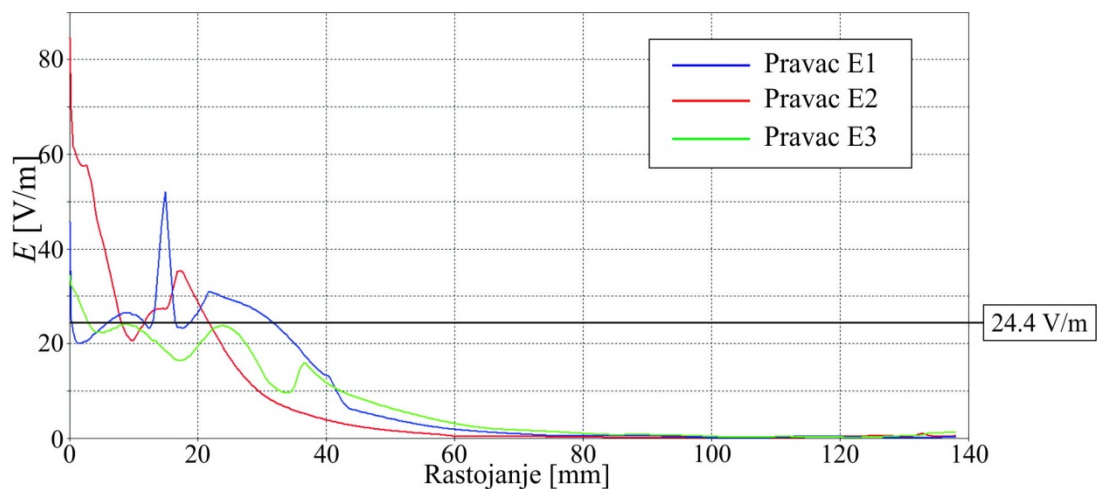


Slika 4.71 Grafik zavisnosti intenziteta električnog polja za presek B duž pravaca B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub> i B<sub>3</sub>

Kod preseka B primetne su nešto niže vrednosti polja, od oko 50V/m na ulazu, 33V/m na 10mm do oko 12V/m na 20mm. Na oko 80mm te vrednosti postaju gotovo zanemarljive.



Slika 4.72 Grafik zavisnosti intenziteta električnog polja za presek D duž pravaca D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub> i D<sub>3</sub>

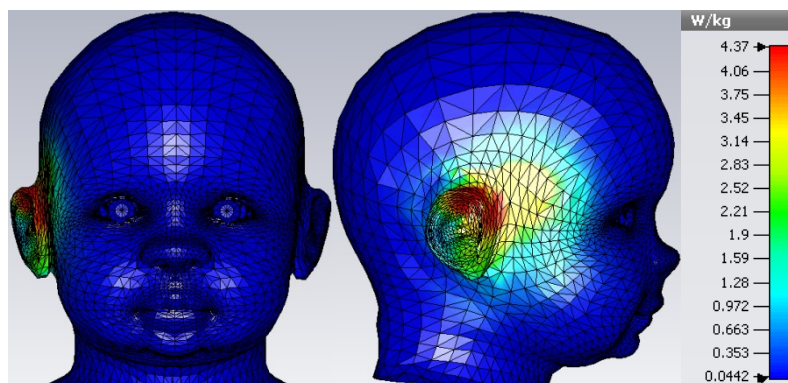


Slika 4.73 Grafik zavisnosti intenziteta električnog polja za presek E duž pravaca E<sub>1</sub>, E<sub>2</sub> i E<sub>3</sub>

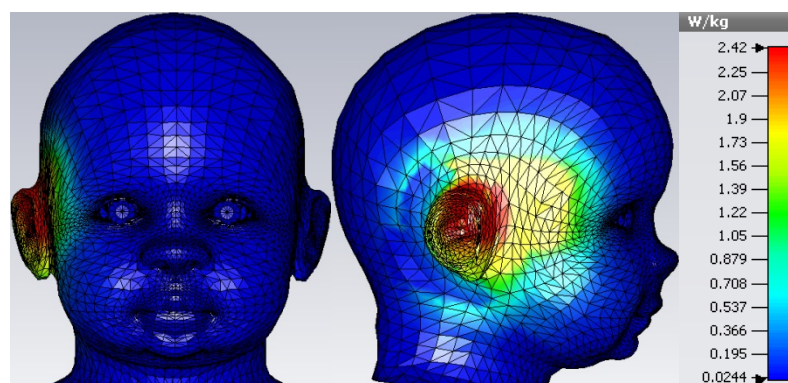
Za preseke D i E prisutne su izuzetno visoke vrednosti intenziteta električnog polja na ulazu u glavu od 85V/m za presek E do 155V/m za presek D. I kod preseka D vrednost intenziteta električnog polja tek na oko 30mm pada na 20V/m dok je kod preseka E to na oko 35mm. Na 40mm je intenzitet električnog polja oko 10V/m a na 80mm postaje zanemarljiv.

#### 4.3.2 Raspodela SAR<sub>1g</sub> i SAR<sub>10g</sub> za $f = 2.1\text{GHz}$

Na slikama 4.74 i 4.75 dat je prikaz prostorne raspodele SAR<sub>1g</sub> i SAR<sub>10g</sub> i njihova maksimalna vrednost uz samu površinu modela glave deteta. Na slikama 4.76-4.79 data je raspodela SAR<sub>1g</sub> i SAR<sub>10g</sub> unutar glave deteta za različite preseke.

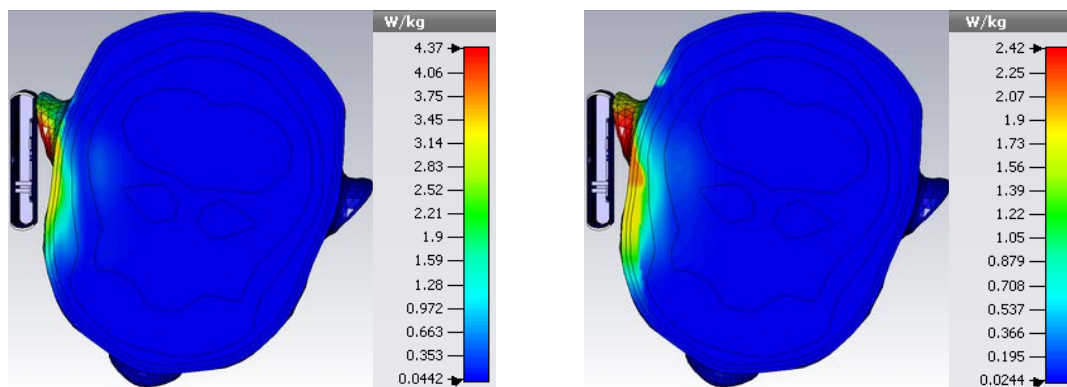


Slika 4.74 Raspodela SAR<sub>1g</sub> uz samu površinu modela



Slika 4.75 Raspodela SAR<sub>10g</sub> uz samu površinu modela

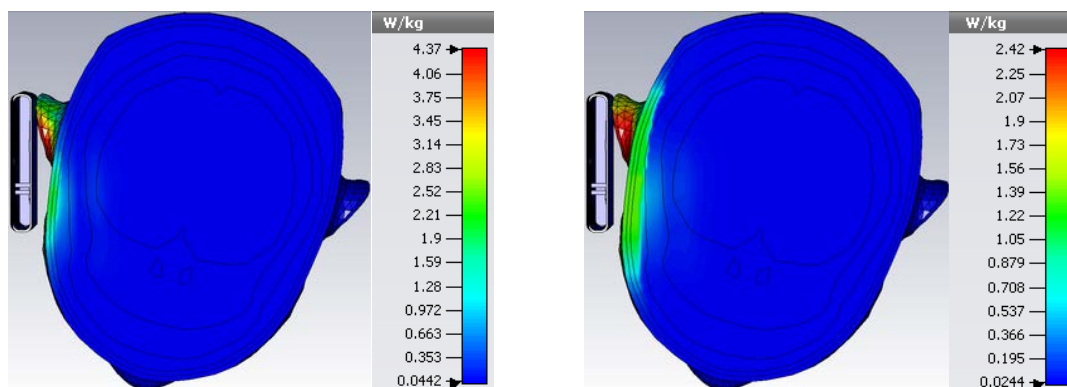
Na osnovu datih vrednosti u labeli boja za SAR<sub>1g</sub> i SAR<sub>10g</sub> vidimo da su maksimalne vrednosti znatno iznad bazičnih ograničenja za SAR.



a) SAR<sub>1g</sub>

b) SAR<sub>10g</sub>

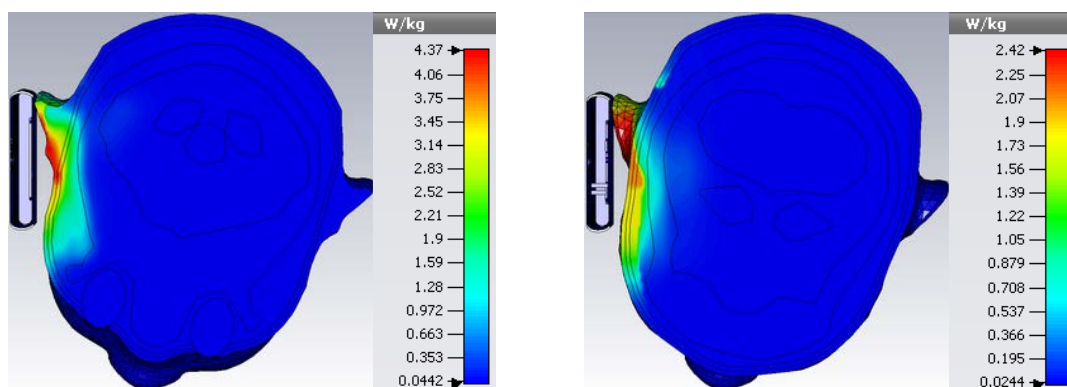
Slika 4.76 Raspodela SAR<sub>1g</sub> i SAR<sub>10g</sub> za horizontalni presek A



a) SAR<sub>1g</sub>

b) SAR<sub>10g</sub>

Slika 4.77 Raspodela SAR<sub>1g</sub> i SAR<sub>10g</sub> za horizontalni presek B

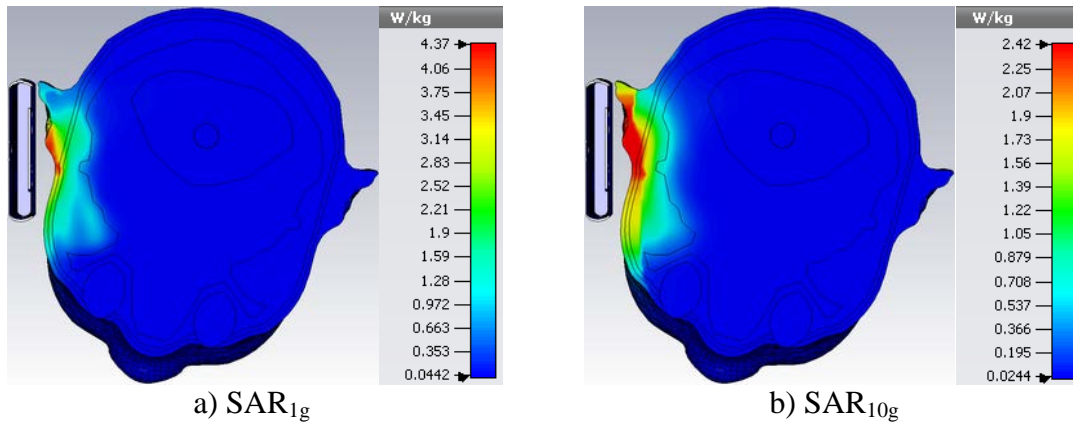


a) SAR<sub>1g</sub>

b) SAR<sub>10g</sub>

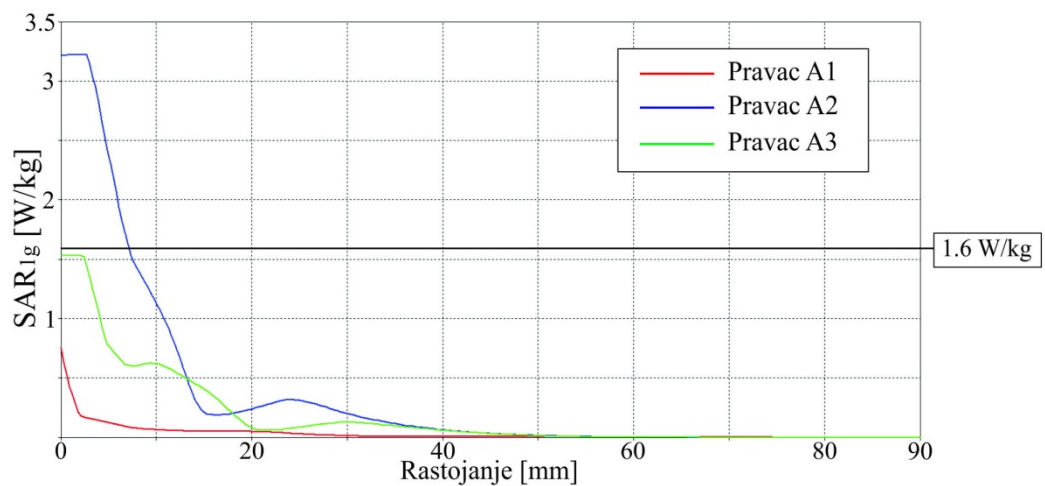
Slika 4.78 Raspodela SAR<sub>1g</sub> i SAR<sub>10g</sub> za horizontalni presek D



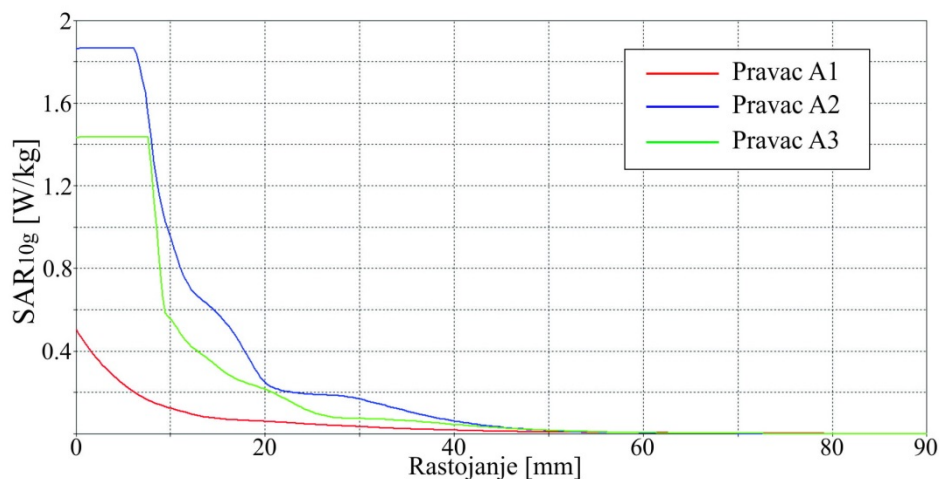


Slika 4.79 Raspodela SAR<sub>1g</sub> i SAR<sub>10g</sub> za horizontalni presek E

Sa slika je evidentno da su bazična ograničenja premašena u površinskim slojevima, prvenstveno u koži, masnom tkivu i mišićima. Te vrednosti idu do 4.37W/kg za SAR<sub>1g</sub> i 2.42W/kg za SAR<sub>10g</sub>. Na slikama 4.80-4.87 data je zavisnost vrednosti SAR<sub>1g</sub> i SAR<sub>10g</sub> od rastojanja za različite preseke.

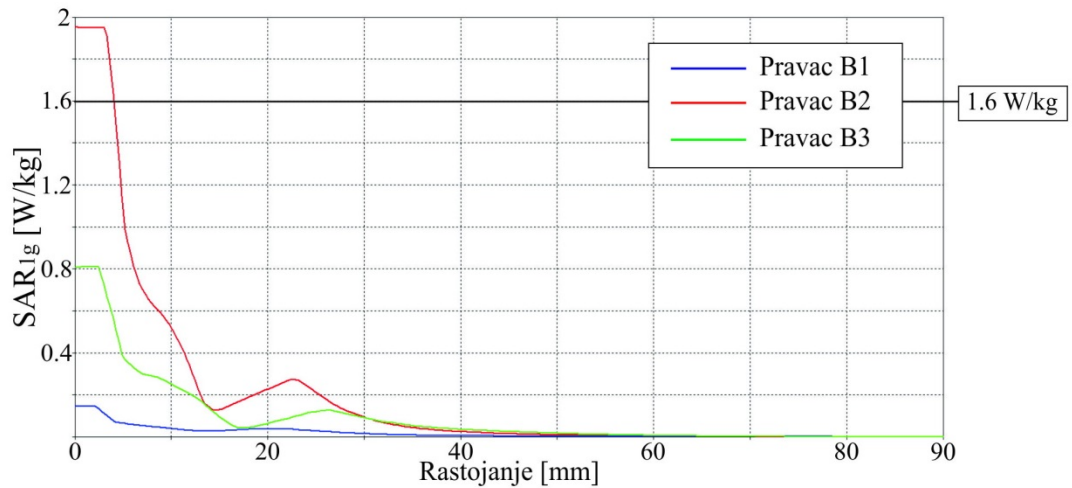


Slika 4.80 Grafik raspodele SAR<sub>1g</sub> za presek A duž pravaca A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub> i A<sub>3</sub>

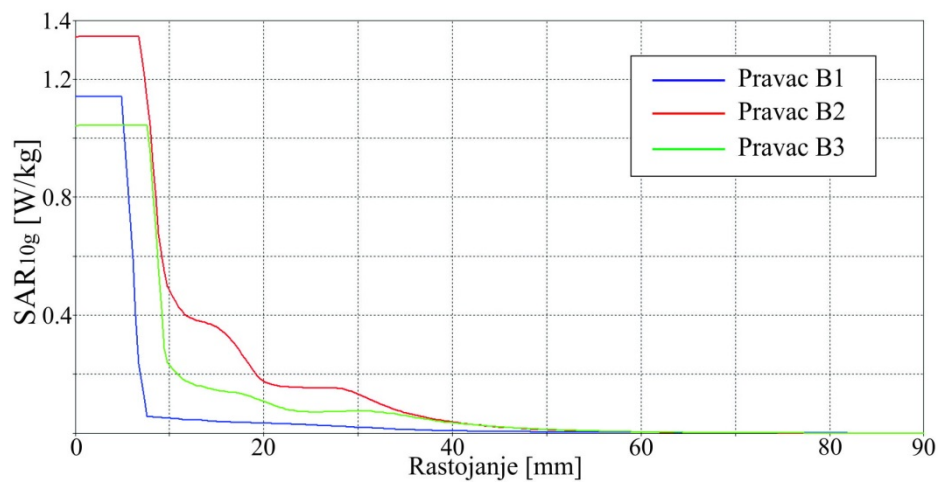


Slika 4.81 Grafik raspodele SAR<sub>10g</sub> za presek A duž pravaca A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub> i A<sub>3</sub>

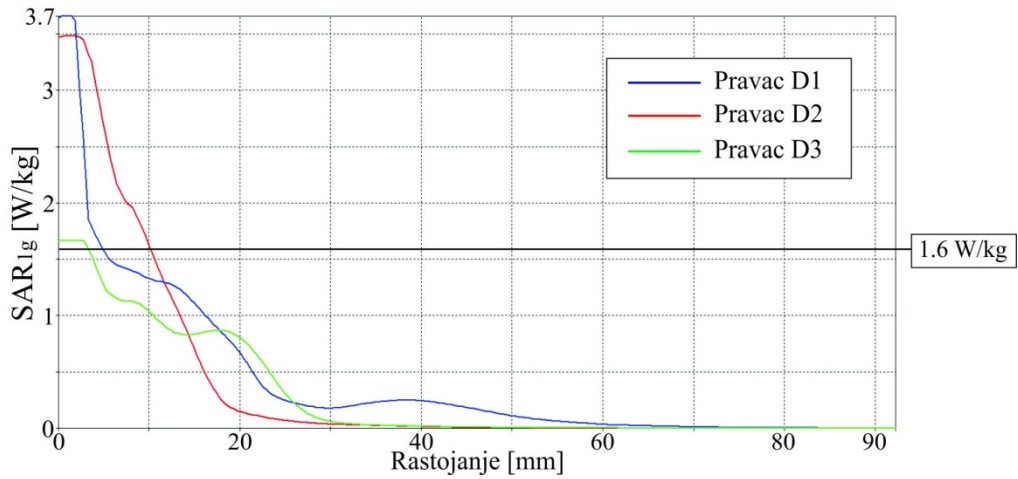
Za presek A, maksimalna vrednost za  $SAR_{1g}$  je oko 2 puta viša od bazičnog ograničenja dok je kod  $SAR_{10g}$  ispod vrednosti bazičnog ograničenja. Kod oba SAR visoke vrednosti su prisutne u tkivima do dubine od 7mm nakon čega vrednost pada ispod  $2W/kg$ . Nakon 50mm te vrednosti postaju zanemarljivo male ili gotovo jednake nuli, što znači da do ove dubine dolazi do gotovo potpunog apsorbovanja elektromagnetske energije.



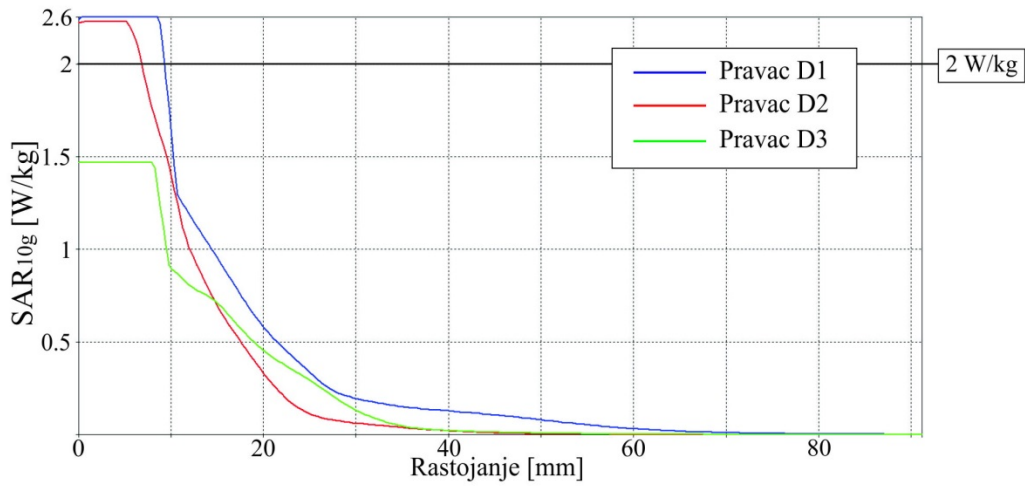
Slika 4.82 Grafik raspodele  $SAR_{1g}$  za presek B duž pravaca  $B_1$ ,  $B_2$  i  $B_3$



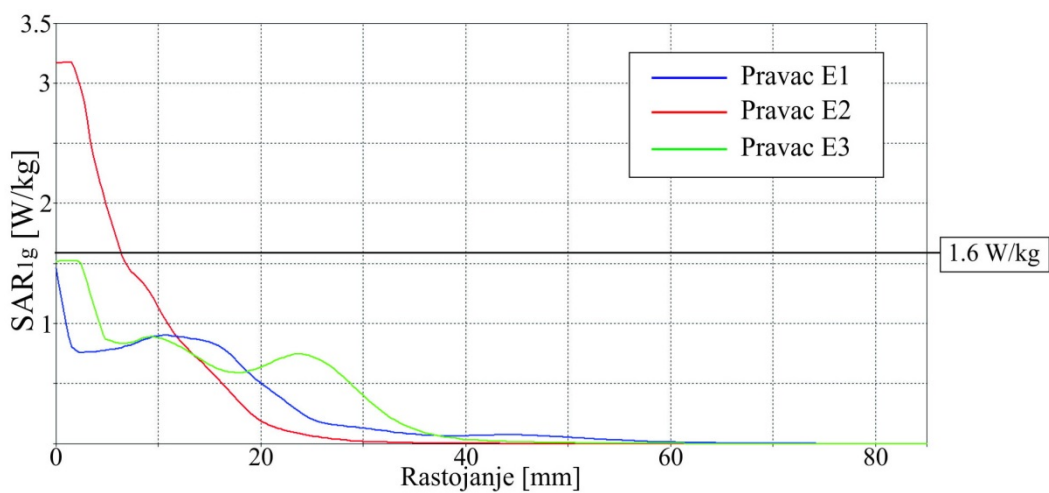
Slika 4.83 Grafik raspodele  $SAR_{10g}$  za presek B duž pravaca  $B_1$ ,  $B_2$  i  $B_3$



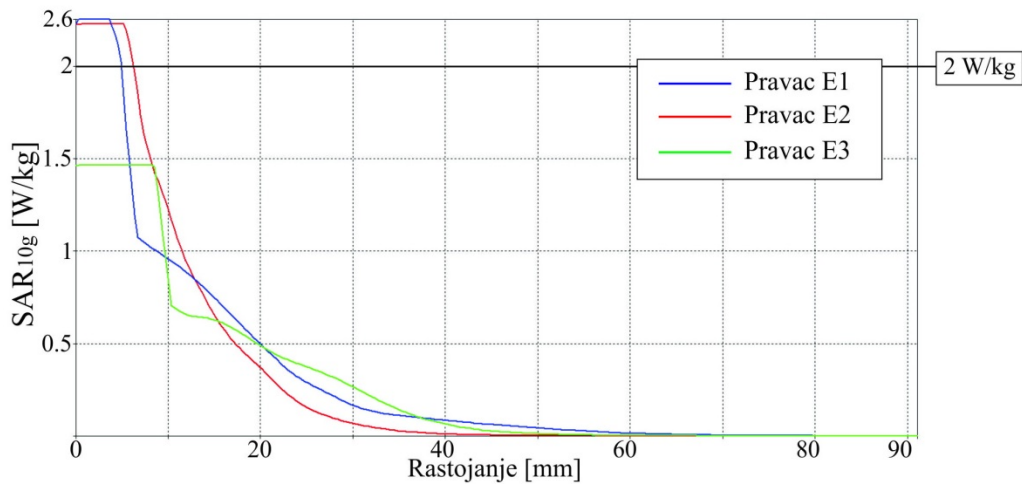
Slika 4.84 Grafik raspodele SAR<sub>1g</sub> za presek D duž pravaca D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub> i D<sub>3</sub>



Slika 4.85 Grafik raspodele SAR<sub>10g</sub> za presek D duž pravaca D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub> i D<sub>3</sub>



Slika 4.86 Grafik raspodele SAR<sub>1g</sub> za presek E duž pravaca E<sub>1</sub>, E<sub>2</sub> i E<sub>3</sub>



Slika 4.87 Grafik raspodele SAR<sub>10g</sub> za presek E duž pravaca E<sub>1</sub>, E<sub>2</sub> i E<sub>3</sub>

Za presek B, maksimalna vrednost za SAR<sub>1g</sub> je nešto viša od bazičnog ograničenja (1.95W/kg) dok je kod SAR<sub>10g</sub> to oko 1.35W/kg. Kod SAR<sub>1g</sub> visoke vrednosti su prisutne u tkivima do dubine od 4mm nakon čega vrednost pada ispod 1.6W/kg. Kao i za presek A, nakon 50mm vrednosti i za SAR<sub>1g</sub> i SAR<sub>10g</sub> postaju zanemarljivo male ili gotovo jednake nuli.

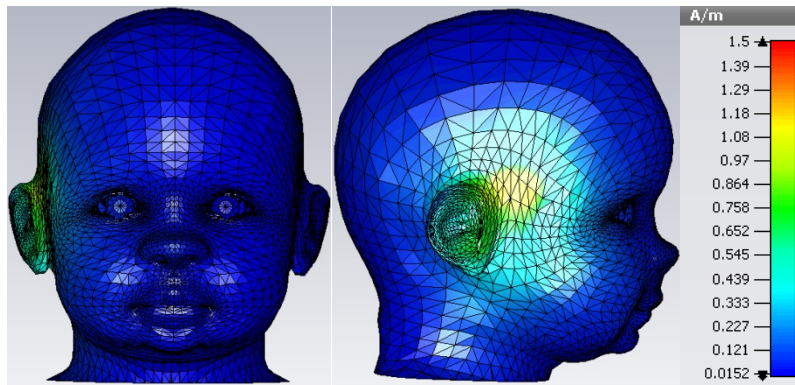
Za presek D, maksimalna vrednost za SAR<sub>1g</sub> je gotovo 2.3 puta viša od vrednosti bazičnog ograničenja dok je kod SAR<sub>10g</sub> to oko 1.3 puta. Kod oba SAR visoke vrednosti su prisutne u tkivima do dubine od oko 9mm nakon čega vrednosti padaju ispod vrednosti bazičnih ograničenja, dok im vrednosti nakon 65mm postaju zanemarljivo male ili gotovo jednake nuli.

Za presek E, maksimalne vrednosti za SAR<sub>1g</sub> su oko 2 puta više od vrednosti bazičnog ograničenja, dok je kod SAR<sub>10g</sub> to oko 1.3 puta. Visoke vrednosti, iznad bazičnih ograničenja su prisutne u tkivima do dubine od oko 7mm nakon čega im vrednosti padaju ispod ovih vrednosti i na oko 60mm postaju zanemarljivo male ili gotovo jednake nuli.

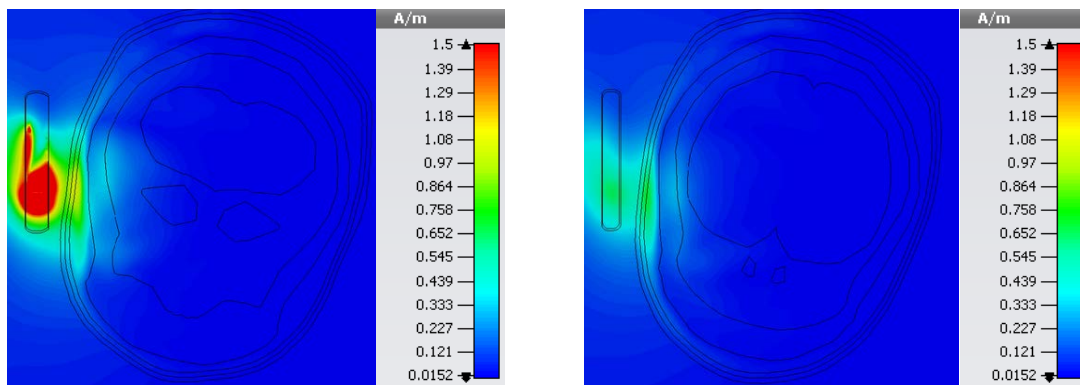
Ono što je evidentno, za presek D su prisutne visoke vrednosti za SAR u površinskim slojevima glave deteta (koža, masno tkivo glave, mišići glave, deo lobanje) kada telefon radi sa maksimalnom snagom od 1W.

#### 4.3.3 Vrednost jačine magnetskog polja za $f = 2.1\text{GHz}$

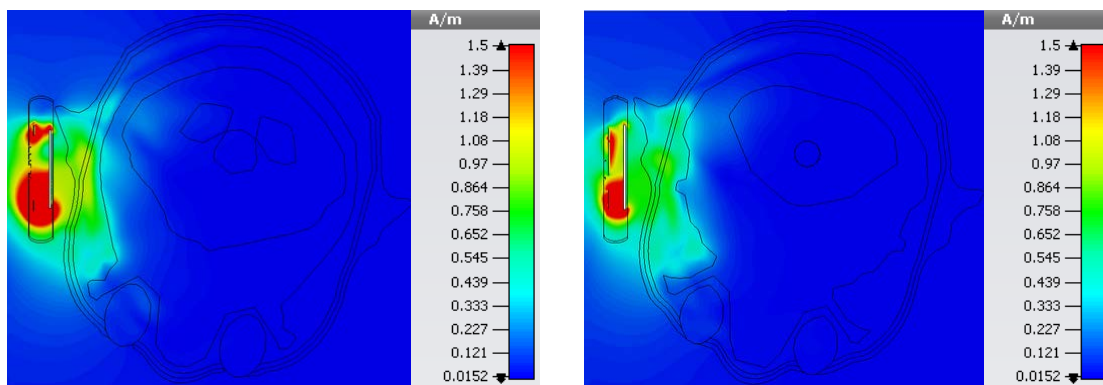
Na slici 4.88 date su vrednosti jačine magnetskog polja po površini modela glave deteta. Na slikama 4.89 i 4.90 date su vrednosti jačine magnetskog polja unutar glave deteta za različite preseke.



Slika 4.88 Jačina magnetskog polja  $H$  [A/m] po površini modela



a) A b) B  
Slika 4.89 Jačina magnetskog polja za preseke A i B

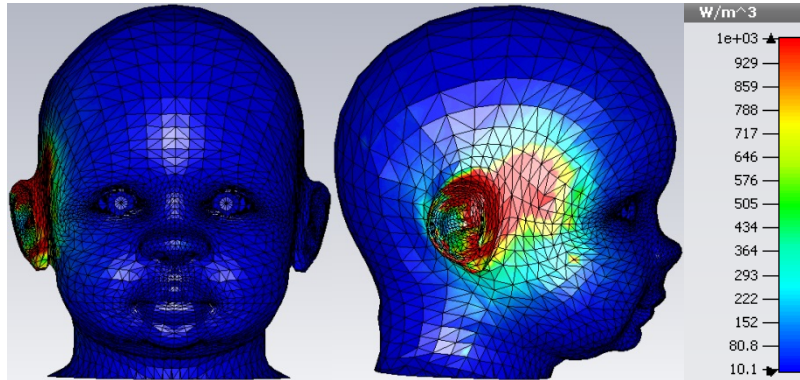


a) D b) E  
Slika 4.90 Jačina magnetskog polja za preseke D i E

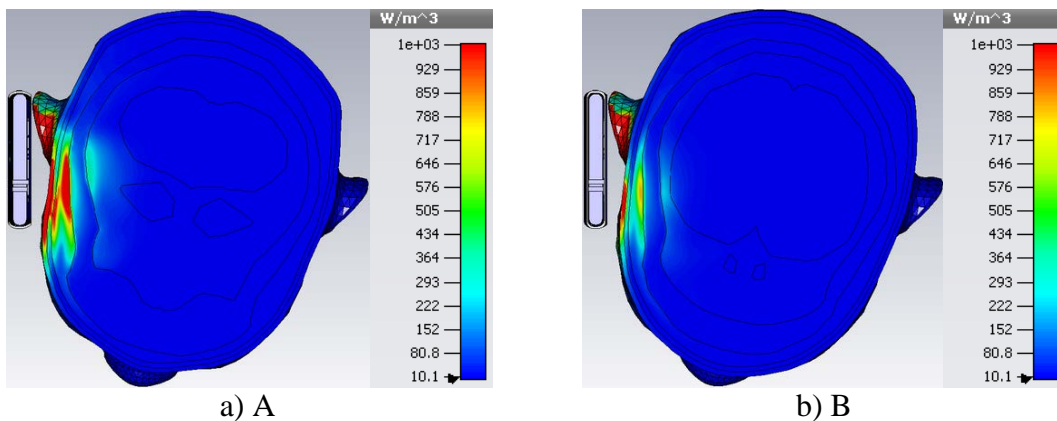
Maksimalna vrednost polja je podešena na 1.5A/m radi preglednosti i lakše uočljivosti razlike u raspodeli polja. Budući da je referentni granični nivo za jačinu magnetskog polja 0.064A/m za 2.1GHz, vidimo da je ova vrednost premašena u velikom delu glave deteta. Kod preseka A, D i E prisutne su visoke vrednosti magnetskog polja u koži, masnom tkivu i mišićima.

#### 4.3.4 Raspodela gustine snage gubitaka za $f = 2.1\text{GHz}$

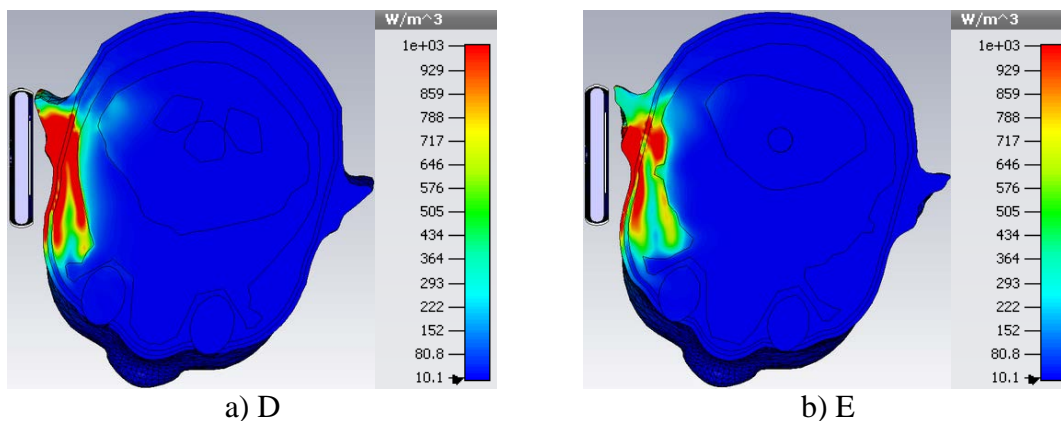
Na slici 4.91 dat je prikaz prostorne raspodele gustine snage gubitaka uz samu površinu modela glave deteta. Na slikama 4.92 i 4.93 data je raspodela gustine snage gubitaka unutar glave deteta za različite preseke.



Slika 4.91 Raspodela gustine snage gubitaka uz samu površinu modela



Slika 4.92 Raspodela gustine snage gubitaka za preseke A i B



Slika 4.93 Raspodela gustine snage gubitaka za preseke D i E

Na osnovu slika 4.92 i 4.93 vidimo da su u određenim oblastima prisutne visoke vrednosti gustine snage gubitaka. To je svakako najviše izraženo za preseke D i E.

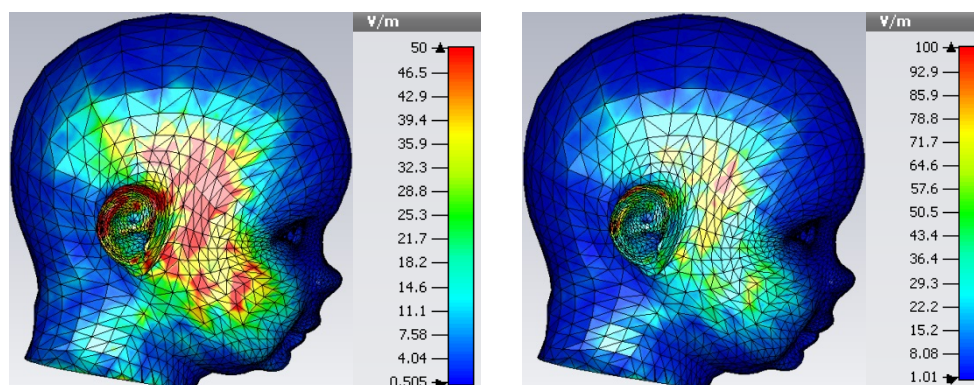
## 4.4 Raspodela elektromagnetskog polja za $f = 28\text{GHz}$

Frekvencijski opseg od 28GHz je predložen da bude jedan od opsega za predstojeće 5G mobilne mreže. Za razliku od GSM, 3G i 4G mobilnih mreža, ovaj opseg treba da omogući puno prostora za prenos velike količine podataka. Frekvencije iz ovog opsega leže u milimetarskom području, tj. talasna dužina im je reda milimetra.

### 4.4.1 Vrednost intenziteta električnog polja za $f = 28\text{GHz}$

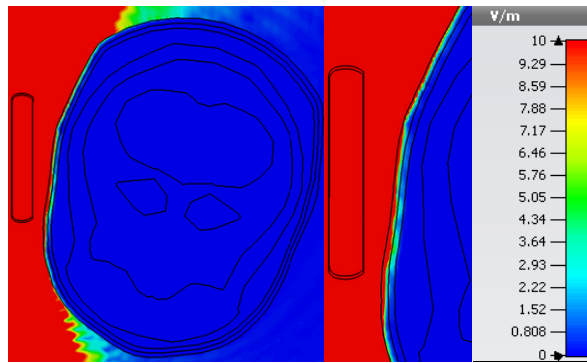
Na slici 4.94 data je vrednost intenziteta električnog polja po površini modela glave deteta. Kako bismo imali jasnu sliku o mapi raspodele intenziteta električnog polja na površini modela gornja vrednost u paleti boja je zbog većeg kontrasta podešena na 50V/m. Na desnoj strani slike dat je prikaz površinske raspodele intenziteta električnog polja sa podešenom maksimalnom vrednošću u paleti boja na 100V/m, u cilju vizuelnog poređenja razlike raspodele polja na datoj frekvenciji i raspodele polja na frekvencijama 0.9GHz, 1.8GHz i 2.1GHz (videti 4.1.1, 4.2.1 i 4.3.1).

Kako je prema Pravilniku o granicama izlaganja nejonizujućim zračenjima (videti poglavlje 2.1.3) referentni granični nivo za jačinu električnog polja za frekvencije iznad 10GHz 24.4V/m, sa slika se vidi da su vrednosti u pojedinim površinskim oblastima glave deteta daleko iznad ove granice.

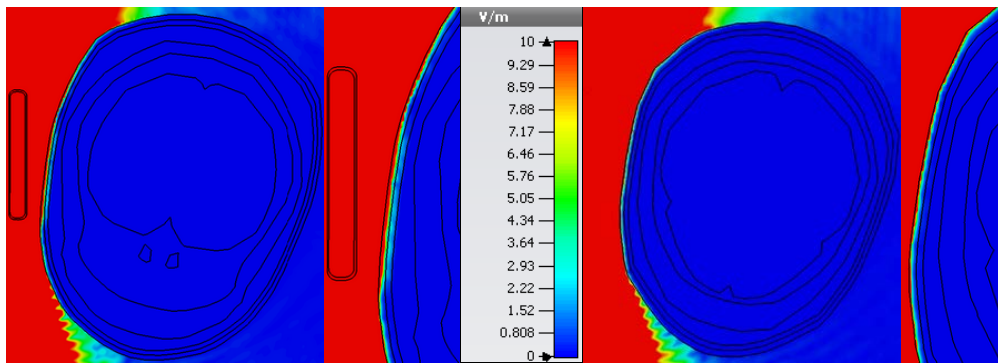


Slika 4.94 Vrednost intenziteta električnog polja  $E$  [V/m] po površini modela

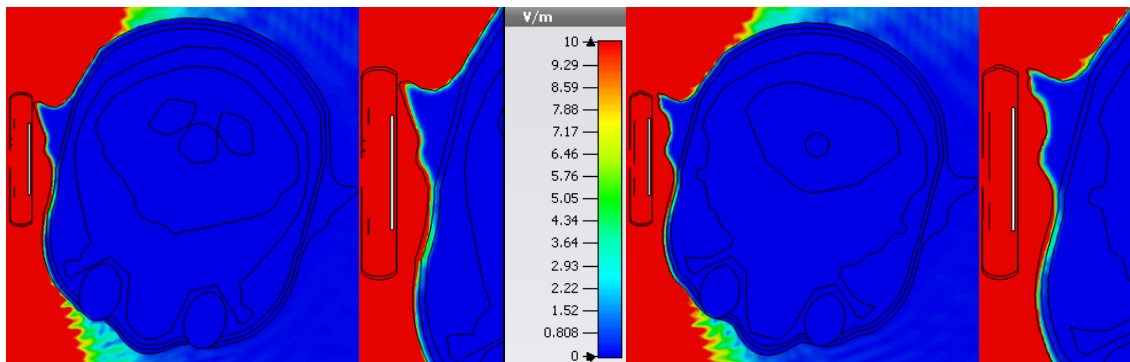
Na slikama 4.95-4.97 data je vrednost intenziteta električnog polja unutar glave modela deteta za više različitih horizontalnih preseka (gornja vrednost u paleti boja je podešena na 10V/m).



Slika 4.95 Vrednost intenziteta električnog polja za presek A



Slika 4.96 Vrednost intenziteta električnog polja za preseke B i C

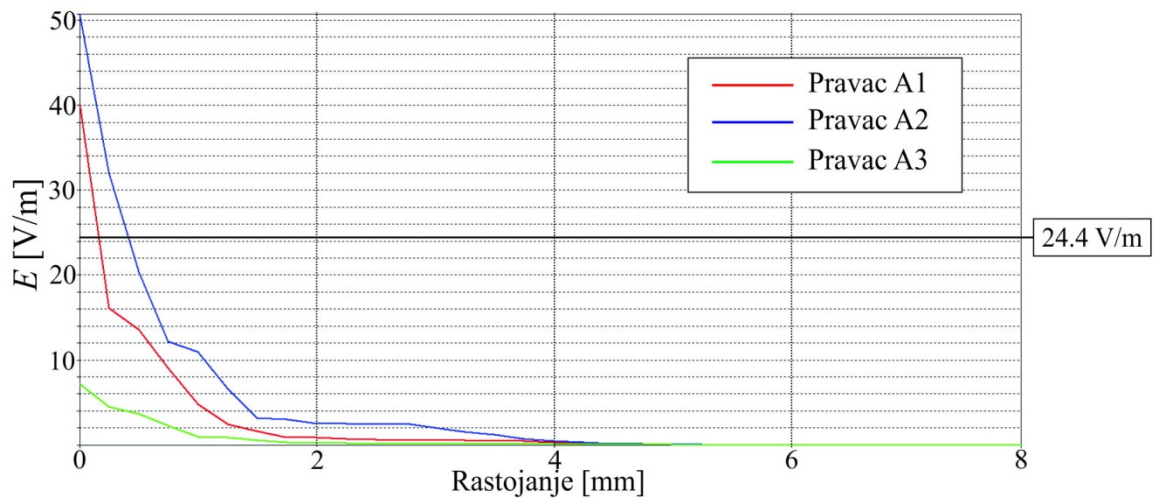


Slika 4.97 Vrednost intenziteta električnog polja za preseke D i E

Pretpostavka da su vrednosti električnog polja u unutrašnjosti glave deteta male je ispunjena za bilo koji poprečni presek. Povišene vrednosti intenziteta električnog polja, koje su iznad maksimalno propisanih su prisutne samo u površinskom sloju, u koži i eventualno masnom tkivu. U ostalim biološkim tkivima glave ove vrednosti su veoma male ili jednake nuli. Dakle, vidimo da je dubina prodiranja na ovoj frekvenciji mnogo manja nego za prethodno opisane frekvencijske opsege, što je i očekivano na osnovu talasne dužine ovih elektromagnetskih talasa.

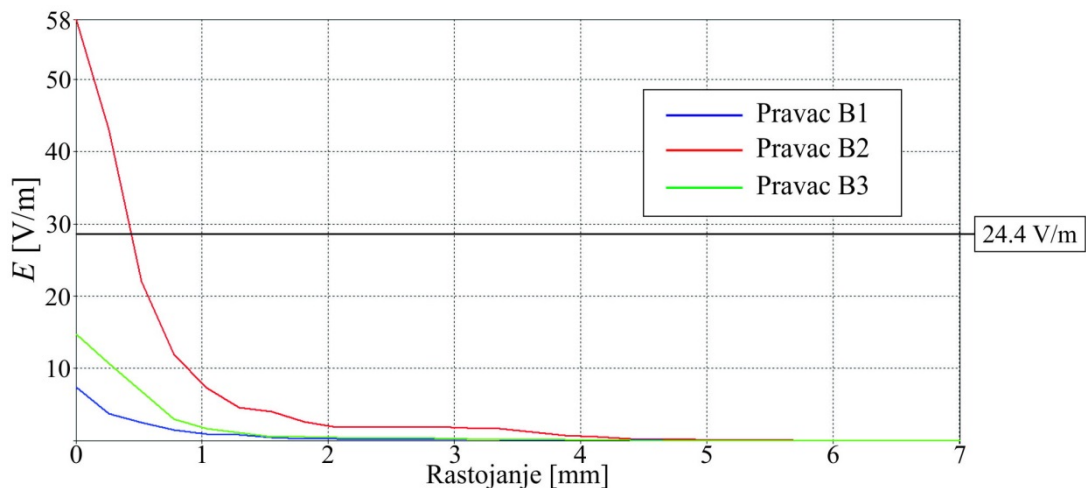


Na slikama 4.98-4.102 prikazana je zavisnost vrednosti intenziteta električnog polja od rastojanja za pravce koji pripadaju različitim presecima.



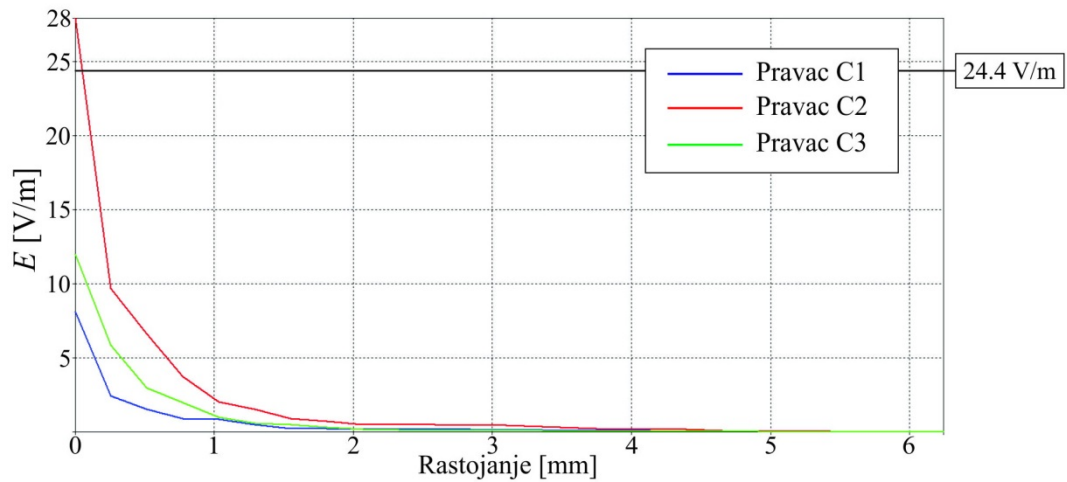
Slika 4.98 Grafik zavisnosti intenziteta električnog polja za presek A duž pravaca A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub> i A<sub>3</sub>

Na slici 4.98 data je vrednost intenziteta električnog polja za presek A. Ono što je zajedničko za sve tri krive u ovom preseku, jeste da je vrednost intenziteta električnog polja samo u površinskom sloju glave deteta znatno iznad referentnog graničnog nivoa dok je u ostalim daleko manja. Možemo videti da je najviša vrednost električnog polja oko 52V/m na ulazu u kožu glave deteta i da ta vrednost brzo opada na oko 2V/m na 2mm i postaje gotovo jednaka nuli već na oko 4mm.



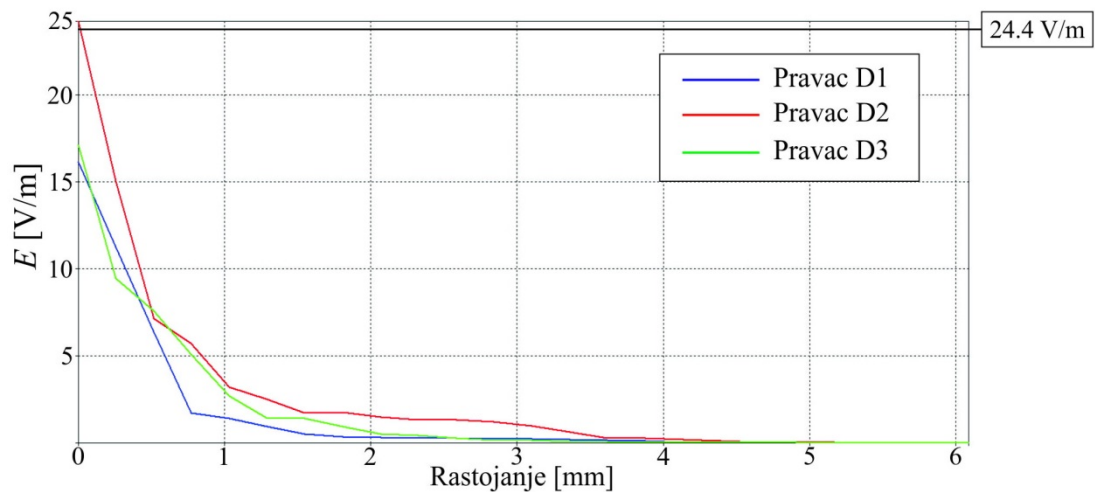
Slika 4.99 Grafik zavisnosti intenziteta električnog polja za presek B duž pravaca B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub> i B<sub>3</sub>

Za presek B situacija je slična kao kod preseka A sa nešto višim vrednostima polja. Na ulazu je najviša vrednost intenziteta električnog polja oko 58V/m, na rastojanju od 3.4mm opada na 2.5V/m i postaje gotovo jednaka nuli na oko 4.4mm.

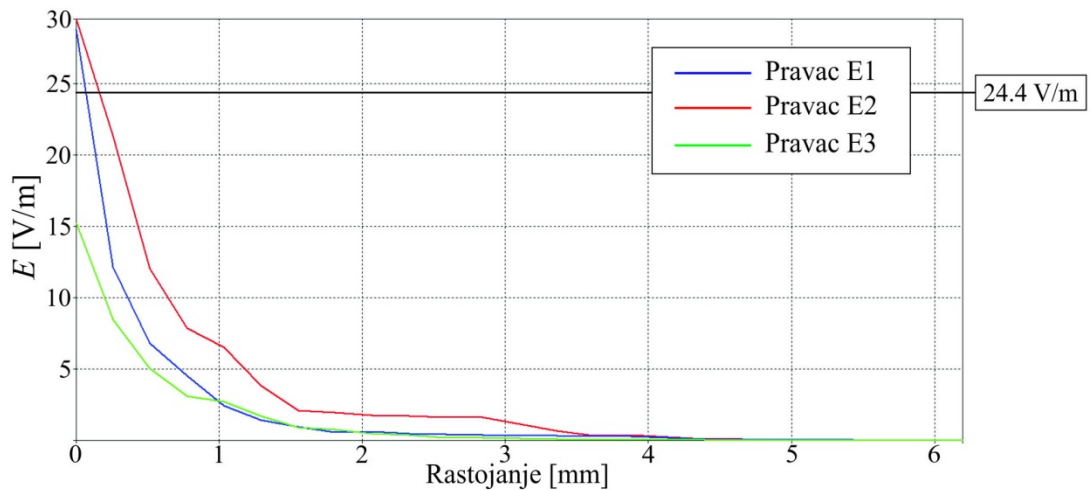


Slika 4.100 Grafik zavisnosti intenziteta električnog polja za presek C duž pravaca C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> i C<sub>3</sub>

Kod preseka C najviša vrednost intenziteta električnog polja je oko 28V/m, na rastojanju od 1mm opada na 2.5V/m i postaje gotovo jednaka nuli na oko 3.6mm.



Slika 4.101 Grafik zavisnosti intenziteta električnog polja za presek D duž pravaca D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub> i D<sub>3</sub>

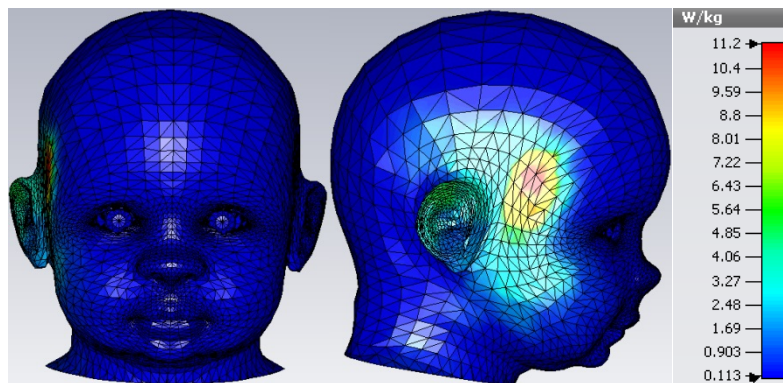


Slika 4.102 Grafik zavisnosti intenziteta električnog polja za presek E duž pravaca E<sub>1</sub>, E<sub>2</sub> i E<sub>3</sub>

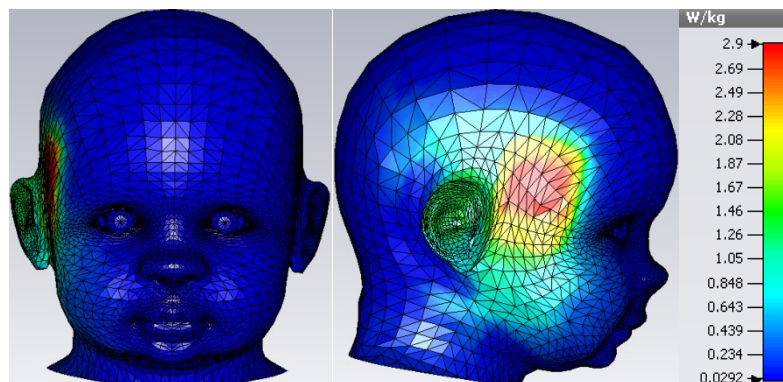
Kod preseka D i E primetna je slična raspodela s tim što su vrednosti polja na ulazu nešto više kod preseka E. Najviša vrednost električnog polja kod preseka D je oko 25V/m, dok je kod preseka E oko 30V/m. Na oko 2mm u oba slučaja intenzitet električnog polja je oko 2.5V/m, a već na 3.5mm postaje gotovo jednak nuli.

#### 4.4.2 Raspodela SAR<sub>1g</sub> i SAR<sub>10g</sub> za $f = 28\text{GHz}$

Na slikama 4.103 i 4.104 dat je prikaz prostorne raspodele SAR<sub>1g</sub> i SAR<sub>10g</sub> i njihova maksimalna vrednost uz samu površinu modela glave deteta. Na slikama 4.105-4.109 data je raspodela SAR<sub>1g</sub> i SAR<sub>10g</sub> unutar glave deteta za različite preseke.

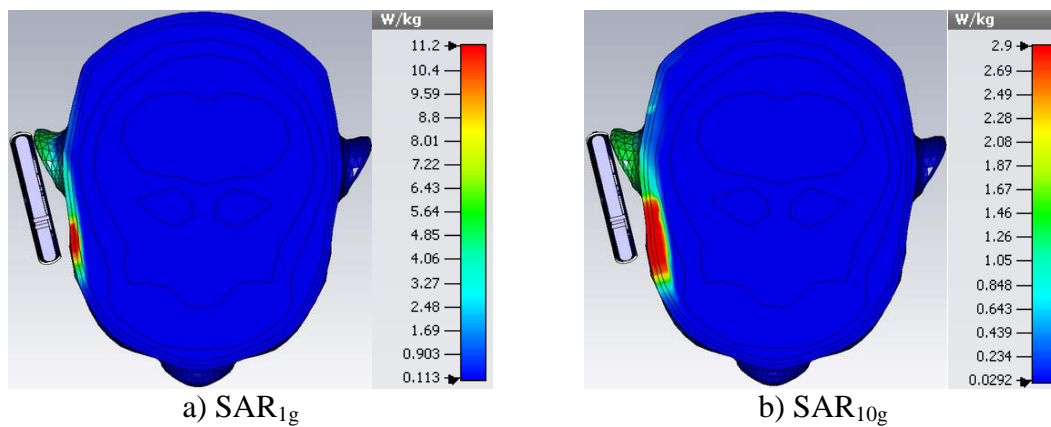


Slika 4.103 Raspodela SAR<sub>1g</sub> uz samu površinu modela

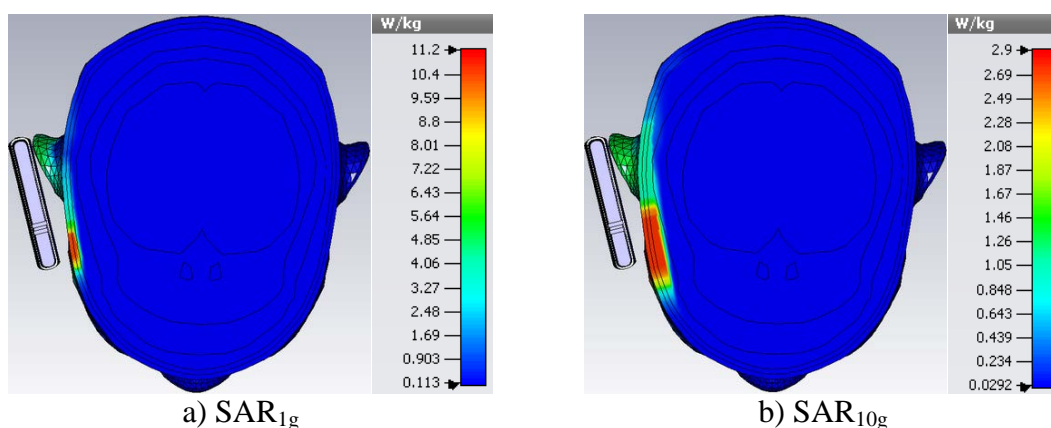


Slika 4.104 Raspodela SAR<sub>10g</sub> uz samu površinu modela

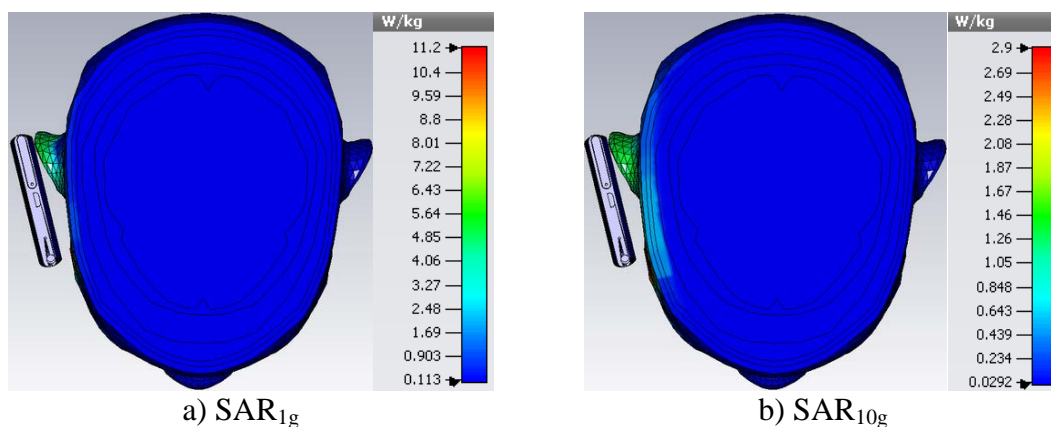
Budući da su dobijene maksimalne vrednosti za SAR 11.2W/kg u slučaju SAR<sub>1g</sub> i 2.9W/kg za SAR<sub>10g</sub> vidimo da su maksimalne vrednosti iznad bazičnih ograničenja za SAR (1.6W/kg za SAR<sub>1g</sub> i 2W/kg za SAR<sub>10g</sub>).



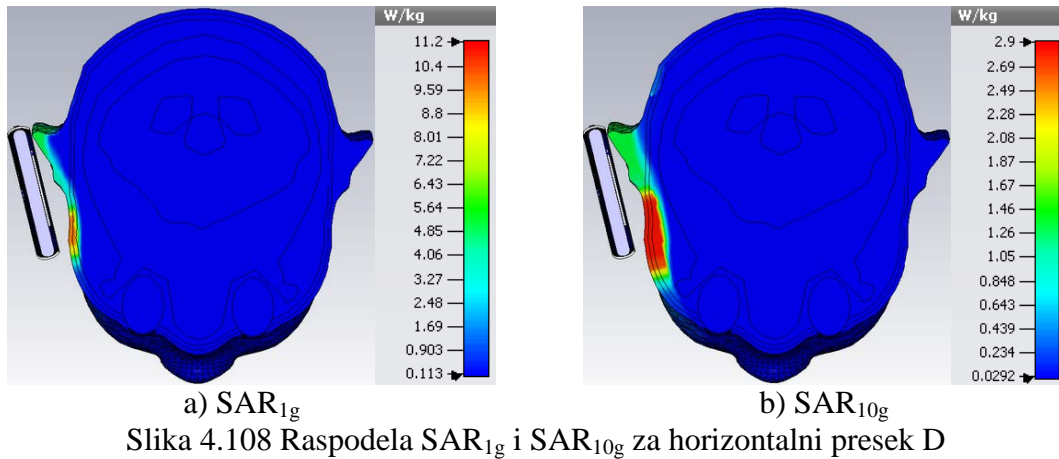
Slika 4.105 Raspodela SAR<sub>1g</sub> i SAR<sub>10g</sub> za horizontalni presek A



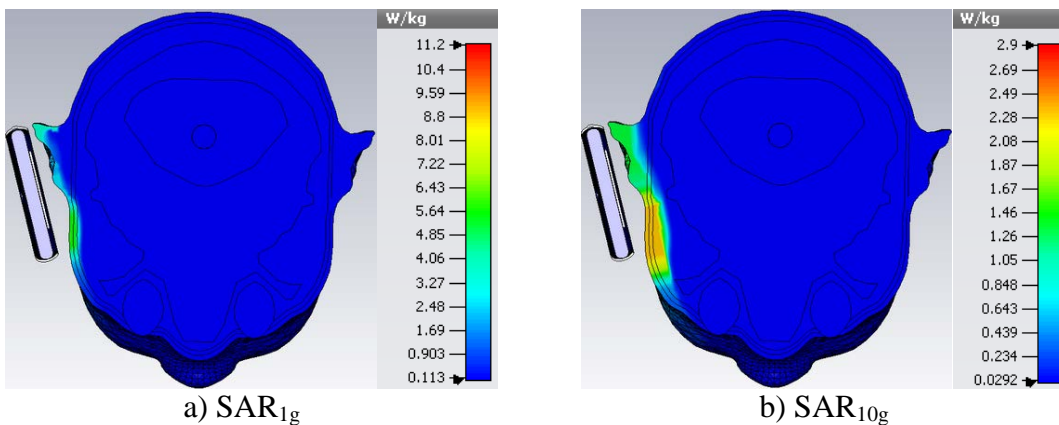
Slika 4.106 Raspodela SAR<sub>1g</sub> i SAR<sub>10g</sub> za horizontalni presek B



Slika 4.107 Raspodela SAR<sub>1g</sub> i SAR<sub>10g</sub> za horizontalni presek C



Slika 4.108 Raspodela SAR<sub>1g</sub> i SAR<sub>10g</sub> za horizontalni presek D

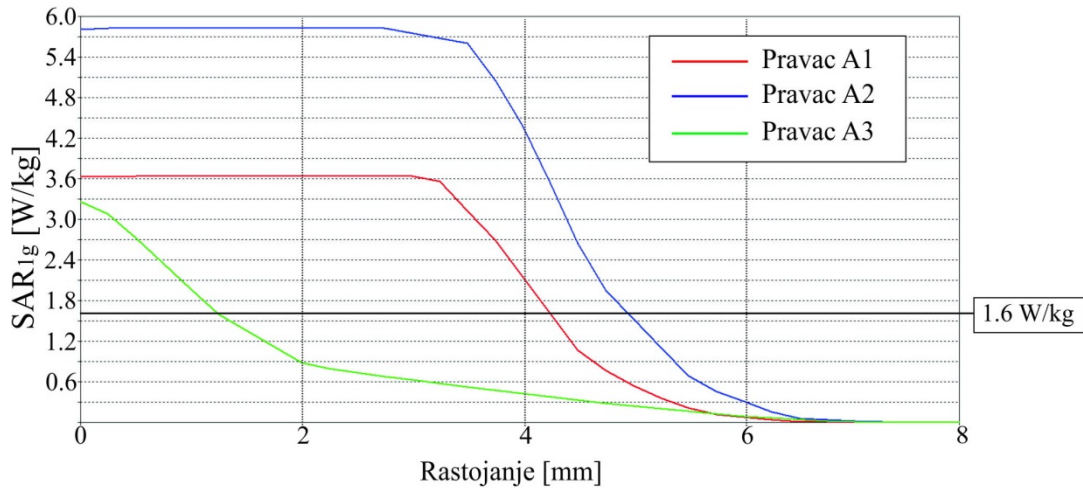


Slika 4.109 Raspodela SAR<sub>1g</sub> i SAR<sub>10g</sub> za horizontalni presek E

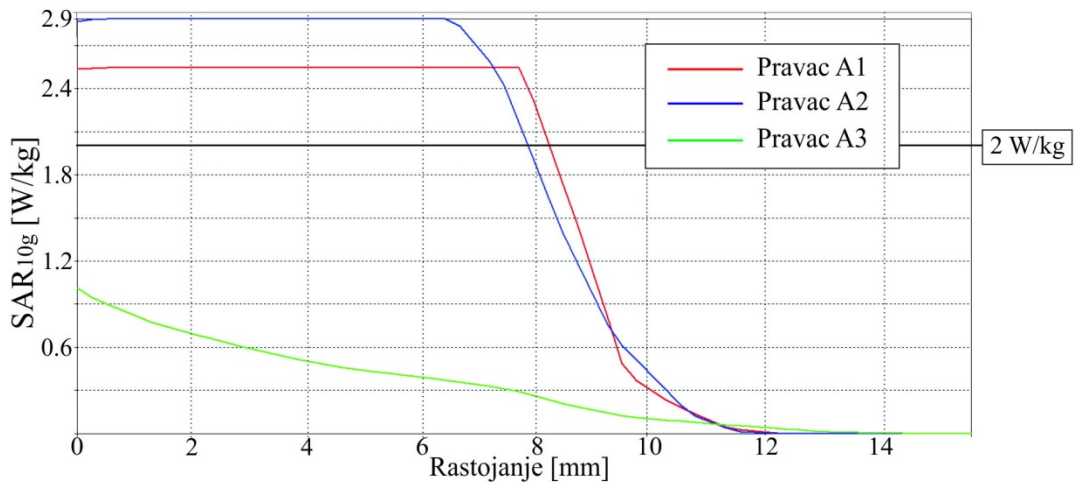
Dubina prodiranja elektromagnetskog talasa je ograničena na površinske slojeve glave deteta, na kožu, masno tkivo i mišiće glave. Jedna od posledica jeste da će se upravo u ovim slojevima apsorbovati i sva energija elektromagnetskog polja. Tako za preseke A, B i D imamo u površinskim oblastima veliku količinu apsorbovane energije čija vrednost premašuje i 7 puta vrednost bazičnog ograničenja u slučaju SAR<sub>1g</sub> do oko 1.5 puta u slučaju SAR<sub>10g</sub>.

Nameće se pitanje, kako se dobijaju ovako visoke vrednosti za SAR iako su vrednosti električnog polja niže nego u slučaju nižih frekvencija. Ovo je pre svega posledica elektromagnetskih osobina bioloških tkiva. Kako su ovi parametri frekventno zavisni, sa porastom frekvencije relativna dielektrična konstanta se smanjuje a provodnost značajno raste (videti poglavlje 3.3).

Na slikama 4.110-4.119 data je zavisnost vrednosti SAR<sub>1g</sub> i SAR<sub>10g</sub> od rastojanja za različite preseke.

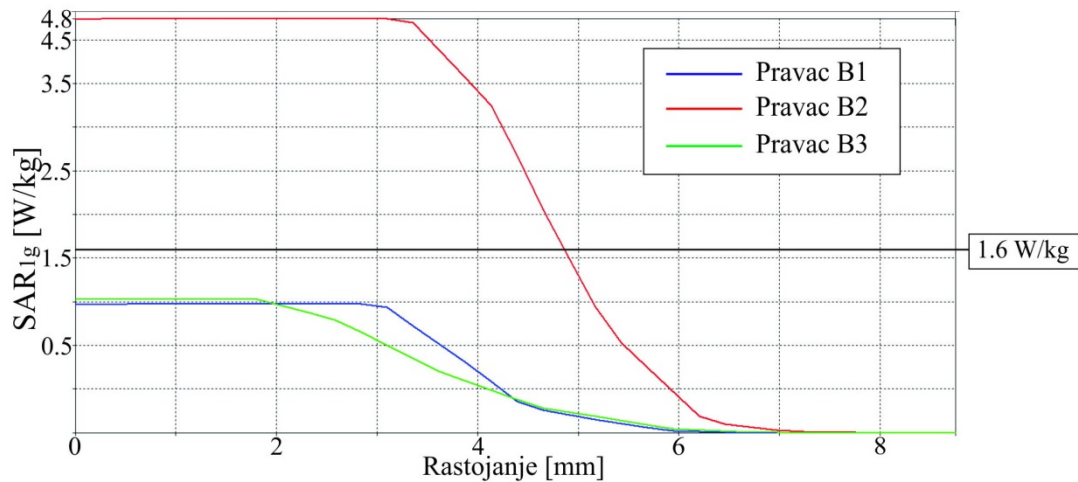


Slika 4.110 Grafik raspodele SAR<sub>1g</sub> za presek A duž pravaca A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub> i A<sub>3</sub>

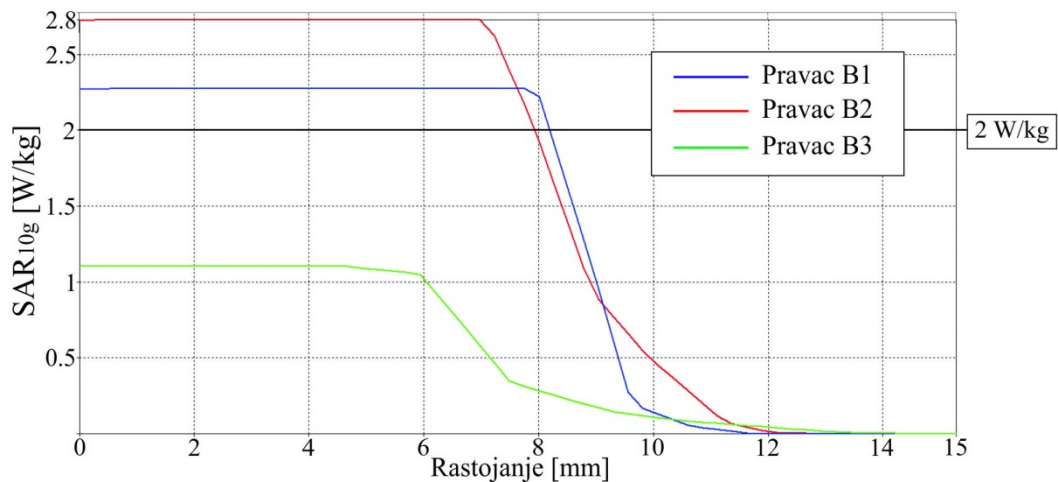


Slika 4.111 Grafik raspodele SAR<sub>10g</sub> za presek A duž pravaca A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub> i A<sub>3</sub>

Sa grafika raspodele za SAR<sub>1g</sub> i SAR<sub>10g</sub> za presek A vidimo da vrednosti premašuju bazična ograničenja. U slučaju SAR<sub>1g</sub> to premašenje je gotovo 3.6 puta dok je u slučaju SAR<sub>10g</sub> 1.5 puta. Za SAR<sub>1g</sub> visoke vrednosti su prisutne u tkivima do dubine od oko 4.8mm nakon čega vrednost pada ispod bazičnog ograničenja, dok je kod SAR<sub>10g</sub> to do oko 8mm. Rastojanje do koga se apsorbuje sva elektromagnetska energija je u prvom slučaju oko 6.5mm a u drugom oko 12mm.

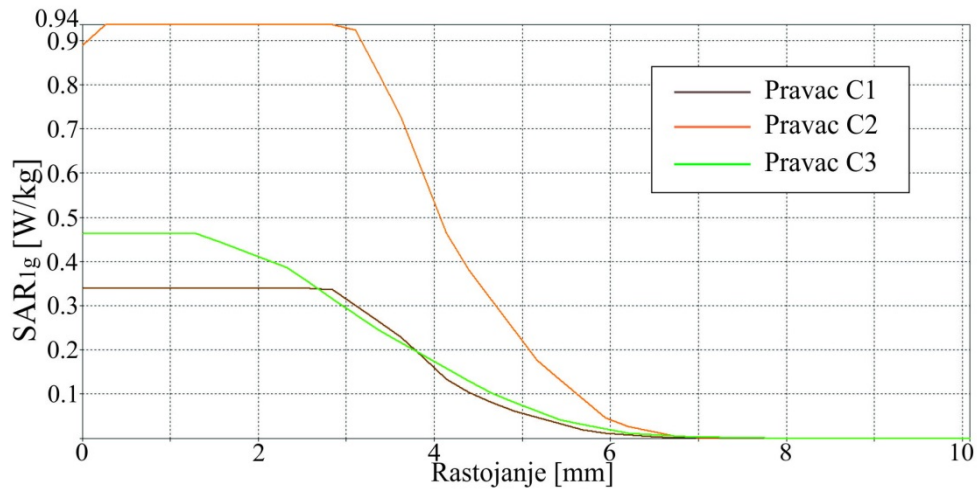


Slika 4.112 Grafik raspodele SAR<sub>1g</sub> za presek B duž pravaca B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub> i B<sub>3</sub>

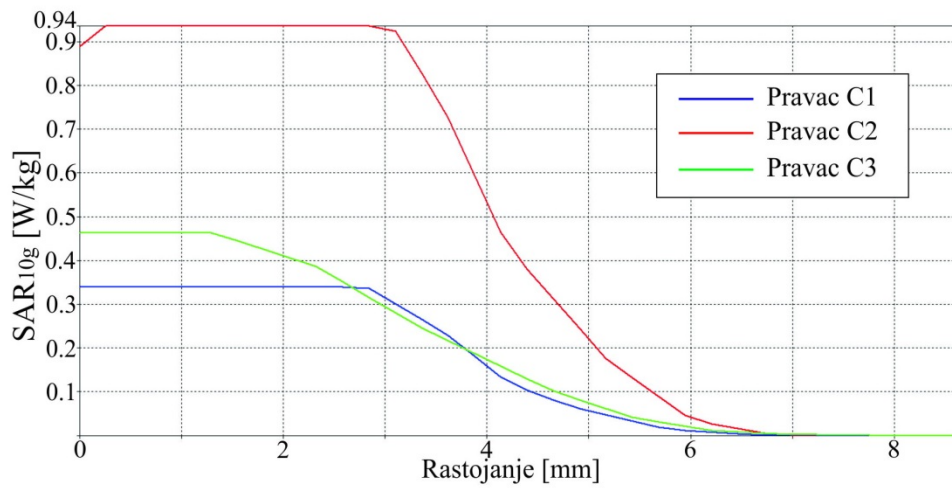


Slika 4.113 Grafik raspodele SAR<sub>10g</sub> za presek B duž pravaca B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub> i B<sub>3</sub>

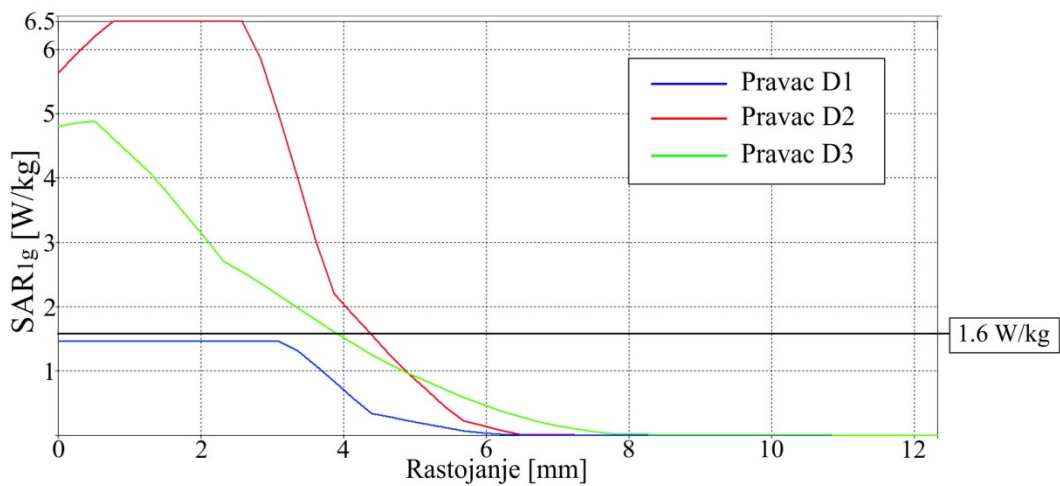
Kod preseka B premašenje bazičnog ograničenja za SAR<sub>1g</sub> je oko 3 puta dok je u slučaju SAR<sub>10g</sub> oko 1.4 puta. Za SAR<sub>1g</sub> visoke vrednosti su prisutne u tkivima do dubine od oko 4.8mm nakon čega vrednost pada ispod 1.6W/kg, dok su kod SAR<sub>10g</sub> više vrednosti od 2W/kg prisutne do dubine od oko 8.2mm. Rastojanje do koga se apsorbuje sva elektromagnetska energija je u prvom slučaju oko 7mm a u drugom oko 12mm. Vidimo da je dubina prodiranja slična kao kod preseka A.



Slika 4.114 Grafik raspodele SAR<sub>1g</sub> za presek C duž pravaca C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> i C<sub>3</sub>

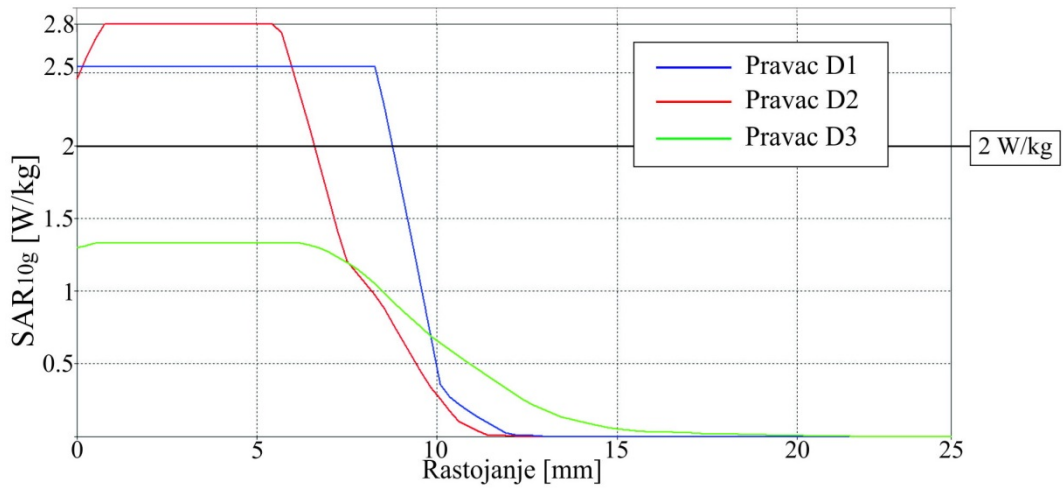


Slika 4.115 Grafik raspodele SAR<sub>10g</sub> za presek C duž pravaca C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> i C<sub>3</sub>

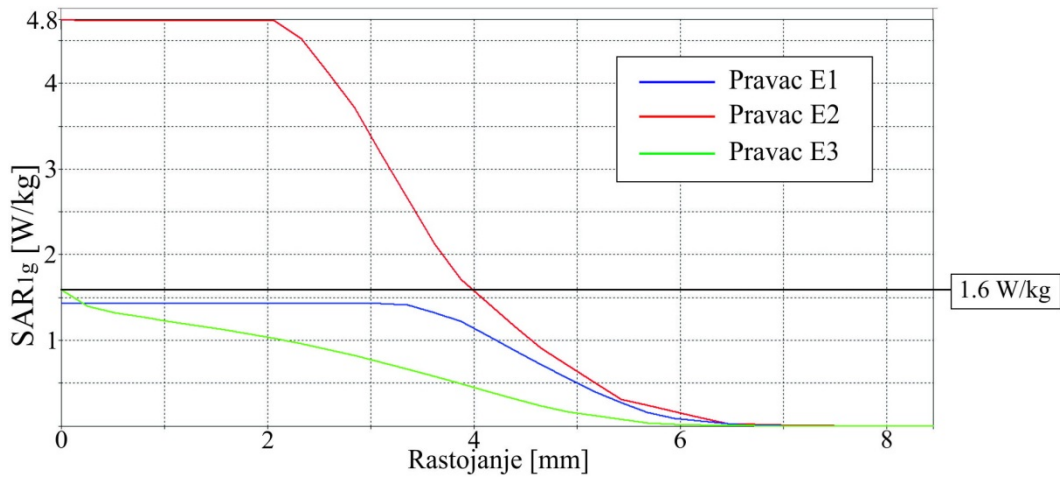


Slika 4.116 Grafik raspodele SAR<sub>1g</sub> za presek D duž pravaca D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub> i D<sub>3</sub>

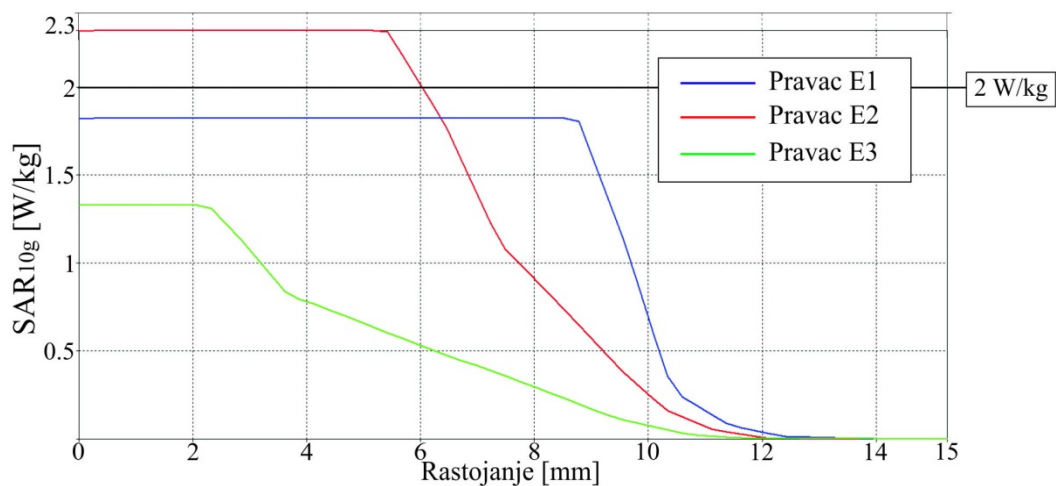




Slika 4.117 Grafik raspodele SAR<sub>10g</sub> za presek D duž pravaca D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub> i D<sub>3</sub>



Slika 4.118 Grafik raspodele SAR<sub>1g</sub> za presek E duž pravaca E<sub>1</sub>, E<sub>2</sub> i E<sub>3</sub>



Slika 4.119 Grafik raspodele SAR<sub>10g</sub> za presek E duž pravaca E<sub>1</sub>, E<sub>2</sub> i E<sub>3</sub>

Kod preseka C vrednosti i za SAR<sub>1g</sub> i SAR<sub>10g</sub> su u svim slučajevima ispod bazičnih ograničenja.

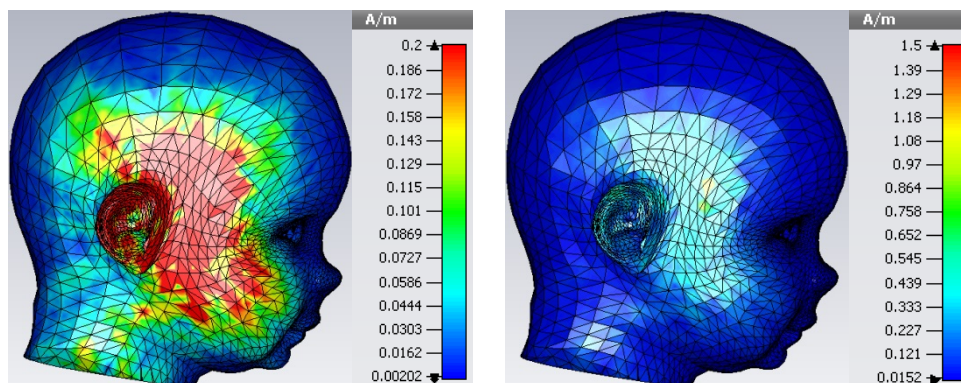
U slučaju preseka D premašenje vrednosti za  $SAR_{1g}$  je oko 4 puta dok je u slučaju  $SAR_{10g}$  oko 1.4 puta. Za  $SAR_{1g}$  visoke vrednosti su prisutne u tkivima do dubine od oko 4.5mm nakon čega vrednost pada ispod  $1.6W/kg$ , dok kod  $SAR_{10g}$  posle dubine od oko 8mm vrednost pada ispod  $2W/kg$ . Rastojanje do koga se apsorbuje sva elektromagnetska energija je u prvom slučaju oko 8mm a u drugom oko 12mm.

I na kraju za presek E premašenje vrednosti za  $SAR_{1g}$  je oko 3 puta dok je u slučaju  $SAR_{10g}$  oko 1.1 puta. Za  $SAR_{1g}$  visoke vrednosti su prisutne u tkivima do dubine od oko 4mm nakon čega vrednost pada ispod bazičnog ograničenja, dok je kod  $SAR_{10g}$  to do oko 6mm. Rastojanje do koga se apsorbuje sva elektromagnetska energija je u prvom slučaju oko 6.5mm a u drugom oko 12.5mm.

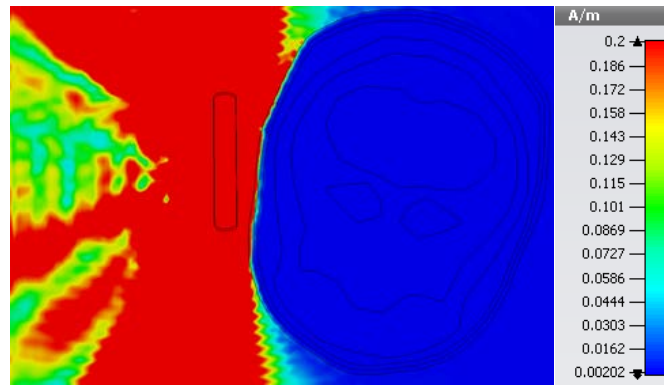
#### 4.4.3 Vrednost jačine magnetskog polja za $f = 28GHz$

Na slici 4.120 date su vrednosti jačine magnetskog polja po površini modela glave deteta. Gornja vrednost jačine magnetskog polja u paleti boja je zbog većeg kontrasta podešena na  $0.2A/m$ . Na desnoj strani slike dat je prikaz površinske raspodele jačine magnetskog polja sa podešenom maksimalnom vrednošću u paleti boja na  $1.5A/m$ , u cilju vizuelnog poređenja razlike raspodele polja na datoj frekvenciji i raspodele polja na frekvencijama  $0.9GHz$ ,  $1.8GHz$  i  $2.1GHz$ .

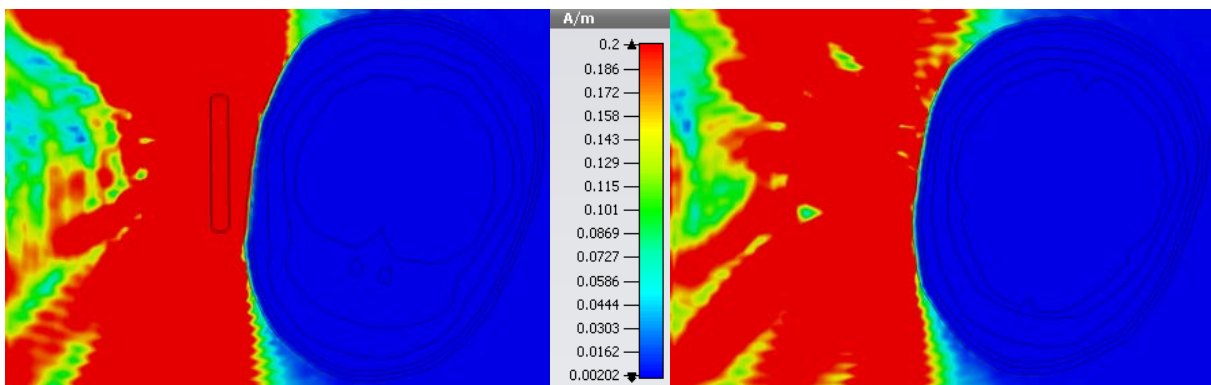
Na slikama 4.121-4.123 date su vrednost jačine magnetskog polja unutar glave deteta za različite preseke.



Slika 4.120 Jačina magnetskog polja  $H [A/m]$  po površini modela



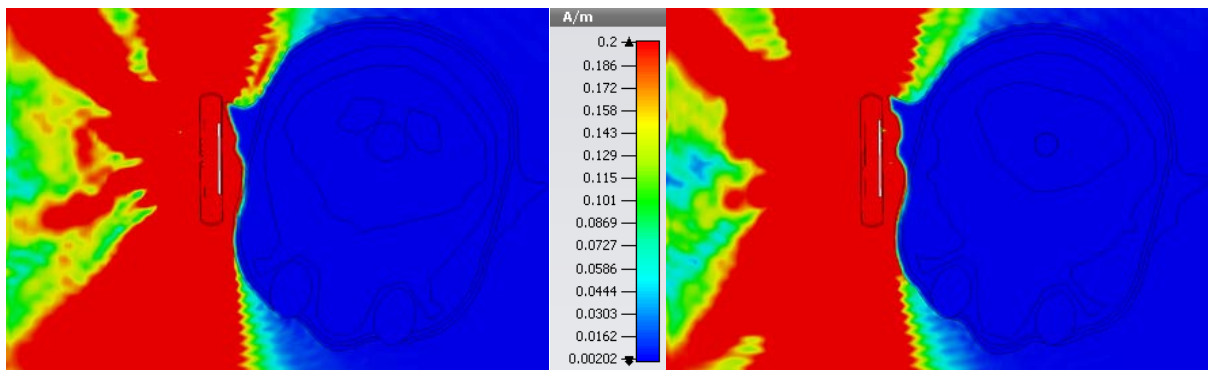
Slika 4.121 Jačina magnetskog polja za presek A



a) B

b) C

Slika 4.122 Jačina magnetskog polja za preseke B i C



a) D

b) E

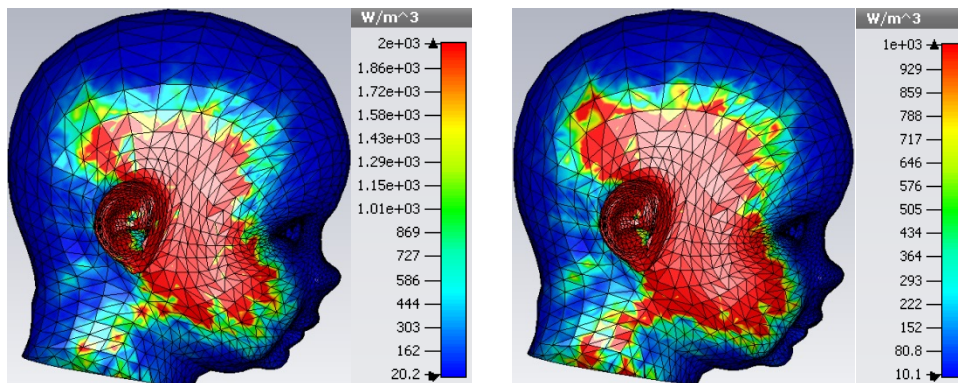
Slika 4.123 Jačina magnetskog polja za preseke D i E

Kako je referentni granični nivo za jačinu magnetskog polja na frekvencijama iznad 10GHz 0.064A/m, kao i u slučaju vrednosti intenziteta električnog polja premašenje ove vrednosti je prisutno samo u površinskom sloju glave deteta, tj. u koži i masnom tkivu. U ostalim slojevima ove vrednosti su daleko niže ili zanemarljive.

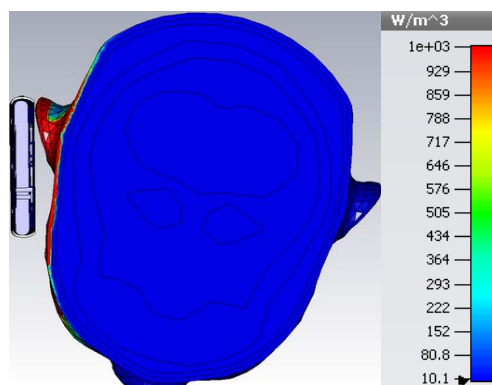
#### 4.4.4 Raspodela gustine snage gubitaka za $f = 28\text{GHz}$

Na slici 4.124 dat je prikaz prostorne raspodele gustine snage gubitaka uz samu površinu modela glave deteta. Gornja vrednost gustine snage gubitaka u paleti boja je zbog većeg kontrasta podešena na  $2000\text{W/m}^3$ . Na desnoj strani slike dat je prikaz površinske raspodele gustine snage gubitaka sa podešenom maksimalnom vrednošću u paleti boja na  $1000\text{W/m}^3$ , u cilju vizuelnog poređenja razlike raspodele gustine snage gubitaka na datoj frekvenciji i raspodele na frekvencijama  $0.9\text{GHz}$ ,  $1.8\text{GHz}$  i  $2.1\text{GHz}$ .

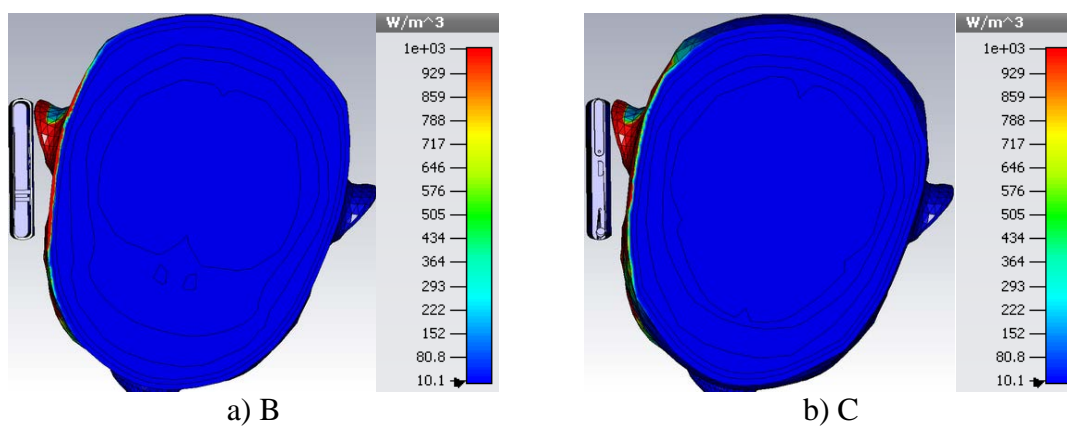
Na slikama 4.125-4.127 data je raspodela gustine snage gubitaka unutar glave deteta za različite preseke. Na vrlo visokim frekvencijama pogodno je pri analizi koristiti gustinu snage jer je dubina prodiranja elektromagnetskog talasa u telo mala.



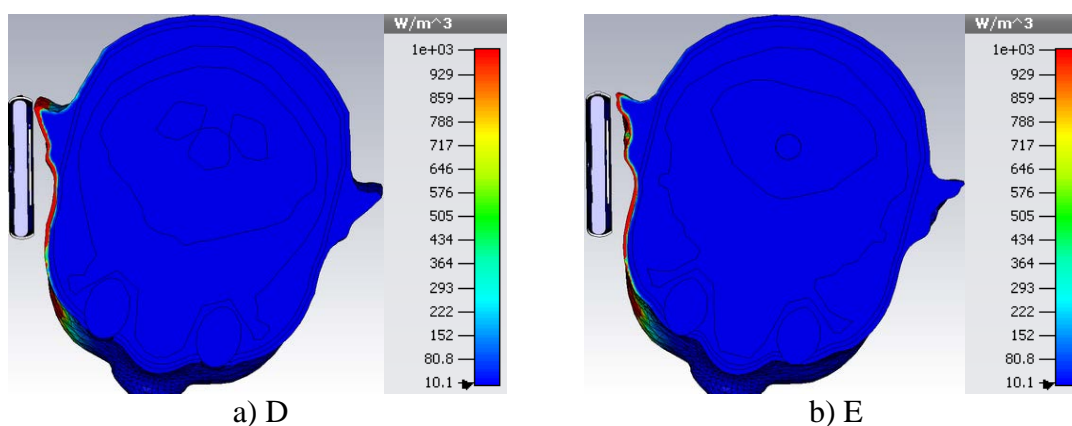
Slika 4.124 Raspodela gustine snage gubitaka uz samu površinu modela



Slika 4.125 Raspodela gustine snage gubitaka za presek A



Slika 4.126 Raspodela gustine snage gubitaka za preseke B i C



Slika 4.127 Raspodela gustine snage gubitaka za preseke D i E

Shodno prethodnim zaključcima, visoke vrednosti gustine snage gubitaka prisutne su samo u površinskim slojevima modela glave deteta u okolini telefona, prvenstveno u koži i manjem delu masnog tkiva.

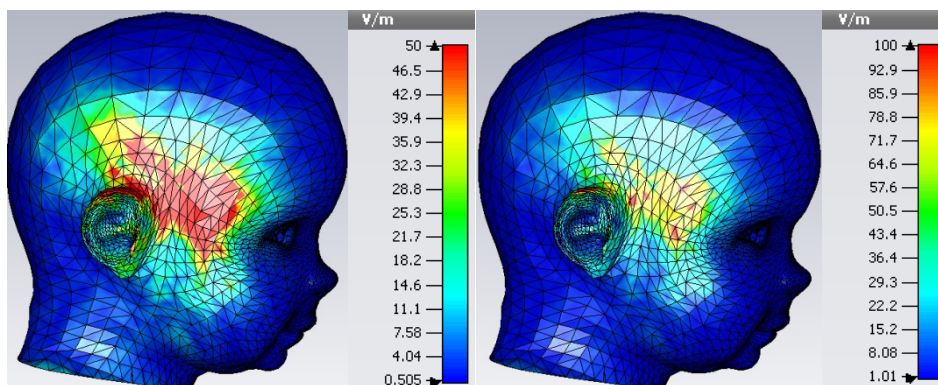
## 4.5 Raspodela elektromagnetskog polja za $f = 39\text{GHz}$

Još jedan opseg koji se testira za nastupajuće 5G mobilne mreže jeste 39GHz frekvencijski opseg. Budući da se i ovde radi o milimetarskom području prethodna zapažanja za raspodelu elektromagnetskog polja za 28GHz opseg mogu da se očekuju i u ovom opseg.

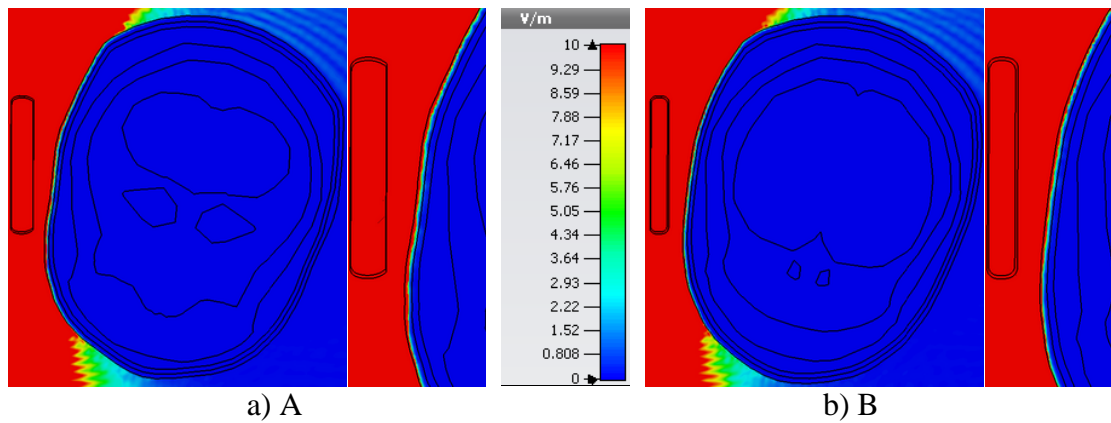
### 4.5.1 Vrednost intenziteta električnog polja za $f = 39\text{GHz}$

Na slici 4.128 data je vrednost intenziteta električnog polja po površini modela glave deteta. Gornja vrednost intenziteta električnog polja u paleti boja je zbog većeg kontrasta podešena na 50V/m. Na desnoj strani slike dat je prikaz površinske raspodele intenziteta električnog polja sa podešenom maksimalnom vrednošću u paleti boja na 100V/m, u cilju vizuelnog poređenja razlike raspodele polja na datoj frekvenciji i raspodele polja na frekvencijama 0.9 GHz, 1.8 GHz i 2.1GHz.

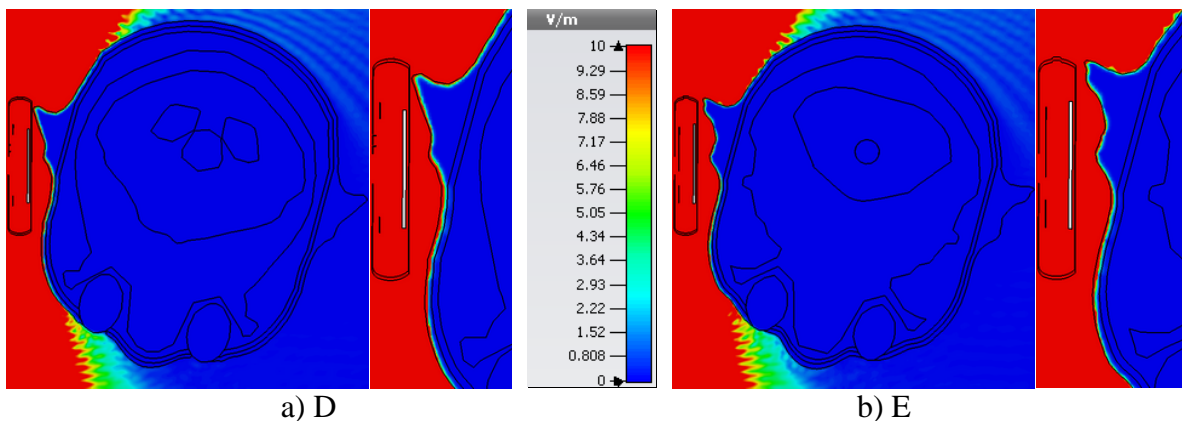
Kao i u slučaju 28GHz opsega referentni granični nivo za intenzitet električnog polja je takođe 24.4V/m. Isto tako sa slika se može videti da su vrednosti polja u delu glave deteta neposredno ispod mobilnog telefona daleko iznad ove granice i to nekoliko puta.



Slika 4.128 Vrednost intenziteta električnog polja  $E[\text{V/m}]$  po površini modela



Slika 4.129 Vrednost intenziteta električnog polja za preseke A i B

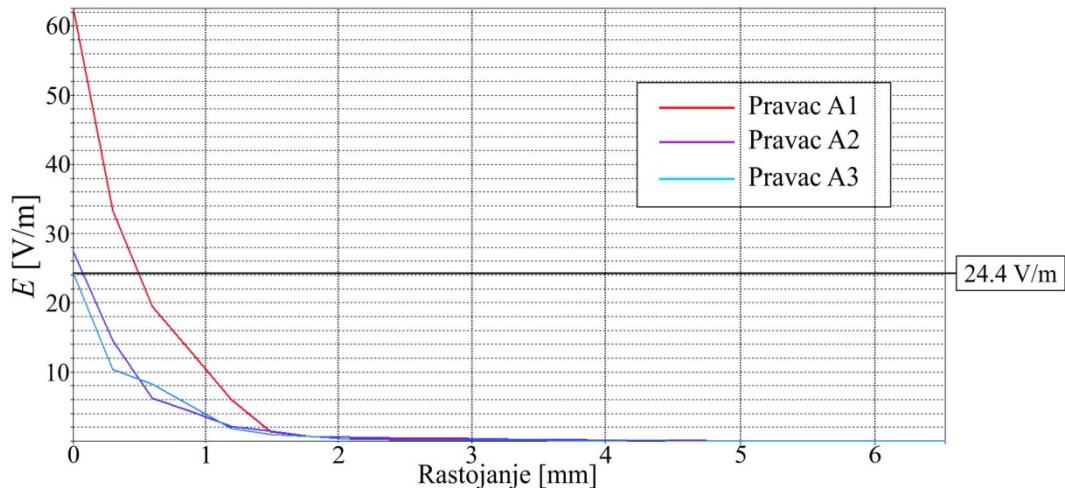


Slika 4.130 Vrednost intenziteta električnog polja za preseke D i E

Na slikama 4.129 i 4.130 data je vrednost intenziteta električnog polja unutar glave modela deteta za više različitih horizontalnih preseka (gornja vrednost u paleti boja je podešena na 10V/m).

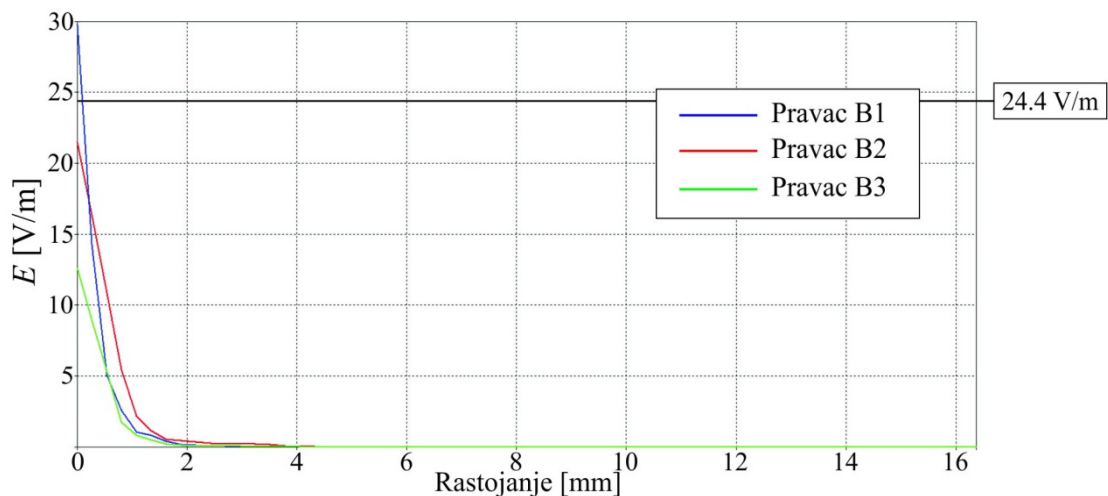
Slično vrednostima intenziteta električnog polja za 28GHz opseg, i ovde su prisutne povišene vrednosti polja samo u površinskom sloju i to samo u koži. Dakle dubina prodiranja polja je manja za ovaj opseg.

Na slikama 4.131-4.134 prikazana je zavisnost vrednosti intenziteta električnog polja od rastojanja za pravce koji pripadaju različitim presecima.



Slika 4.131 Grafik zavisnosti intenziteta električnog polja za presek A duž pravaca A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub> i A<sub>3</sub>

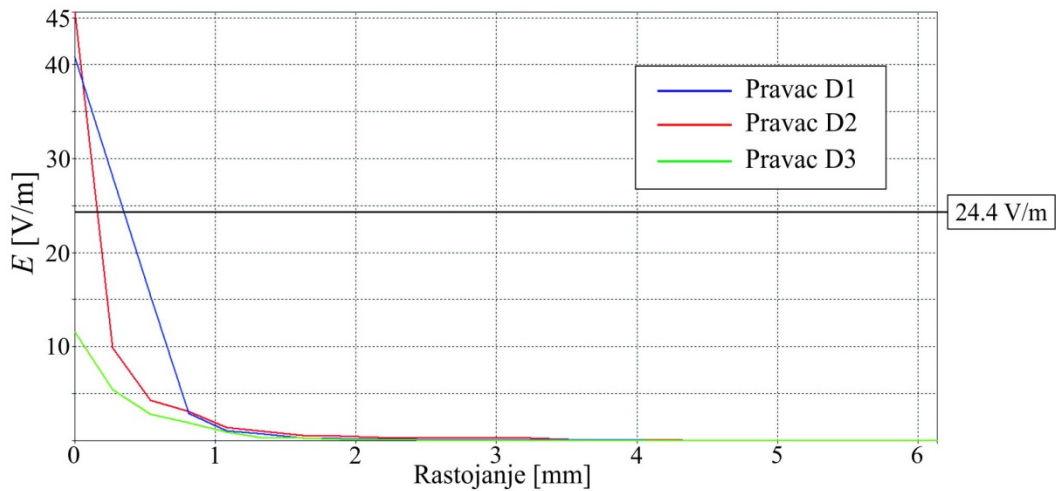
Na slici 4.131 data je vrednost intenziteta električnog polja za presek A. Vidimo da je samo vrednost intenziteta električnog polja u površinskom sloju glave deteta znatno iznad referentnih graničnih nivoa dok je u ostalim slojevima daleko manja. Najviša vrednost intenziteta električnog polja je oko 62V/m na ulazu u kožu glave deteta i ta vrednost brzo opada na oko 2V/m na 1mm i postaje gotovo jednaka nuli već na oko 2mm od mesta ulaska.



Slika 4.132 Grafik zavisnosti intenziteta električnog polja za presek B duž pravaca B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub> i B<sub>3</sub>

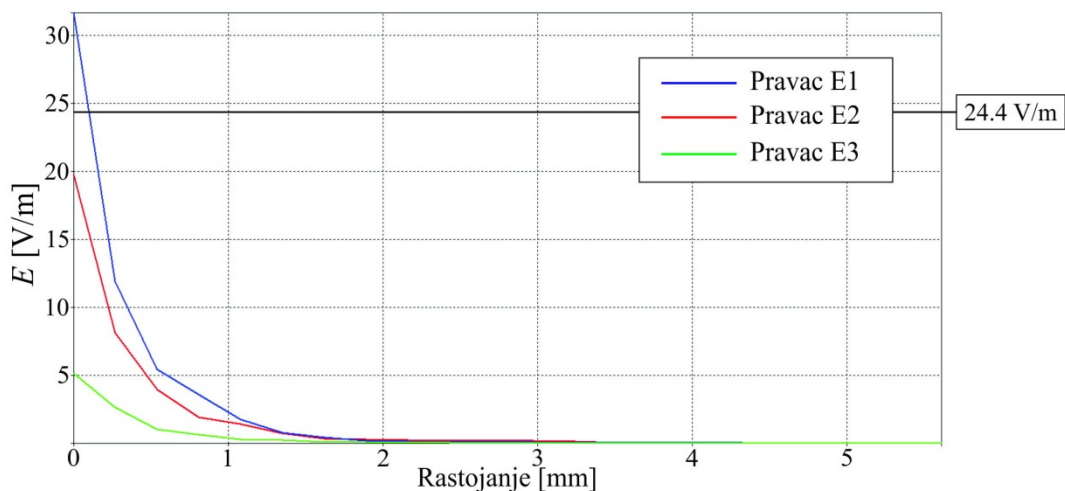
Za presek B situacija je slična kao kod preseka A sa nešto nižim vrednostima polja. Na ulazu je najviša vrednost intenziteta električnog polja oko 30V/m, na 1V/m opada na rastojanju od 2mm i postaje gotovo jednaka nuli na oko 2.5mm.





Slika 4.133 Grafik zavisnosti intenziteta električnog polja za presek D duž pravaca D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub> i D<sub>3</sub>

Kod preseka D najviša vrednost intenziteta električnog polja je oko 46V/m. Ta vrednost se naglo smanjuje i već na oko 1mm je neka 2V/m, a gotovo jednako nuli već na 2mm.



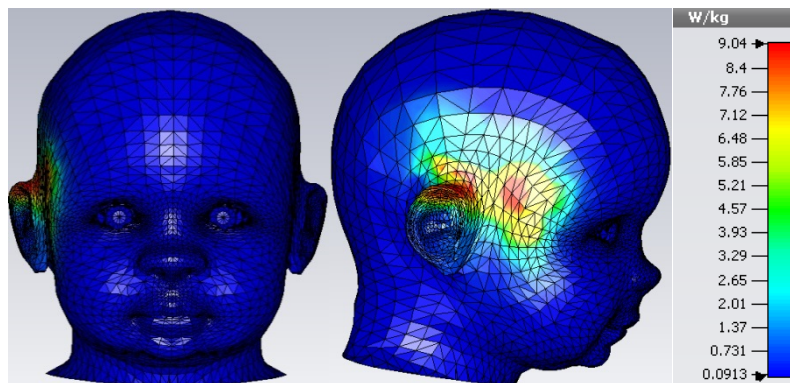
Slika 4.134 Grafik zavisnosti intenziteta električnog polja za presek E duž pravaca E<sub>1</sub>, E<sub>2</sub> i E<sub>3</sub>

Kod preseka E primetna je slična raspodela s tim što su vrednosti polja nešto niže na ulazu oko 33V/m, na oko 1mm je to oko 2.5V/m, a već na 2mm postaju gotovo jednake nuli.

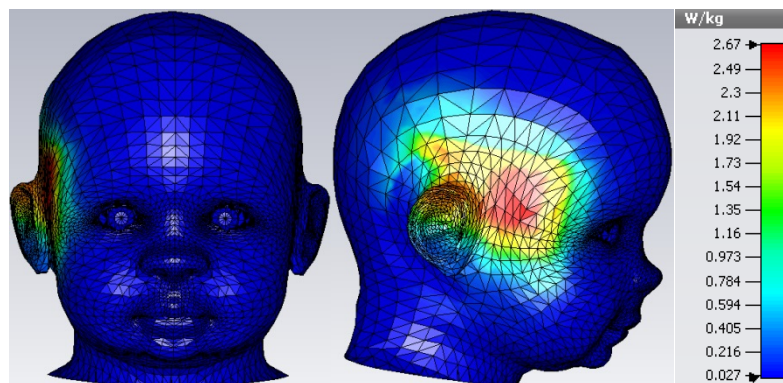
Ono što se može zaključiti na osnovu prethodnih grafika jeste da visoke vrednosti električnog polja postoje samo u sloju kože i možda tankom sloju masnog tkiva, u zoni mobilnog telefona, a da je u svim ostalim tkivima intenzitet električnog polja zanemarljiv ili nula.

#### 4.5.2 Raspodela SAR<sub>1g</sub> i SAR<sub>10g</sub> za $f = 39\text{GHz}$

Na slikama 4.135 i 4.136 dat je prikaz prostorne raspodele SAR<sub>1g</sub> i SAR<sub>10g</sub> i njihova maksimalna vrednost uz samu površinu modela glave deteta. Na slikama 4.137-4.140 prikazana je raspodela SAR<sub>1g</sub> i SAR<sub>10g</sub> unutar glave deteta za različite preseke.

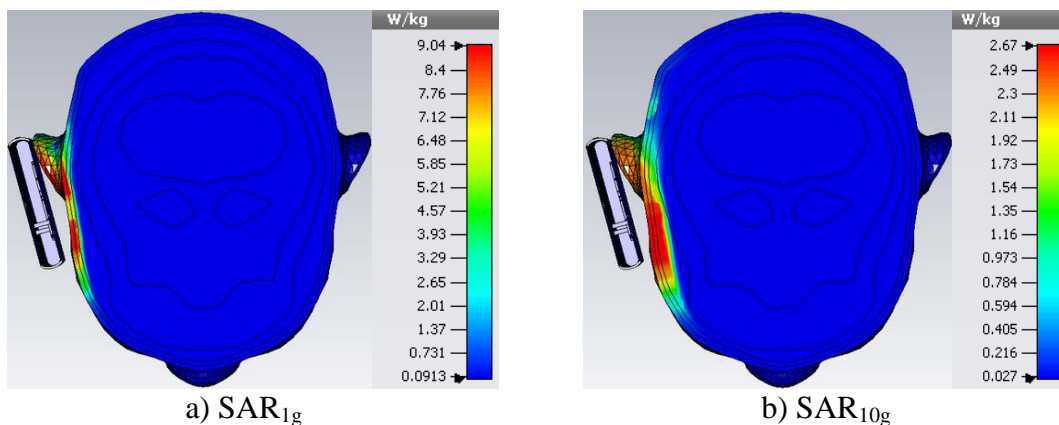


Slika 4.135 Raspodela SAR<sub>1g</sub> uz samu površinu modela

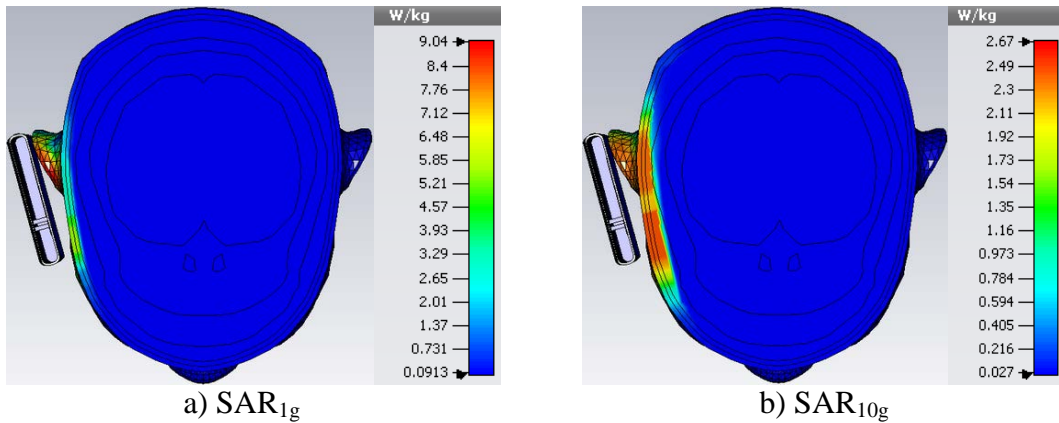


Slika 4.136 Raspodela SAR<sub>10g</sub> uz samu površinu modela

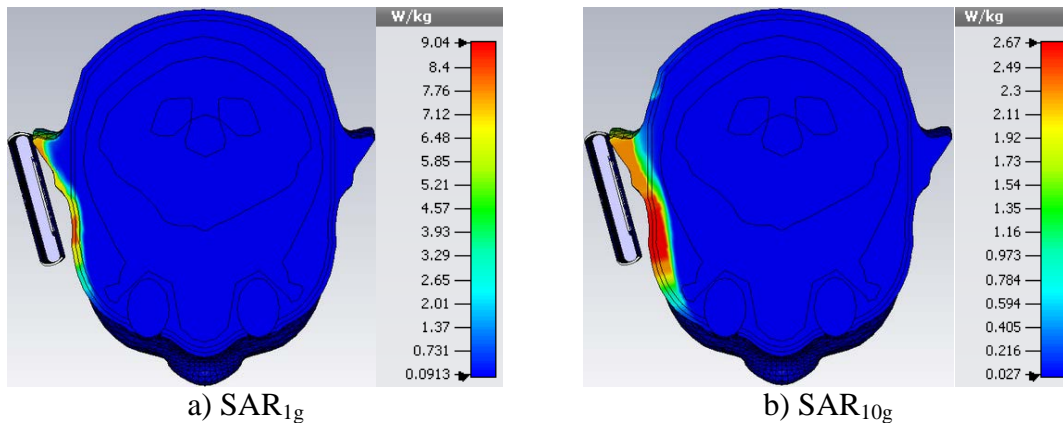
Iz paleta boja može se videti da je maksimalna dobijena vrednost za SAR<sub>1g</sub> 9.04W/kg a za SAR<sub>10g</sub> 2.67W/kg što je iznad bazičnih ograničenja za SAR.



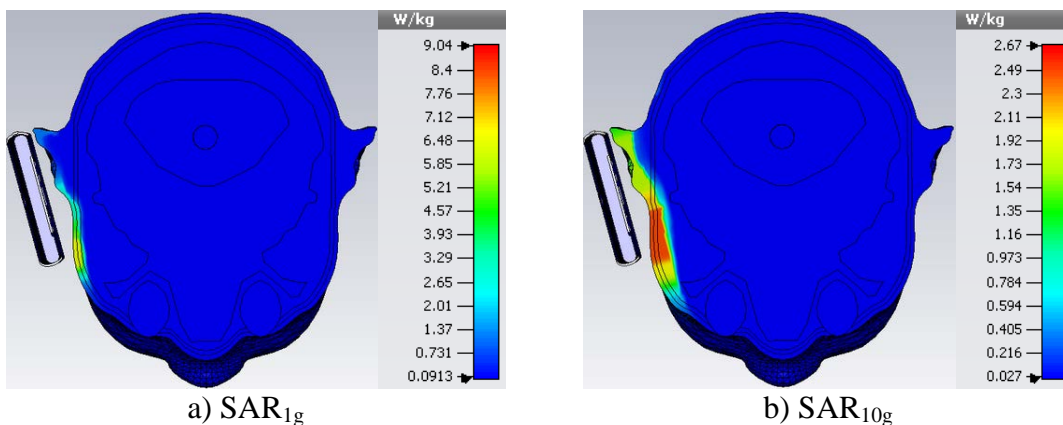
Slika 4.137 Raspodela SAR<sub>1g</sub> i SAR<sub>10g</sub> za horizontalni presek A



Slika 4.138 Raspodela SAR<sub>1g</sub> i SAR<sub>10g</sub> za horizontalni presek B



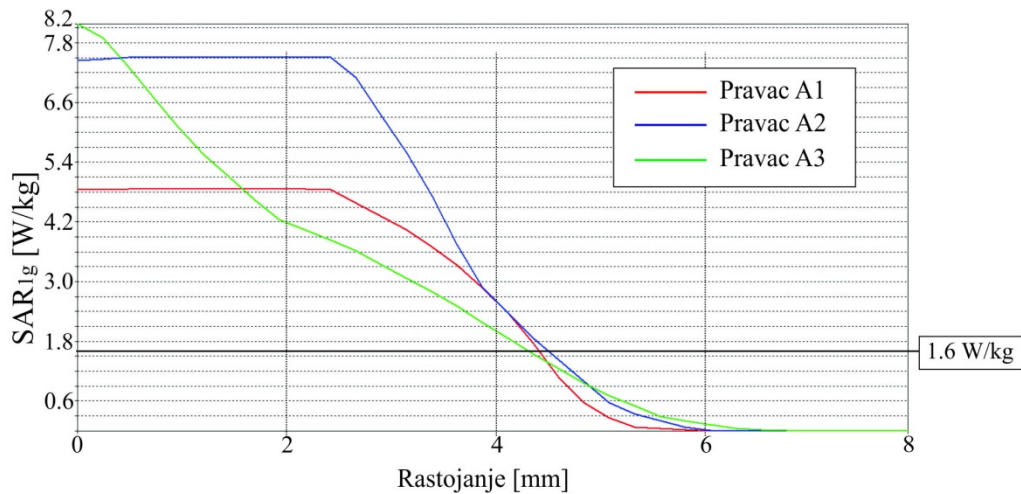
Slika 4.139 Raspodela SAR<sub>1g</sub> i SAR<sub>10g</sub> za horizontalni presek D



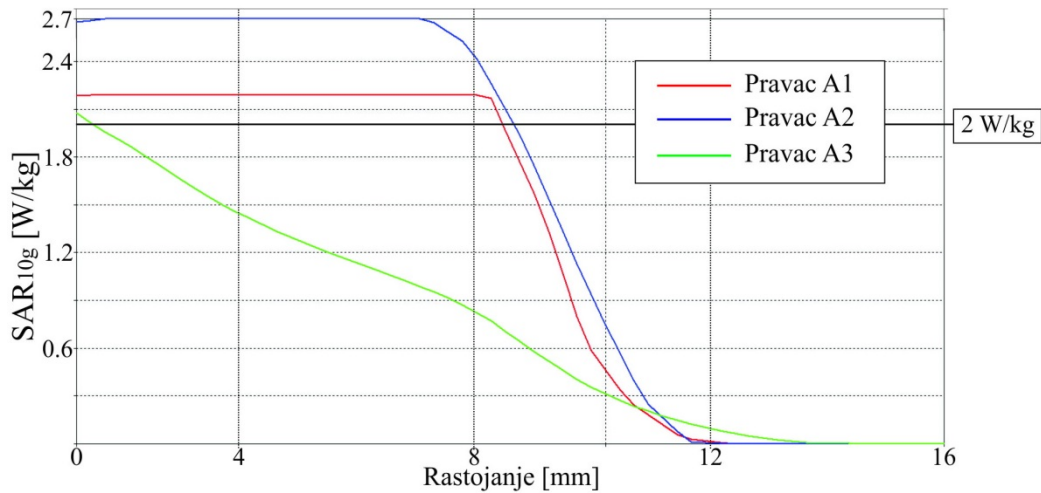
Slika 4.140 Raspodela SAR<sub>1g</sub> i SAR<sub>10g</sub> za horizontalni presek E

Dubina prodiranja elektromagnetskog talasa je kao i kod 28GHz opsega ograničena na površinske slojeve glave deteta, na kožu, masno tkivo, mišiće i mali deo lobanje. Na osnovu slika možemo primetiti da su vrednosti bazičnih ograničenja za SAR<sub>1g</sub> u površinskim slojevima premašena i do 5.5 puta, dok je za SAR<sub>10g</sub> to oko 1.4 puta.

Na slikama 4.141-4.148 data je zavisnost vrednosti SAR<sub>1g</sub> i SAR<sub>10g</sub> od rastojanja za različite preseke.

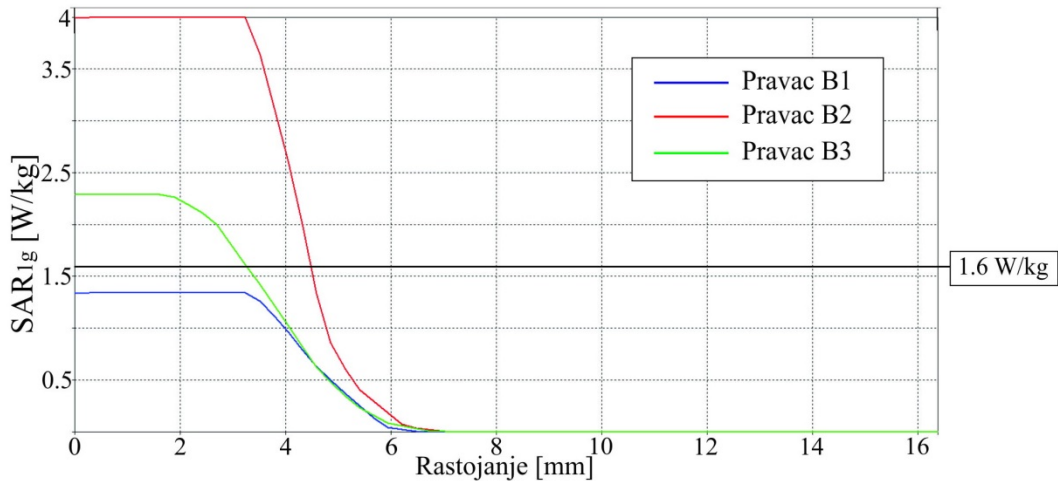


Slika 4.141 Grafik raspodele  $SAR_{1g}$  za presek A duž pravaca  $A_1$ ,  $A_2$  i  $A_3$

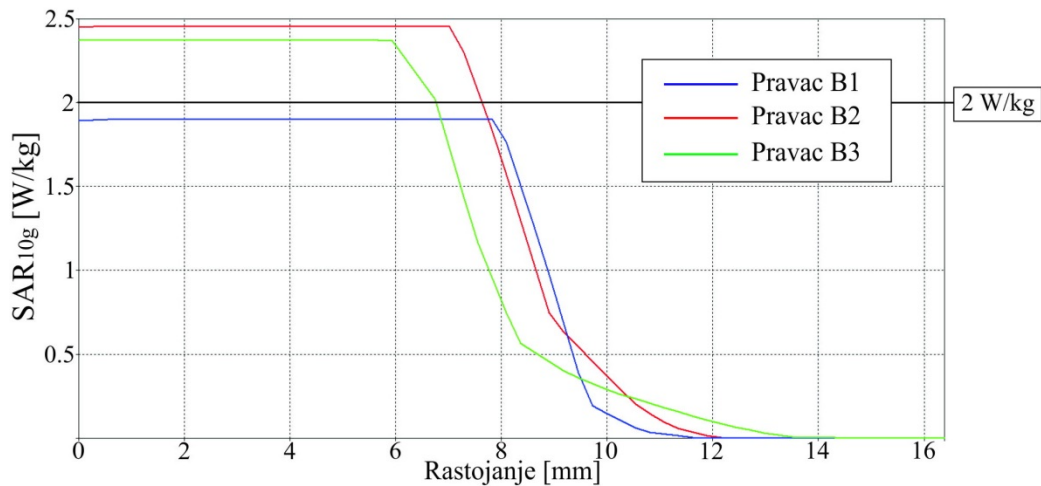


Slika 4.142 Grafik raspodele  $SAR_{10g}$  za presek A duž pravaca  $A_1$ ,  $A_2$  i  $A_3$

Sa grafika raspodele za  $SAR_{1g}$  i  $SAR_{10g}$  za presek A vidimo da su vrednosti za SAR u oba slučaja iznad vrednosti bazičnih ograničenja. U slučaju  $SAR_{1g}$  to premašenje je gotovo 5 puta dok je u slučaju  $SAR_{10g}$  gotovo 1.4 puta. Za  $SAR_{1g}$  visoke vrednosti su prisutne u tkivima do dubine od oko 4.5mm nakon čega vrednost pada ispod vrednosti bazičnog ograničenja, dok je kod  $SAR_{10g}$  to do oko 8.5mm.

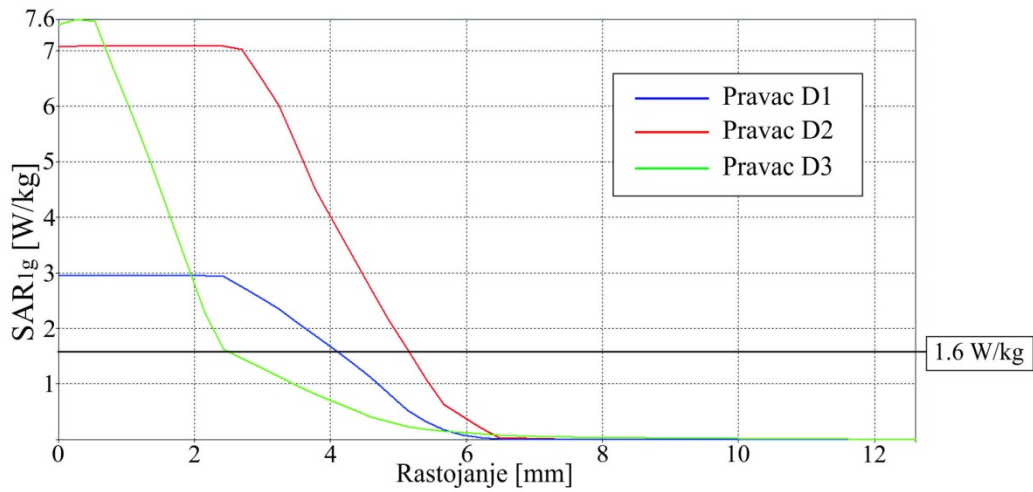


Slika 4.143 Grafik raspodele  $SAR_{1g}$  za presek B duž pravaca  $B_1$ ,  $B_2$  i  $B_3$

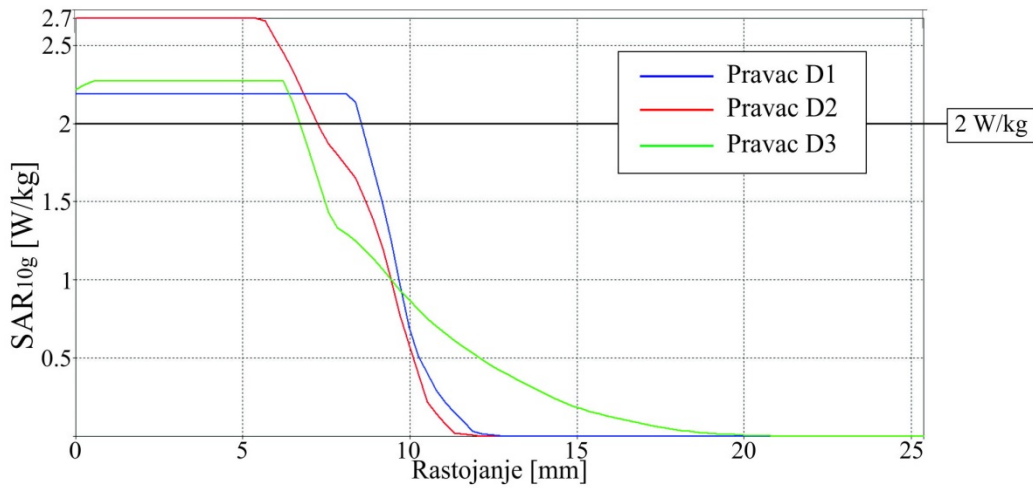


Slika 4.144 Grafik raspodele  $SAR_{10g}$  za presek B duž pravaca  $B_1$ ,  $B_2$  i  $B_3$

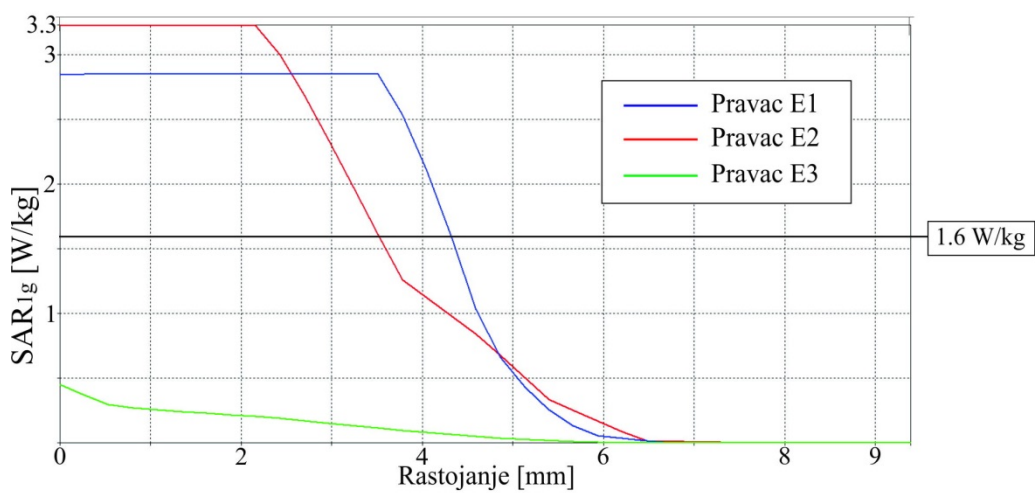
Kod preseka B premašenje vrednosti za  $SAR_{1g}$  je oko 2.5 puta dok je u slučaju  $SAR_{10g}$  oko 1.2 puta. Za  $SAR_{1g}$  visoke vrednosti su prisutne u tkivima do dubine od oko 4.5mm nakon čega vrednost pada ispod vrednosti bazičnog ograničenja, dok je kod  $SAR_{10g}$  to do oko 7.7mm. Rastojanje do koga se apsorbuje sva elektromagnetska energija je u prvom slučaju oko 7mm a u drugom oko 13.5mm.



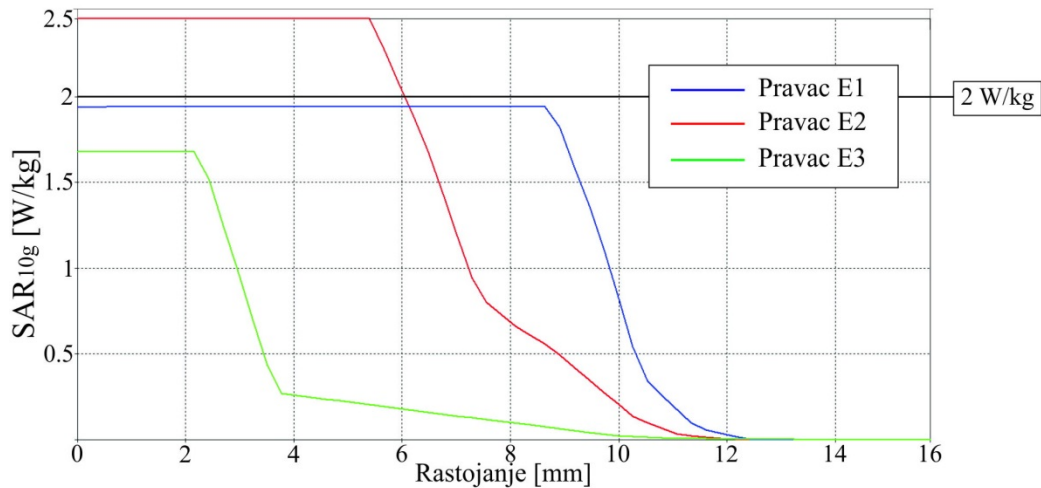
Slika 4.145 Grafik raspodele SAR<sub>1g</sub> za presek D duž pravaca D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub> i D<sub>3</sub>



Slika 4.146 Grafik raspodele SAR<sub>10g</sub> za presek D duž pravaca D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub> i D<sub>3</sub>



Slika 4.147 Grafik raspodele SAR<sub>1g</sub> za presek E duž pravaca E<sub>1</sub>, E<sub>2</sub> i E<sub>3</sub>



Slika 4.148 Grafik raspodele SAR<sub>10g</sub> za presek E duž pravaca E<sub>1</sub>, E<sub>2</sub> i E<sub>3</sub>

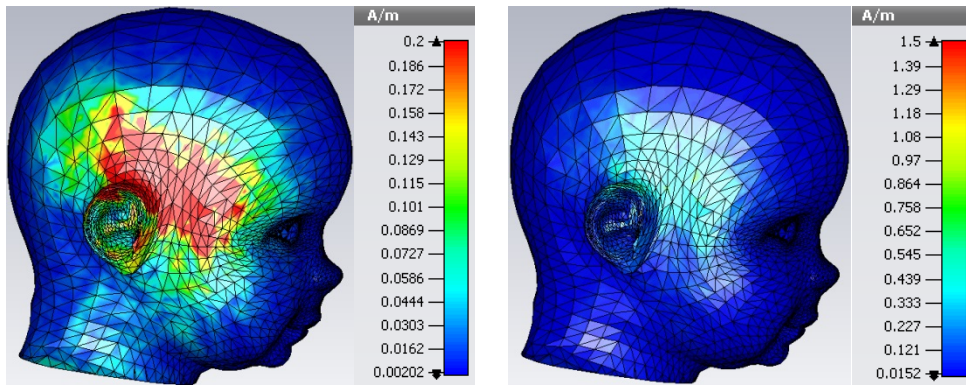
U slučaju preseka D premašenje vrednosti za SAR<sub>1g</sub> je oko 4.8 puta dok je u slučaju SAR<sub>10g</sub> oko 1.3 puta. Za SAR<sub>1g</sub> visoke vrednosti su prisutne u tkivima do dubine od oko 5.3mm nakon čega vrednost pada ispod vrednosti bazičnog ograničenja, dok je kod SAR<sub>10g</sub> to do oko 8mm. Rastojanje do koga se apsorbuje sva elektromagnetska energija je u prvom slučaju oko 6.5mm a u drugom oko 20mm.

Za presek E premašenje vrednosti za SAR<sub>1g</sub> je oko 2 puta dok je u slučaju SAR<sub>10g</sub> oko 1.2 puta. Za SAR<sub>1g</sub> visoke vrednosti su prisutne u tkivima do dubine od oko 4.3mm nakon čega vrednost pada ispod vrednosti bazičnog ograničenja, dok je kod SAR<sub>10g</sub> to do oko 6mm i neznatno ispod 2W/kg do oko 8.6mm. Rastojanje do koga se apsorbuje sva elektromagnetska energija je u prvom slučaju oko 6.5mm a u drugom oko 12.3mm.

#### 4.5.3 Vrednost jačine magnetskog polja za $f = 39\text{GHz}$

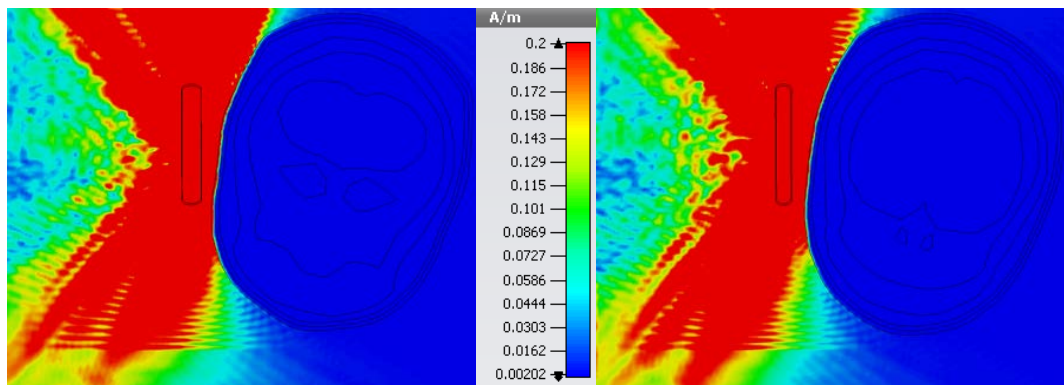
Na slici 4.149 date su vrednosti jačine magnetskog polja po površini modela glave deteta. Gornja vrednost jačine magnetskog polja u paleti boja je zbog većeg kontrasta podešena na 0.2A/m. Na desnoj strani slike dat je prikaz površinske raspodele jačine magnetskog polja sa podešenom maksimalnom vrednošću u paleti boja na 1.5A/m, u cilju vizuelnog poređenja razlike raspodele polja na datoj frekvenciji i raspodele polja na frekvencijama 0.9 GHz, 1.8 GHz i 2.1GHz.

Na slikama 4.150 i 4.151 date su vrednosti jačine magnetskog polja unutar glave deteta za različite preseke.



Slika 4.149 Jačina magnetskog polja  $H$  [A/m] po površini modela

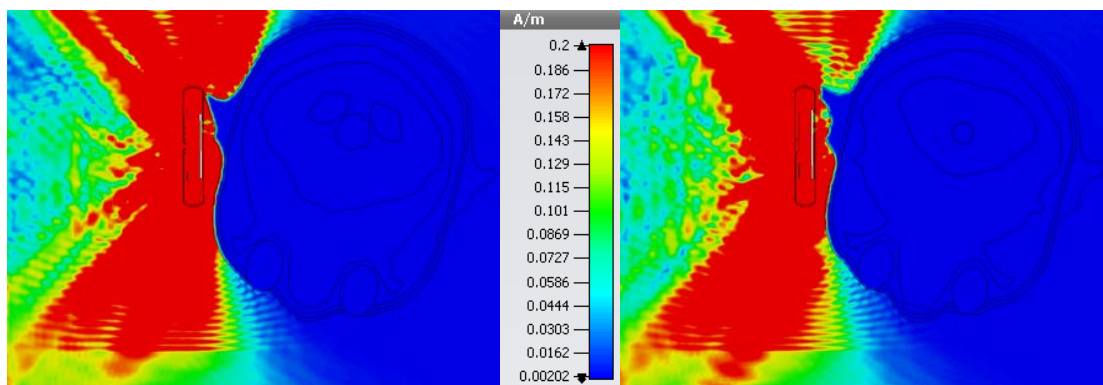
Kako je referentni granični nivo za jačinu magnetskog polja na 39GHz 0.064A/m, kao i u slučaju intenziteta električnog polja premašenje ove vrednosti je prisutno samo u površinskom sloju glave deteta, tj. u koži i delu masnog tkiva. U ostalim slojevima ove vrednosti su daleko niže ili zanemarljive.



a) A

b) B

Slika 4.150 Jačina magnetskog polja za preseke A i B



a) D

b) E

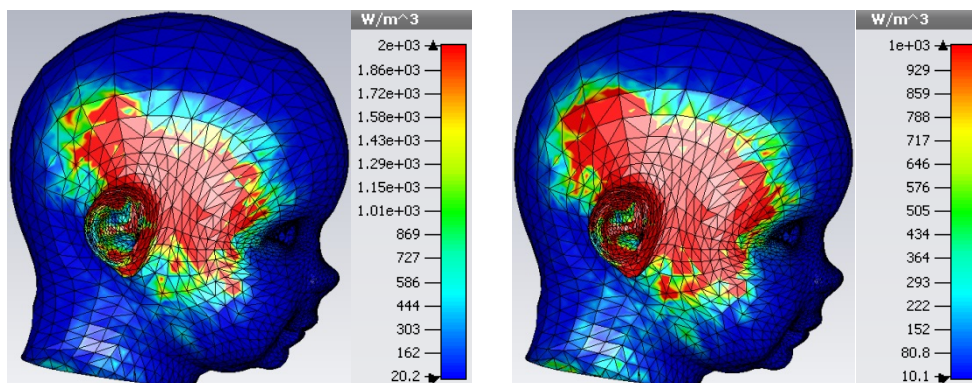
Slika 4.151 Jačina magnetskog polja za preseke D i E



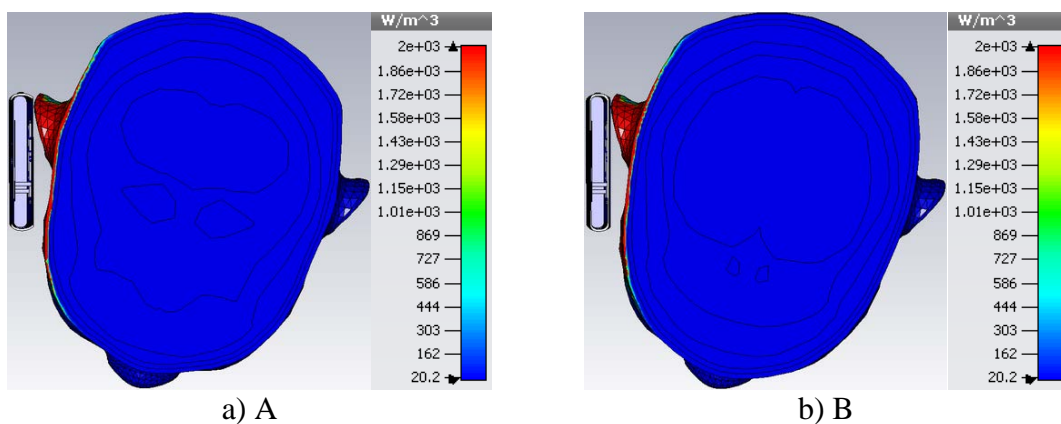
#### 4.5.4 Raspodela gustine snage gubitaka za $f = 39$ GHz

Na slici 4.152 dat je prikaz prostorne raspodele gustine snage gubitaka uz samu površinu modela glave deteta. Gornja vrednost gustine snage gubitaka u paleti boja je zbog većeg kontrasta podešena na  $2000\text{W/m}^3$ . Na desnoj strani slike dat je prikaz površinske raspodele gustine snage gubitaka sa podešenom maksimalnom vrednošću u paleti boja na  $1000\text{W/m}^3$ , u cilju vizuelnog poređenja razlike raspodele gustine snage gubitaka na datoj frekvenciji i raspodele na frekvencijama 0.9 GHz, 1.8 GHz i 2.1GHz.

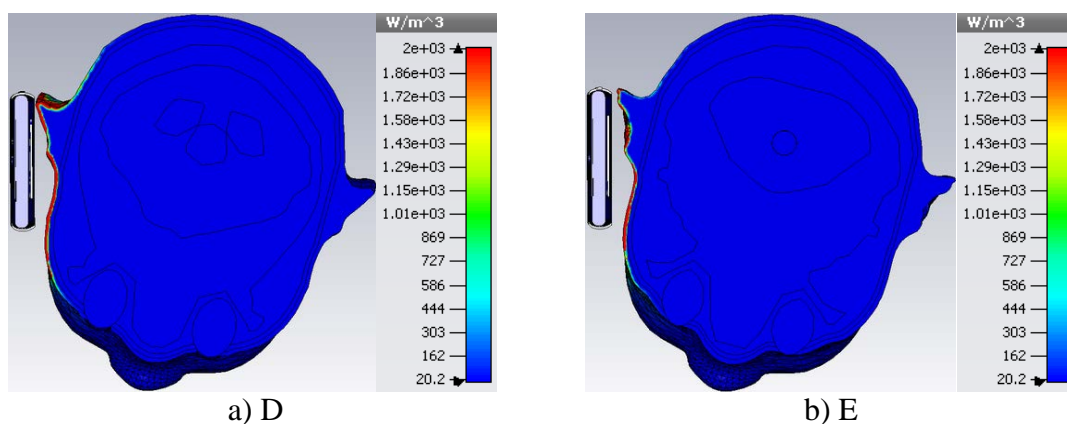
Na slikama 4.153 i 4.154 data je raspodela gustine snage gubitaka unutar glave deteta za različite preseke.



Slika 4.152 Raspodela gustine snage gubitaka uz samu površinu modela



Slika 4.153 Raspodela gustine snage gubitaka za preseke A i B



Slika 4.154 Raspodela gustine snage gubitaka za preseke D i E

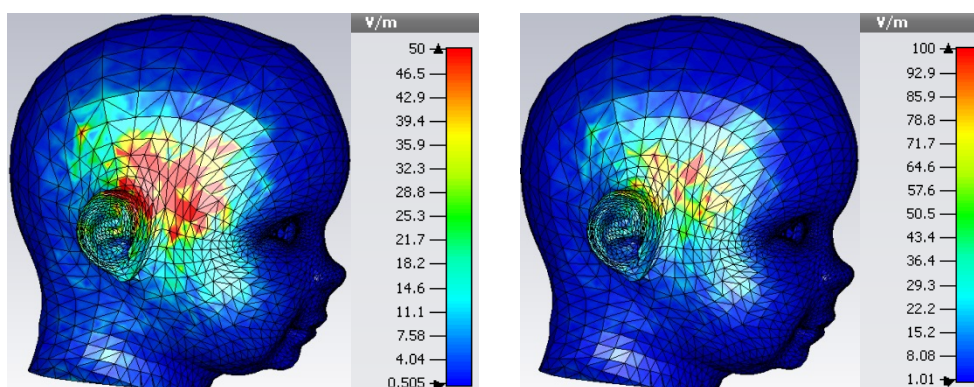
I u slučaju ove frekvencije, visoke vrednosti gustine snage gubitaka prisutne su samo u površinskim slojevima glave deteta u okolini telefona, prvenstveno u koži i manjem delu masnog tkiva.

## 4.6 Raspodela elektromagnetskog polja za $f = 73\text{GHz}$

### 4.6.1 Vrednost intenziteta električnog polja za $f = 73\text{GHz}$

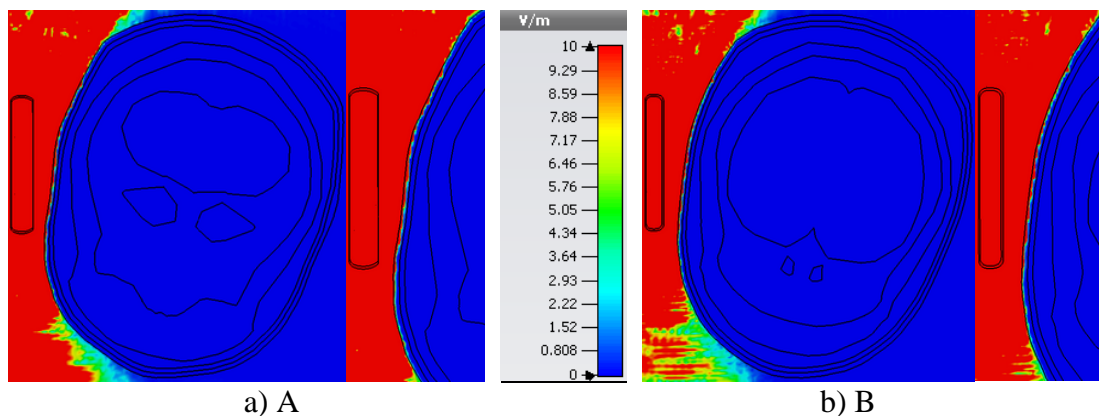
Na slici 4.155 data je vrednost intenziteta električnog polja po površini modela glave deteta. Gornja vrednost intenziteta električnog polja u paleti boja je zbog većeg kontrasta podešena na  $50\text{V/m}$ . Na desnoj strani slike dat je prikaz površinske raspodele intenziteta električnog polja sa podešenom maksimalnom vrednošću u paleti boja na  $100\text{V/m}$ , u cilju vizuelnog poređenja razlike raspodele polja na datoj frekvenciji i raspodele polja na frekvencijama  $0.9\text{GHz}$ ,  $1.8\text{GHz}$  i  $2.1\text{GHz}$ .

Za ovaj opseg frekvencija referentni granični nivo za intenzitet električnog polja je  $24.4\text{V/m}$ . Sa slika se može videti da su vrednosti polja u određenim oblastima glave deteta daleko iznad ove granice.

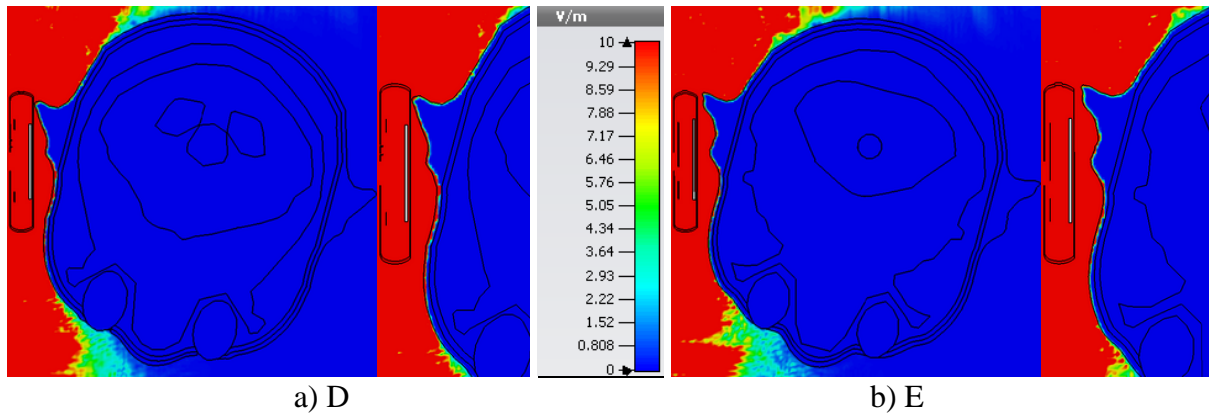


Slika 4.155 Vrednost intenziteta električnog polja  $E[\text{V/m}]$  po površini modela

Na slikama 4.156 i 4.157 data je vrednost intenziteta električnog polja unutar glave modela deteta za više različitih horizontalnih preseka (gornja vrednost u paleti boja je podešena na  $10\text{V/m}$ ).



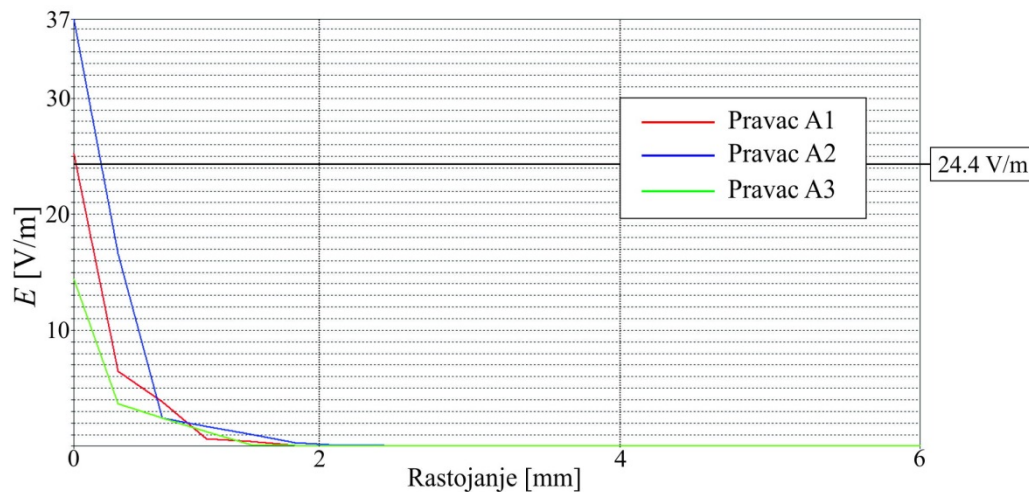
Slika 4.156 Vrednost intenziteta električnog polja za preseke A i B



Slika 4.157 Vrednost intenziteta električnog polja za preseke D i E

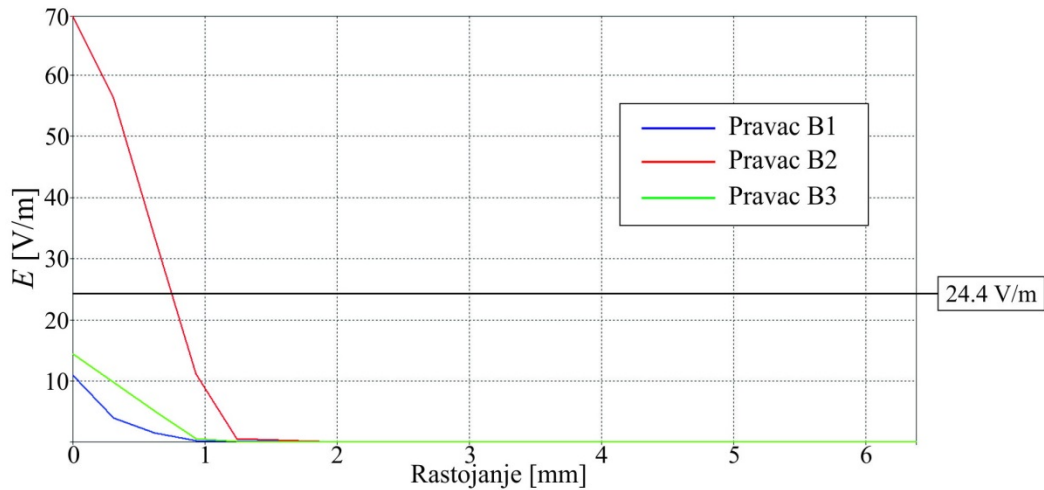
Kao i kod vrednosti intenziteta električnog polja za 28GHz i 39GHz opseg, i ovde su prisutne povišene vrednosti intenziteta električnog polja samo u površinskom sloju i to samo u koži. Možemo zaključiti da je dubina prodiranja najmanja za ovaj opseg što se i očekivalo.

Na slikama 4.158-4.161 prikazana je zavisnost vrednosti električnog polja od rastojanja za pravce koji pripadaju različitim presecima.



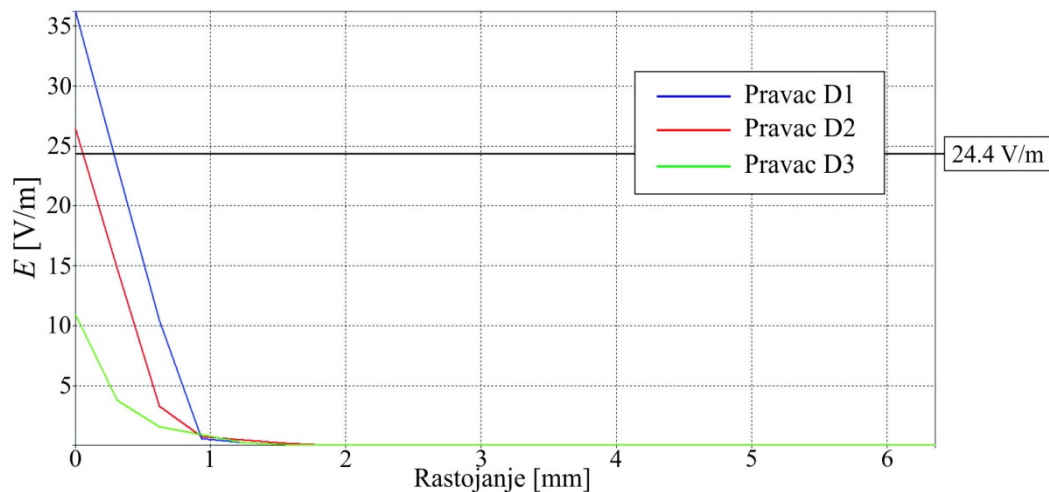
Slika 4.158 Grafik zavisnosti intenziteta električnog polja za presek A duž pravaca A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub> i A<sub>3</sub>

Na slici 4.158 data je vrednost intenziteta električnog polja za presek A. Vidimo da je samo vrednost intenziteta električnog polja u površinskom sloju glave deteta znatno iznad referentnog graničnog nivoa dok je u ostalim slojevima daleko manja. Najviša vrednost intenziteta električnog polja je oko 37V/m na ulazu u kožu glave deteta. Ta vrednost intenziteta električnog polja brzo opada na oko 2V/m na 1mm i postaje gotovo jednaka nuli već na oko 1.8mm od površine glave deteta.



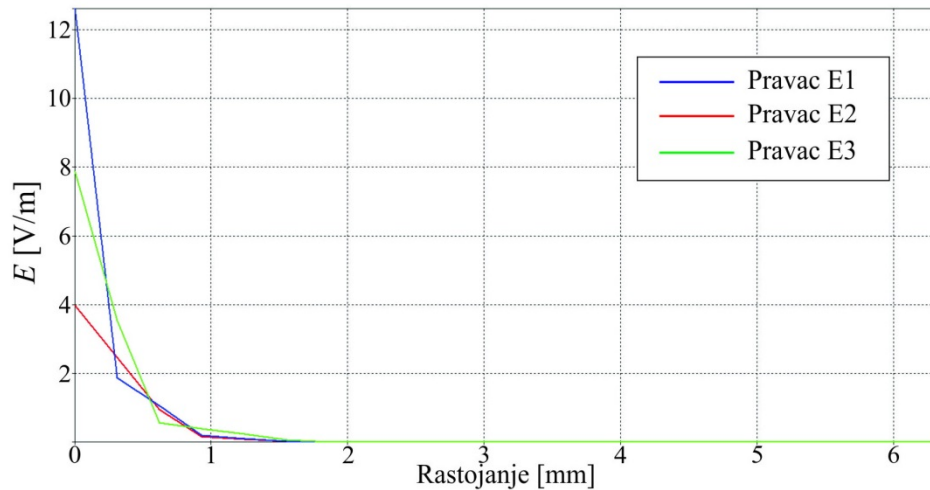
Slika 4.159 Grafik zavisnosti intenziteta električnog polja za presek B duž pravaca B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub> i B<sub>3</sub>

Kod preseka B prisutne su više vrednosti intenziteta električnog polja u odnosu na presek A. Na ulazu je najviša vrednost intenziteta električnog polja oko 70V/m, na 1mm to je oko 9V/m dok na oko 1.3mm vrednosti intenziteta električnog polja postaje jednaka nuli.



Slika 4.160 Grafik zavisnosti intenziteta električnog polja za presek D duž pravaca D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub> i D<sub>3</sub>

Za presek D najviša vrednost intenziteta električnog polja je oko 36V/m. Ta vrednost se naglo smanjuje i već na oko 1mm je ispod 1V/m, a gotovo jednako nuli već na 1.5mm.



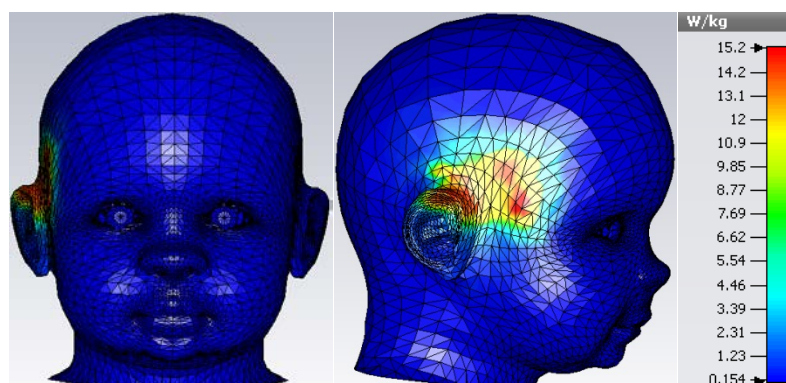
Slika 4.161 Grafik zavisnosti intenziteta električnog polja za presek E duž pravaca E<sub>1</sub>, E<sub>2</sub> i E<sub>3</sub>

Kod preseka E pronađene su najniže vrednosti intenziteta električnog polja na ulazu u odnosu na prethodne preseke. Ta vrednost je oko 34V/m, na oko 1mm je to oko 0.4V/m, a već na 1.5mm postaje jednaka nuli.

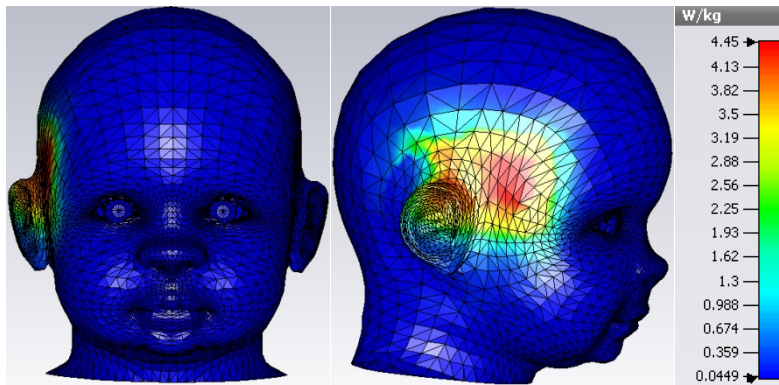
Ono što se može zaključiti na osnovu prethodnih grafika jeste da visoke vrednosti intenziteta električnog polja postoje samo u sloju kože, u zoni mobilnog telefona, a da je u svim ostalim tkivima intenzitet električnog polja zanemarljiv ili nula.

#### 4.6.2 Raspodela SAR<sub>1g</sub> i SAR<sub>10g</sub> za $f = 73\text{GHz}$

Na slikama 4.162 i 4.163 data je raspodela vrednosti SAR<sub>1g</sub> i SAR<sub>10g</sub> uz samu površinu modela glave deteta. Na slikama 4.164-4.167 prikazana je raspodela SAR<sub>1g</sub> i SAR<sub>10g</sub> unutar glave deteta za različite preseke.

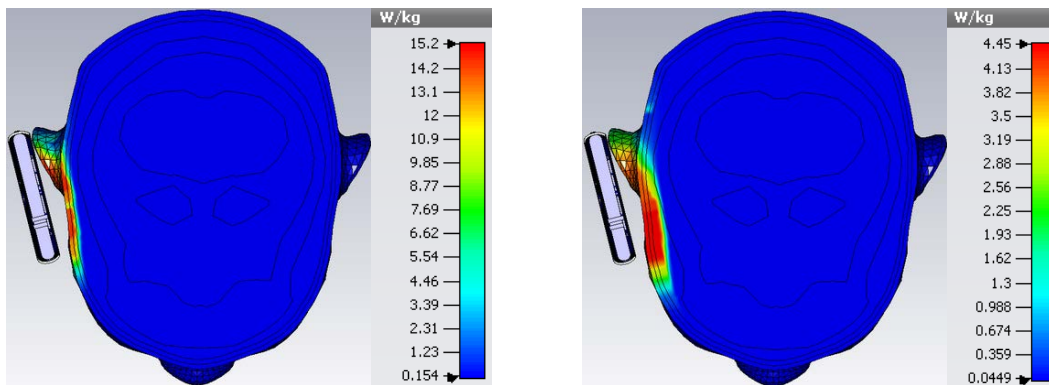


Slika 4.162 Raspodela SAR<sub>1g</sub> uz samu površinu modela



Slika 4.163 Raspodela SAR<sub>10g</sub> uz samu površinu modela

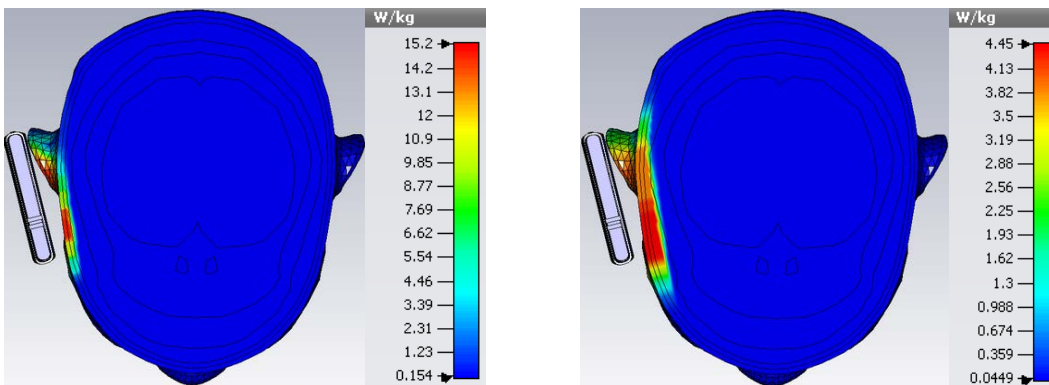
Na osnovu paleta boja može se videti da je maksimalna dobijena vrednost za SAR<sub>1g</sub> 15.2W/kg, a za SAR<sub>10g</sub> 4.45W/kg što je znatno iznad vrednosti bazičnih ograničenja za SAR. Kako je dubina penetracije elektromagnetskog talasa najmanja za ovaj opseg frekvencija bilo je i za očekivati da će u površinskim slojevima glave biti visoke vrednosti za SAR.



a) SAR<sub>1g</sub>

b) SAR<sub>10g</sub>

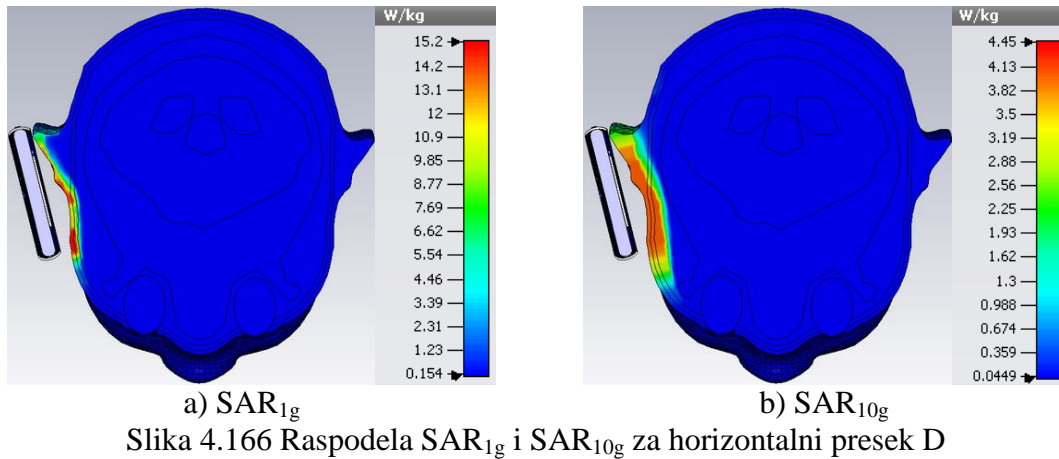
Slika 4.164 Raspodela SAR<sub>1g</sub> i SAR<sub>10g</sub> za horizontalni presek A



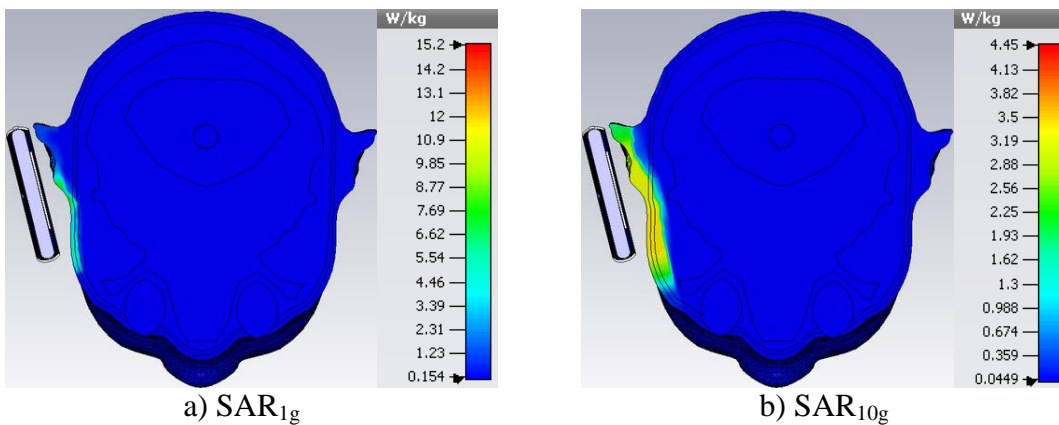
a) SAR<sub>1g</sub>

b) SAR<sub>10g</sub>

Slika 4.165 Raspodela SAR<sub>1g</sub> i SAR<sub>10g</sub> za horizontalni presek B



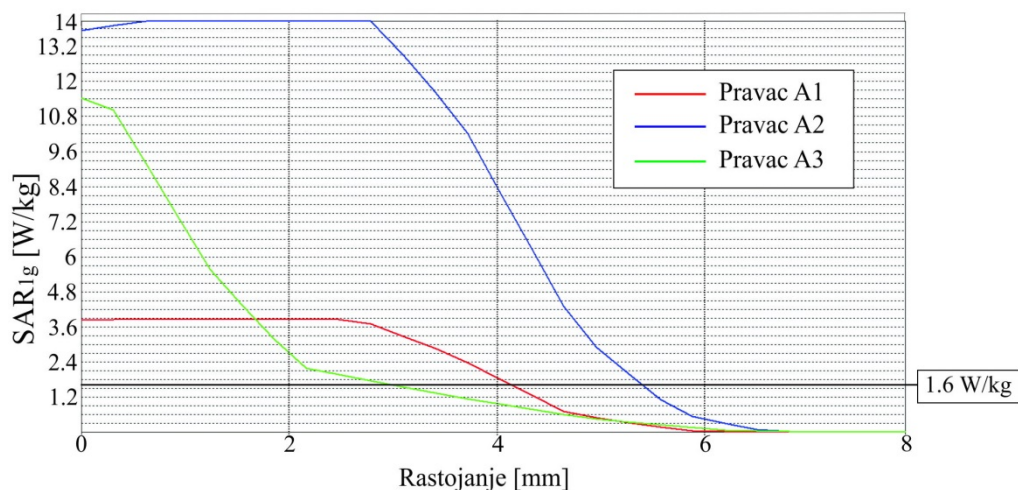
Slika 4.166 Raspodela SAR<sub>1g</sub> i SAR<sub>10g</sub> za horizontalni presek D



Slika 4.167 Raspodela SAR<sub>1g</sub> i SAR<sub>10g</sub> za horizontalni presek E

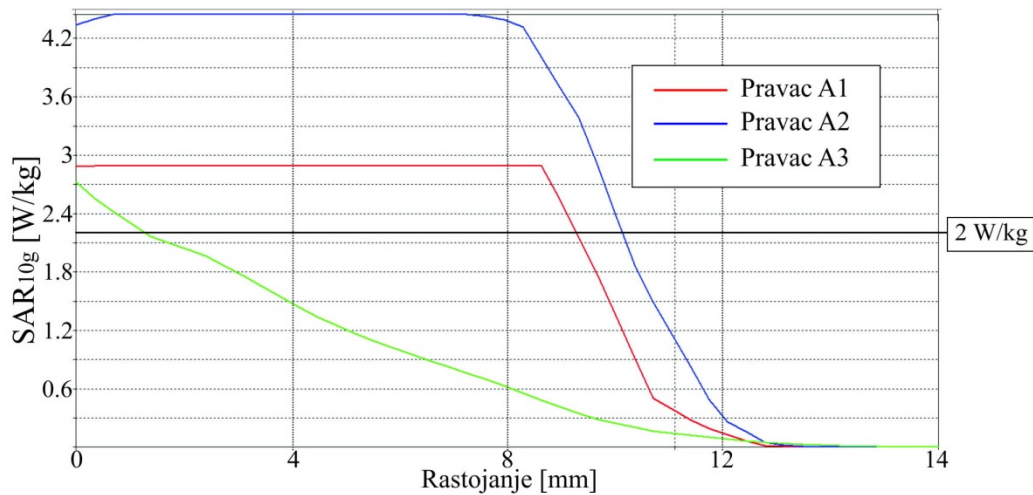
Dubina prodiranja elektromagnetskog talasa je kao i kod 39GHz ograničena na površinske slojeve glave deteta, na kožu, masno tkivo, mišiće glave i mali deo lobanje. Na osnovu slika možemo primetiti da je vrednost bazičnog ograničenja za SAR<sub>1g</sub> u površinskim slojevima premašena 3 do 9 puta, dok je za SAR<sub>10g</sub> to od oko 1.5 do 2.2 puta.

Na slikama 4.168-4.175 data je zavisnost vrednosti SAR<sub>1g</sub> i SAR<sub>10g</sub> od rastojanja za različite preseke.



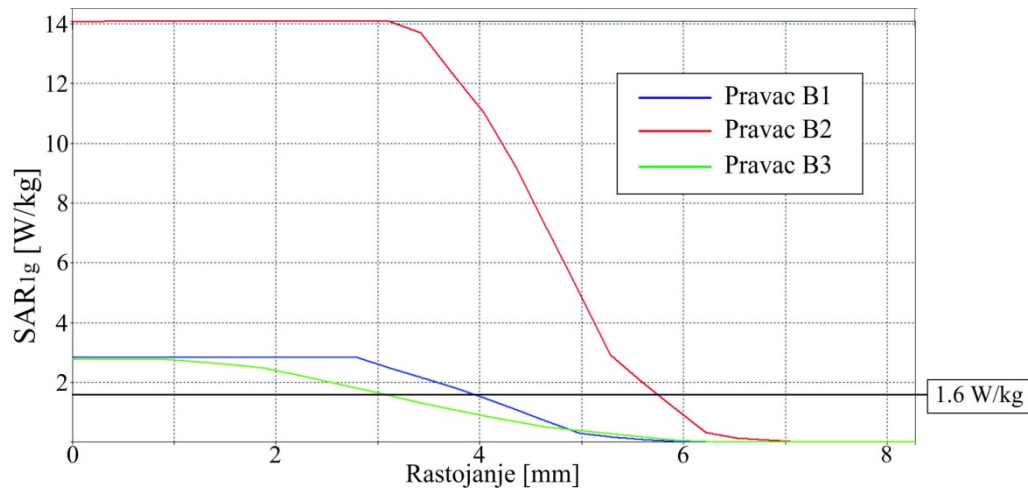
Slika 4.168 Grafik raspodele SAR<sub>1g</sub> za presek A duž pravaca A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub> i A<sub>3</sub>



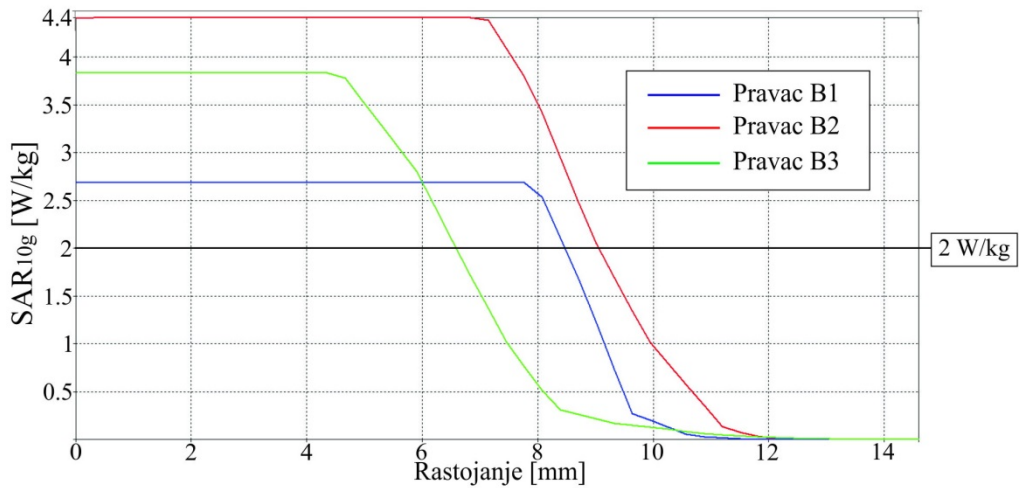


Slika 4.169 Grafik raspodele SAR<sub>10g</sub> za presek A duž pravaca A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub> i A<sub>3</sub>

Sa grafika raspodele za SAR<sub>1g</sub> i SAR<sub>10g</sub> za presek A vidimo da su vrednosti za SAR u oba slučaja iznad vrednosti bazičnih ograničenja. U slučaju SAR<sub>1g</sub> to premašenje je i do 8.7 puta dok je u slučaju SAR<sub>10g</sub> oko 2.1 puta. Za SAR<sub>1g</sub> visoke vrednosti su prisutne u tkivima do dubine od oko 5.5mm nakon čega vrednost pada ispod vrednosti bazičnog ograničenja, dok je kod SAR<sub>10g</sub> to do oko 10.5mm. Rastojanje do koga se apsorbira sva elektromagnetska energija je u prvom slučaju oko 6.7mm a u drugom oko 12.5mm.

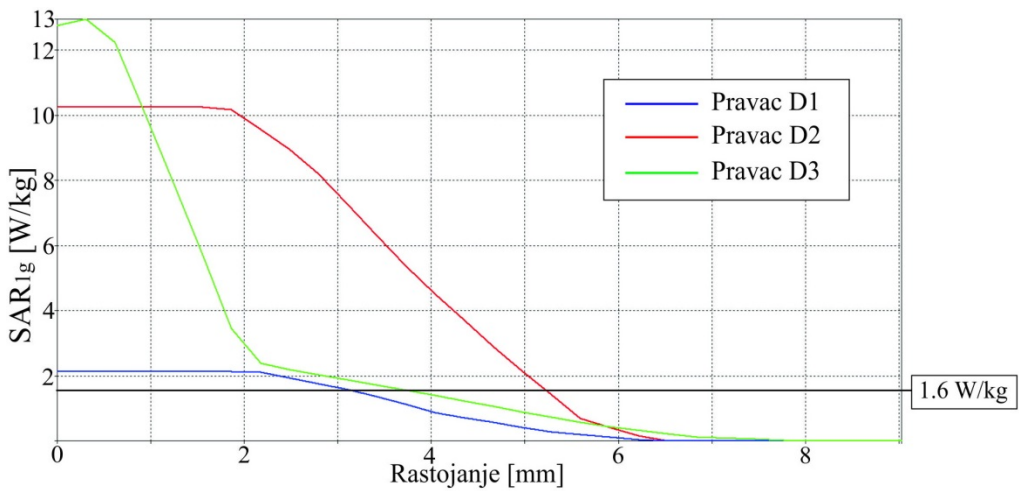


Slika 4.170 Grafik raspodele SAR<sub>1g</sub> za presek B duž pravaca B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub> i B<sub>3</sub>

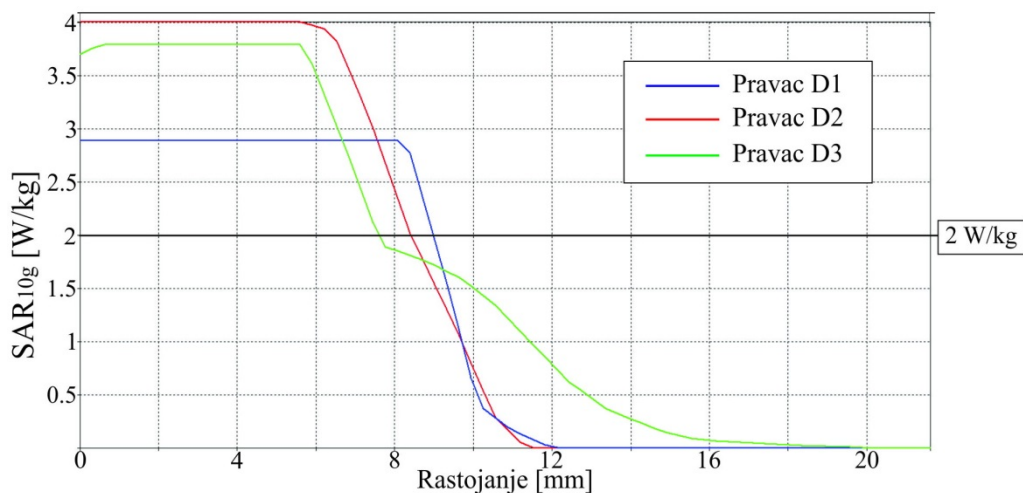


Slika 4.171 Grafik raspodele SAR<sub>10g</sub> za presek B duž pravaca B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub> i B<sub>3</sub>

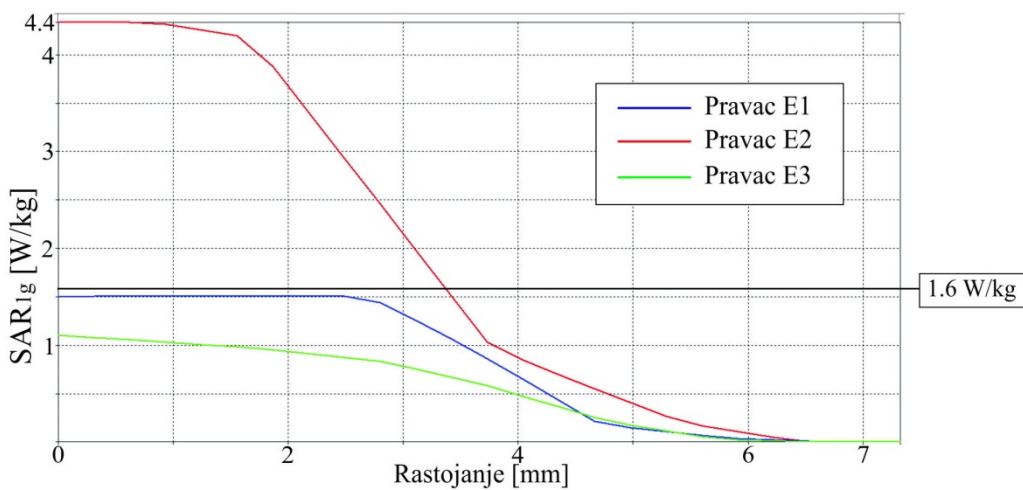
Kod preseka B premašenje vrednosti za SAR<sub>1g</sub> je 8.7 puta dok je u slučaju SAR<sub>10g</sub> oko 2.2 puta. Za SAR<sub>1g</sub> visoke vrednosti su prisutne u tkivima do dubine od oko 5.8mm nakon čega vrednost pada ispod 1.6W/kg, dok su kod SAR<sub>10g</sub> više vrednosti od 2W/kg prisutna do oko 9mm. Rastojanje do koga se apsorbuje sva elektromagnetska energija je u prvom slučaju oko 7mm a u drugom oko 12mm.



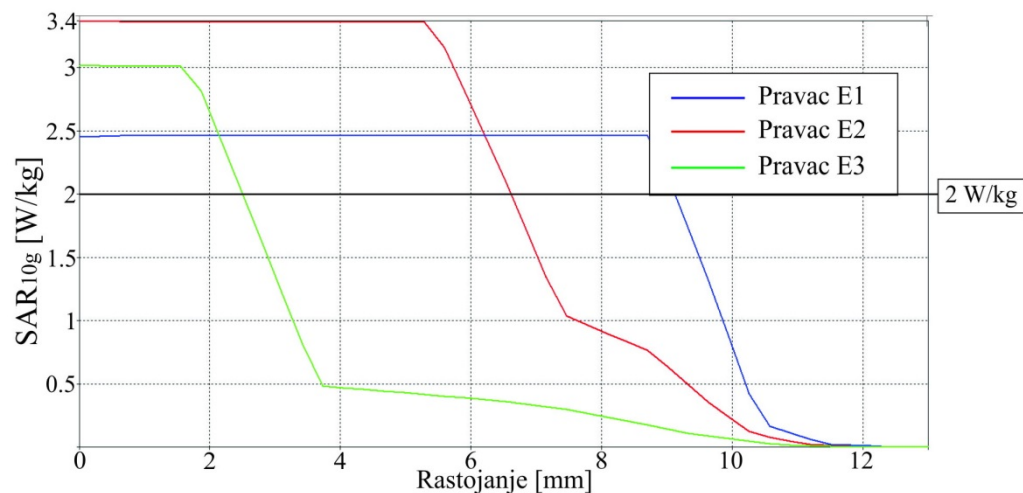
Slika 4.172 Grafik raspodele SAR<sub>1g</sub> za presek D duž pravaca D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub> i D<sub>3</sub>



Slika 4.173 Grafik raspodele SAR<sub>10g</sub> za presek D duž pravaca D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub> i D<sub>3</sub>



Slika 4.174 Grafik raspodele SAR<sub>1g</sub> za presek E duž pravaca E<sub>1</sub>, E<sub>2</sub> i E<sub>3</sub>



Slika 4.175 Grafik raspodele SAR<sub>10g</sub> za presek E duž pravaca E<sub>1</sub>, E<sub>2</sub> i E<sub>3</sub>

U slučaju preseka D premašenje vrednosti za SAR<sub>1g</sub> je oko 8 puta dok je u slučaju SAR<sub>10g</sub> oko 2 puta. Za SAR<sub>1g</sub> visoke vrednosti su prisutne u tkivima do dubine od oko 5.5mm

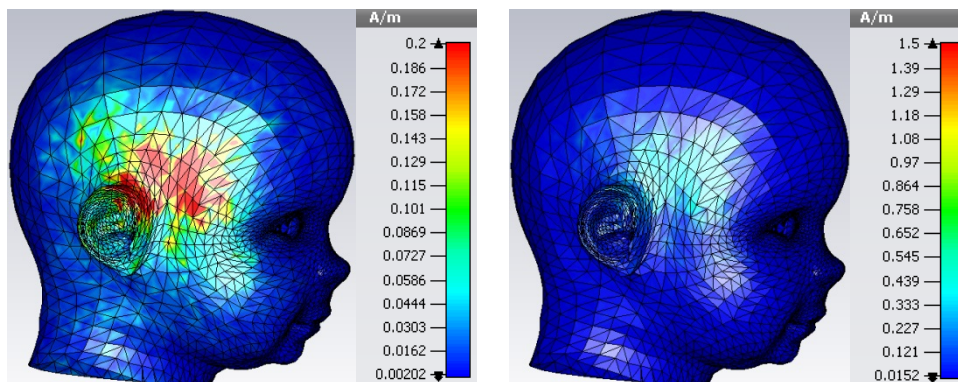
nakon čega vrednost pada ispod vrednosti bazičnog ograničenja, dok je kod SAR<sub>10g</sub> to do oko 9mm. Rastojanje do koga se apsorbuje sva elektromagnetska energija je u prvom slučaju oko 6.5mm a u drugom oko 19mm.

Za presek E premašenje vrednosti za SAR<sub>1g</sub> je oko 2.7 puta dok je u slučaju SAR<sub>10g</sub> oko 1.7 puta. Za SAR<sub>1g</sub> visoke vrednosti su prisutne u tkivima do dubine od oko 3.3mm nakon čega vrednost pada ispod vrednosti bazičnog ograničenja, dok je kod SAR<sub>10g</sub> to do oko 9.2mm. Rastojanje do koga se apsorbuje sva elektromagnetska energija je u prvom slučaju oko 6.5mm a u drugom oko 12mm.

#### 4.6.3 Vrednost jačine magnetskog polja za $f = 73\text{GHz}$

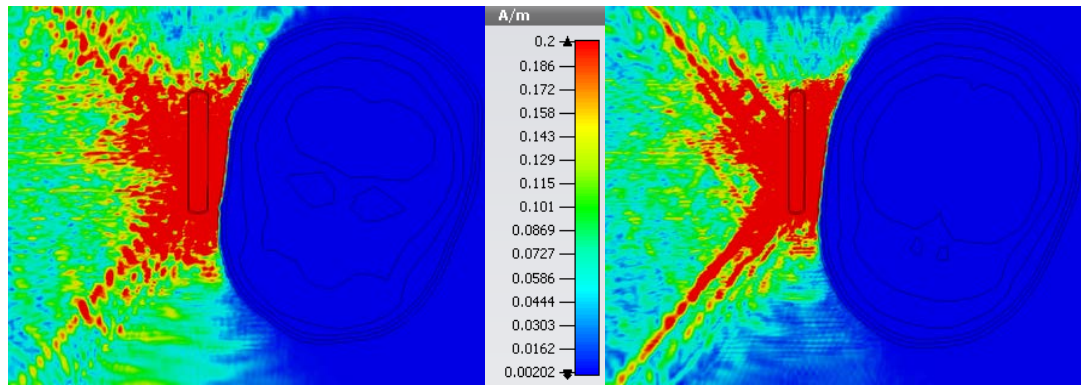
Na slici 4.176 date su vrednosti jačine magnetskog polja po površini modela glave deteta. Gornja vrednost jačine magnetskog polja u paleti boja je zbog većeg kontrasta podešena na 0.2A/m. Na desnoj strani slike dat je prikaz površinske raspodele jačine magnetskog polja sa podešenom maksimalnom vrednošću u paleti boja na 1.5A/m, u cilju vizuelnog poređenja razlike raspodele polja na datoj frekvenciji i raspodele polja na frekvencijama 0.9 GHz, 1.8 GHz i 2.1GHz.

Na slikama 4.177 i 4.178 date su vrednosti jačine magnetskog polja unutar glave deteta za različite preseke.

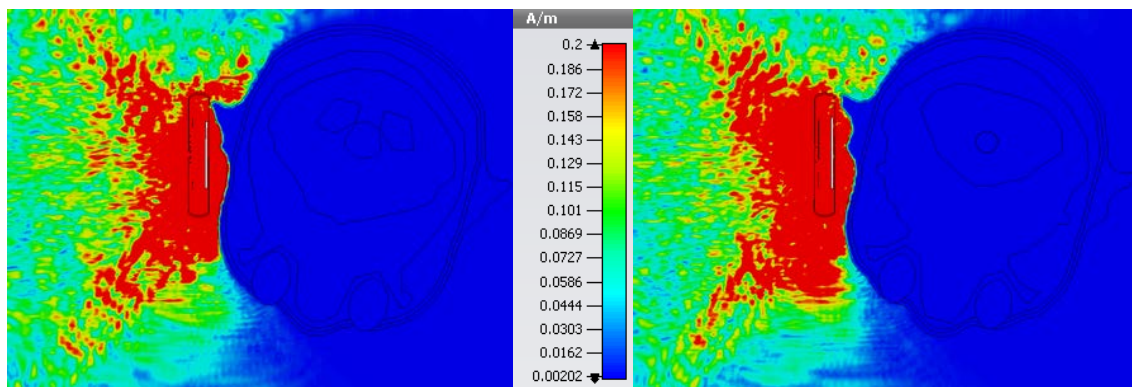


Slika 4.176 Jačina magnetskog polja  $H$  [A/m] po površini modela

Kako je vrednost referentnog graničnog nivoa za jačinu magnetskog polja na 73GHz takođe 0.064A/m, vidimo da postoje oblasti na površini kože gde su vrednosti magnetskog polja izuzetno visoke, mnogo više od vrednosti referentnog graničnog nivoa.



a) A b) B  
Slika 4.177 Jačina magnetskog polja za preseke A i B



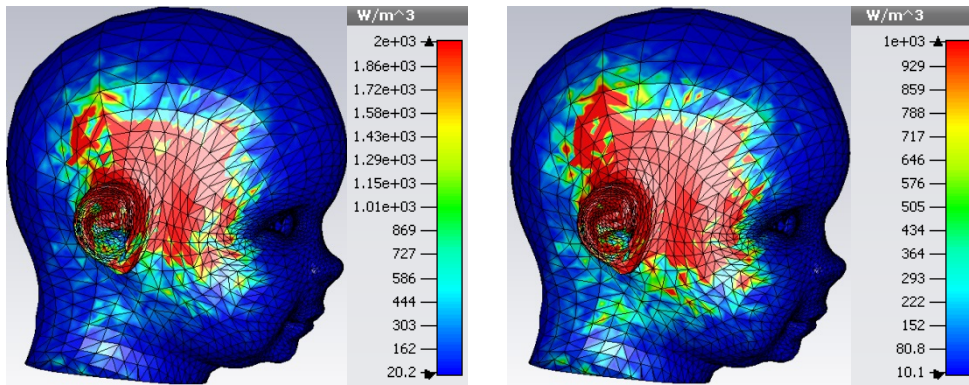
a) D b) E  
Slika 4.178 Jačina magnetskog polja za preseke D i E

Poput vrednosti intenziteta električnog polja premašenje vrednosti referentnog graničnog nivoa za jačinu magnetskog polja je prisutno samo u površinskom sloju glave deteta, tj. u koži. U ostalim slojevima ove vrednosti su niže ili zanemarljive.

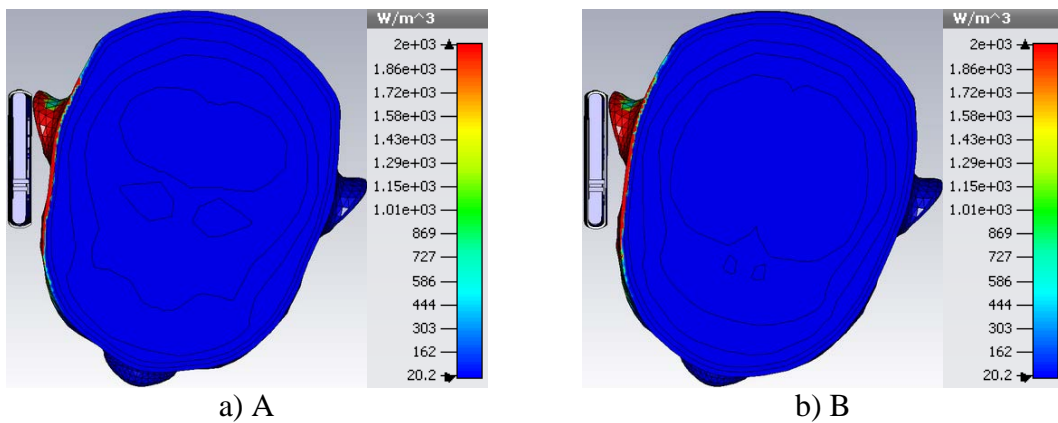
#### 4.6.4 Raspodela gustine snage gubitaka za $f = 73\text{GHz}$

Na slici 4.179 dat je prikaz prostorne raspodele gustine snage gubitaka uz samu površinu modela glave deteta. Gornja vrednost gustine snage gubitaka u paleti boja je zbog većeg kontrasta podešena na  $2000\text{W/m}^3$ . Na desnoj strani slike dat je prikaz površinske raspodele gustine snage gubitaka sa podešenom maksimalnom vrednošću u paleti boja na  $1000\text{W/m}^3$ , u cilju vizuelnog poređenja razlike raspodele gustine snage gubitaka na datoj frekvenciji i raspodele na frekvencijama 0.9 GHz, 1.8 GHz i 2.1GHz.

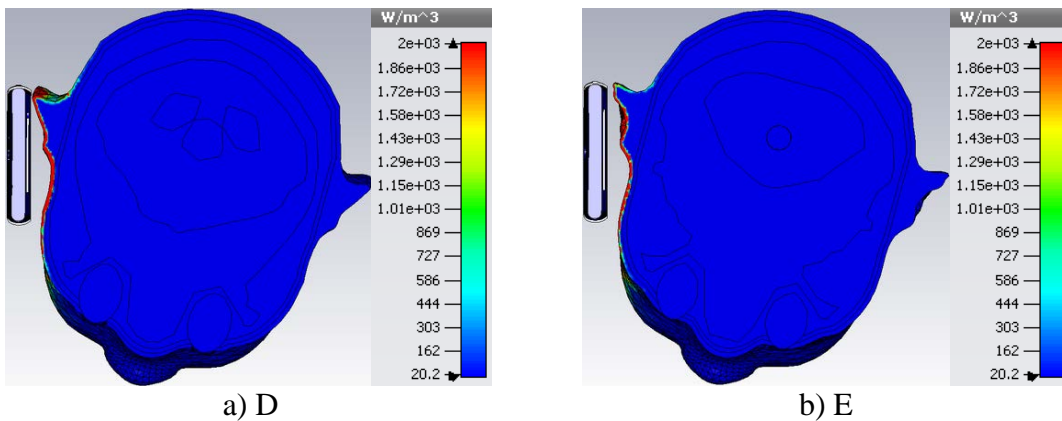
Na slikama 4.180 i 4.181 data je raspodela gustine snage gubitaka unutar glave deteta za različite preseke.



Slika 4.179 Raspodela gustine snage gubitaka uz samu površinu modela



Slika 4.180 Raspodela gustine snage gubitaka za preseke A i B

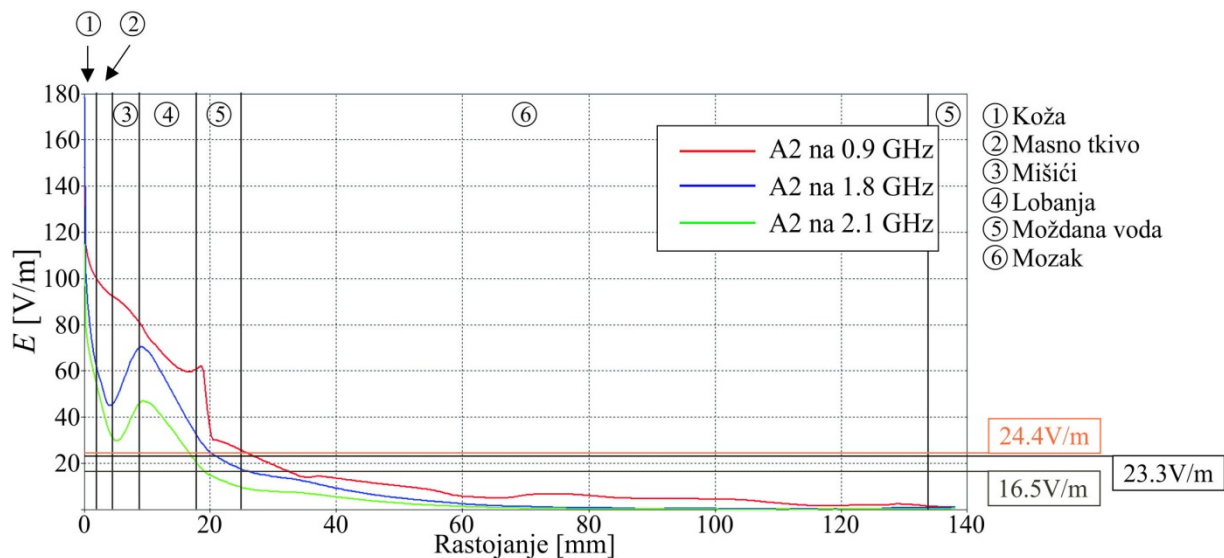


Slika 4.181 Raspodela gustine snage gubitaka za preseke D i E

I u slučaju ove frekvencije, visoke vrednosti gustine snage gubitaka prisutne su samo u površinskim slojevima glave deteta u okolini telefona, prvenstveno u koži.

## 4.7 Uporedna analiza

U ovom poglavlju biće data uporedna analiza odstupanja vrednosti za intenzitet električnog polja i SAR duž pravca A<sub>2</sub> za sve frekvencijske opsege koji su analizirani. Pravac A<sub>2</sub> je izabran jer prolazi po sredini preseka A koji odgovara nivou napajanja PIFA antene.

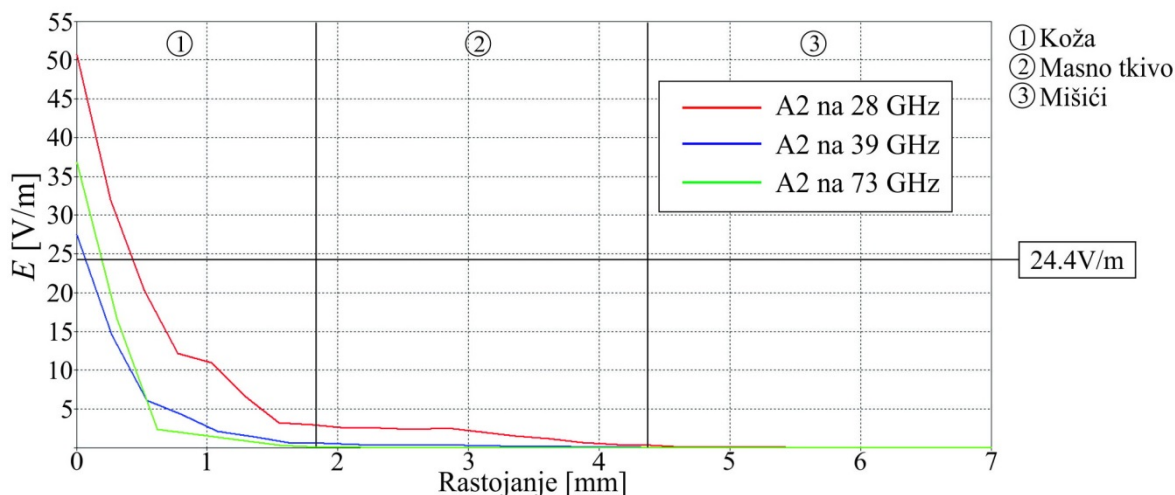


Slika 4.182 Grafik raspodele intenziteta električnog polja duž pravca A<sub>2</sub> na 0.9GHz, 1.8GHz i 2.1GHz

Sa slike 4.182 vidimo da je najveća vrednost intenziteta električnog polja na površini glave na 1.8GHz ali je u svim ostalim slučajevima vrednost polja najveća na 0.9GHz. Vidimo da je na nekih 5mm od ulaza u model glave deteta intenzitet električnog polja na 0.9GHz čak 40V/m veći nego na 1.8GHz i oko 50V/m na 2.1GHz. Na 18mm ta razlika je oko 30V/m u odnosu na 1.8GHz i 40V/m na 2.1GHz.

Kriva raspodele intenziteta električnog polja na 1.8GHz i 2.1GHz je istog ili sličnog oblika. Odstupanja idu od nekoliko V/m do najviše 20V/m na rastojanju od 10mm. Vrednosti se izjednačavaju na oko 70mm kad postaju zanemarljivo male. Jasno se vidi da je dubina penetracije talasa najveća za frekvenciju od 0.9GHz dok je za preostale dve frekvencije manja.

Za frekvencije od 1.8GHz i 2.1GHz vidimo da su vrednosti intenziteta električnog polja u prva četiri i delu petog sloja tkiva/organa glave deteta više od referentnih graničnih nivoa (16.5V/m za 0.9GHz, 23.3V/m za 1.8GHz i 24.4V/m za 2.1GHz), dok su na frekvenciji od 0.9GHz više vrednosti prisutne i u početnom delu mozga (do oko 10mm od početka mozga).

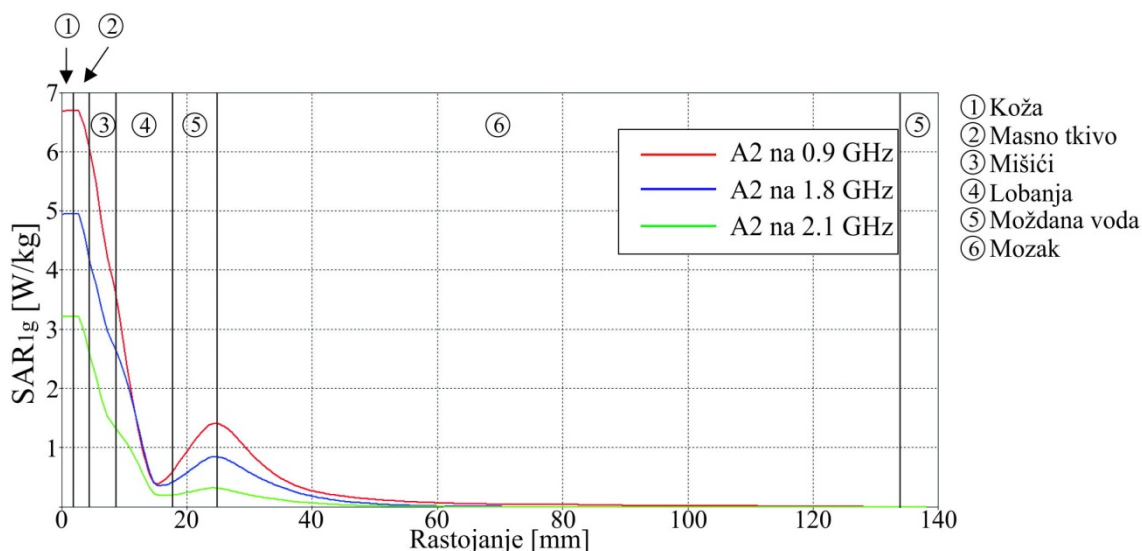


Slika 4.183 Grafik raspodele intenziteta električnog polja duž pravca A<sub>2</sub> na 28GHz, 39GHz i 73GHz

Za liniju A<sub>2</sub> (slika 4.183) na frekvencijama 28GHz, 39GHz i 73GHz vidimo da je najveća vrednost intenziteta električnog polja na površini za 28GHz i da je taj trend održan do potpunog apsorbovanja elektromagnetskog talasa. Primećujemo da je maksimalna vrednost intenziteta električnog polja na površini veća na 73GHz u odnosu na 39GHz i ostaje tako do rastojanja od 0.5mm kada prevlada intenzitet električnog polja na 39GHz.

Intenzitet električnog polja na 28GHz je veći za 23V/m na ulazu u odnosu na 39GHz i za oko 13V/m u odnosu na 73GHz. Na oko 1mm to odstupanje je oko 8V/m i 9V/m, respektivno. Veće prodiranje elektromagnetskog talasa je za slučaj 28GHz i to do oko 4mm, dok je za 39GHz i 73GHz ono oko 2mm.

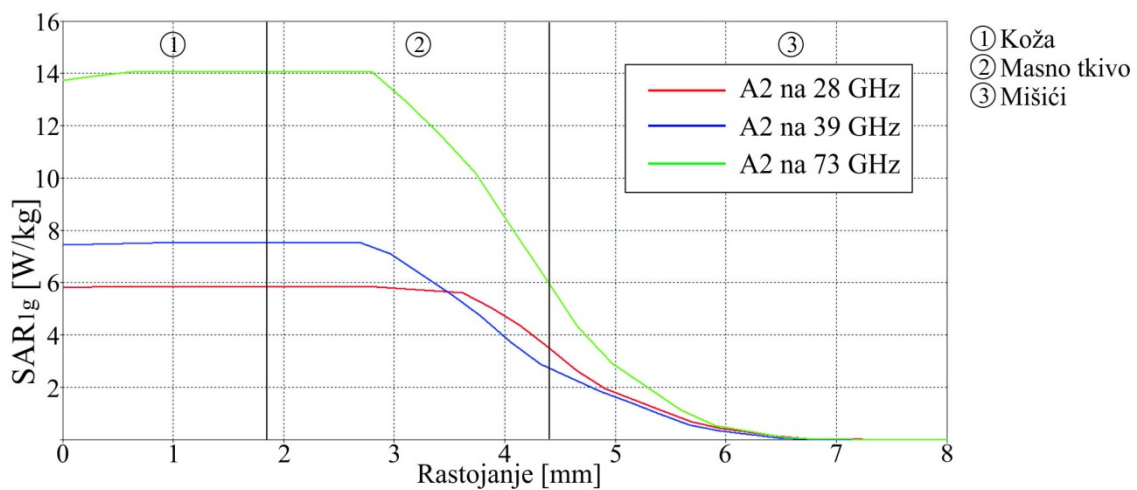
Za frekvencije od 28GHz, 39GHz i 73GHz vrednosti intenziteta električnog polja više od referentnih graničnih nivoa prisutne su samo u koži i to do dubine od 0.02 do 0.5mm.



Slika 4.184 Grafik raspodele SAR<sub>1g</sub> duž pravca A<sub>2</sub> na 0.9GHz, 1.8GHz i 2.1GHz



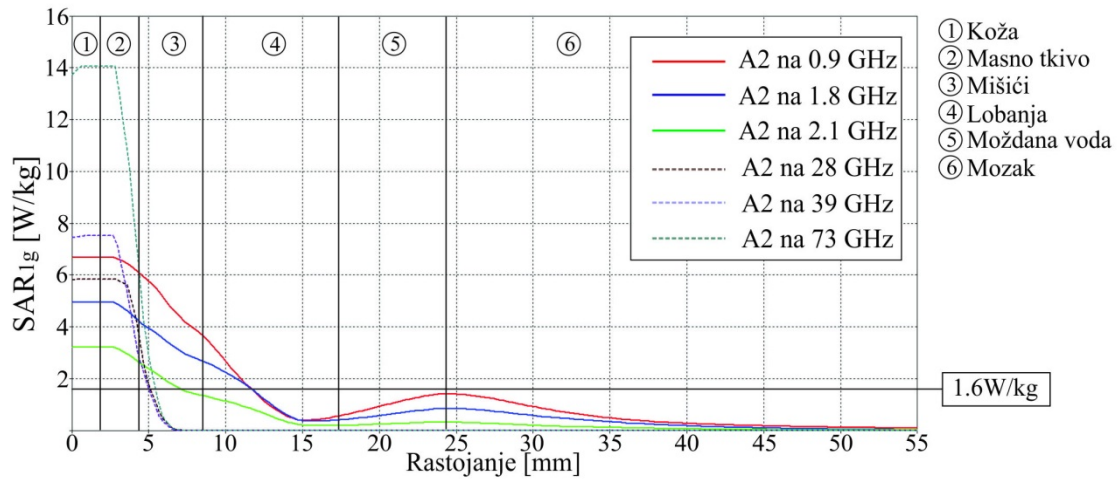
Na slici 4.184 prikazane su vrednosti  $SAR_{1g}$  duž pravca  $A_2$  za sve tri frekvencije, 0.9GHz, 1.8GHz i 2.1GHz. Sa slike vidimo da je oblik krive raspodele  $SAR_{1g}$  duž pravca  $A_2$  gotovo isti za sve tri frekvencije, samo se razlikuju vrednosti. Najviše vrednosti za SAR su na 0.9GHz, nešto niže za 1.8GHz i najniže na 2.1GHz. Najviša vrednost za SAR na 0.9GHz je 6.8W/kg, na 1.8GHz oko 5W/kg i na 2.1GHz oko 3.2 W/kg. Prvi minimum je za sve tri krive na oko 16mm gde je vrednost za SAR na 0.9GHz i 1.8GHz oko 0.4W/kg i 0.2W/kg na 2.1GHz. Sledeći maksimum je na oko 25mm gde SAR na 0.9GHz skače na 1.4W/kg, na 1.8GHz na 0.8W/kg i na 2.1GHz na 0.35W/kg. Nakon toga dolazi do opadanja vrednosti za sve tri krive i potpune apsorpcije elektromagnetske energije na oko 70mm.



Slika 4.185 Grafik raspodele  $SAR_{1g}$  duž pravca  $A_2$  na 28GHz, 39GHz i 73GHz

Na slici 4.185 prikazane su vrednosti  $SAR_{1g}$  duž pravca  $A_2$  za frekvencije 28GHz, 39GHz i 73GHz. Slično kao i na prethodnoj slici, vidimo da je i ovde oblik krive raspodele  $SAR_{1g}$  duž pravca  $A_2$  gotovo isti za sve tri frekvencije samo se razlikuju vrednosti. Najviše vrednosti za SAR su na 73GHz. Najviša vrednost za SAR na 73GHz je 14W/kg od početka do oko 2.8mm, na 39GHz oko 7.5W/kg do 2.7mm, dok je na 28GHz to oko 6W/kg do oko 2.9mm.

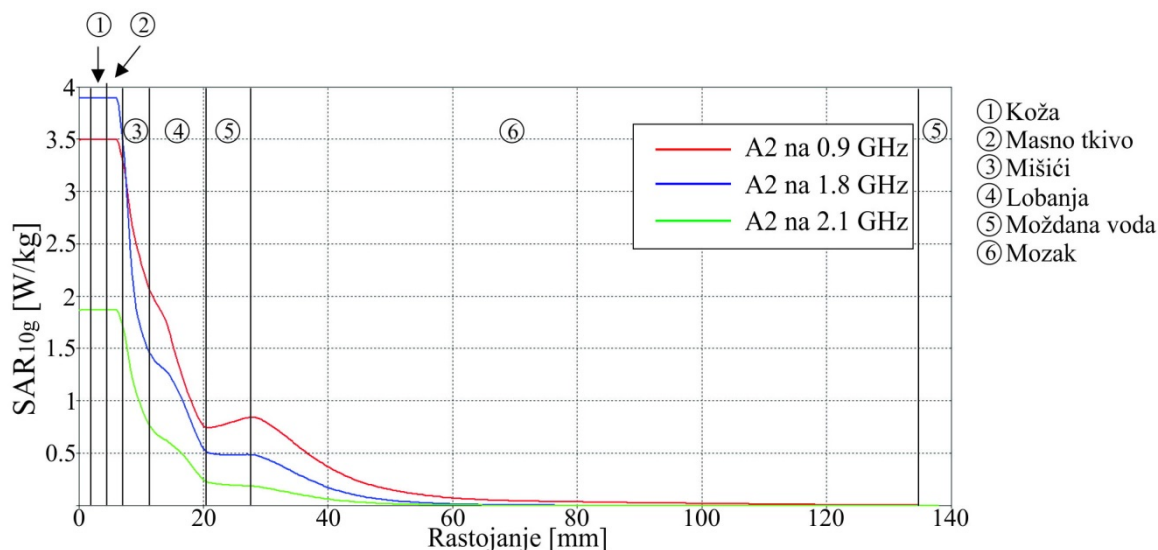
Vidimo da su sve vreme vrednosti za SAR najviše na 73GHz dok je kod preostale dve frekvencije uočeno preplitanje. Vrednosti za SAR su više na 39GHz u odnosu na one na 28GHz za oko 1.6W/kg do oko 2.7mm, nakon čega se ta razlika smanjuje i na 35mm SAR na 28GHz postaje viši (do oko 0.7W/kg) sve do potpunog apsorbovanja energije za sve krive na 6.6mm.



Slika 4.186 Grafik raspodele SAR<sub>1g</sub> duž pravca A<sub>2</sub> za sve frekvencije

Na slici 4.186 dat je uporedni prikaz vrednosti za SAR<sub>1g</sub> duž pravca A<sub>2</sub> za sve frekvencije od interesa. Ono što je evidentno iz prethodne analize, najviše vrednosti za SAR su na frekvencijama iz opsega namenjenim 5G sistemima sa izuzetkom frekvencije od 0.9GHz na kojoj su vrednosti za SAR nešto više od onih na 28GHz. Na 1.8GHz i 2.1GHz imamo niže vrednosti za SAR u odnosu na ova četiri frekvencijska opsega. Sve ove frekvencije svrstaćemo u dve grupe, prvu u kojoj su frekvencije koje su u upotrebi 0.9GHz, 1.8GHz i 2.1GHz i drugu u kojoj su frekvencije koje tek treba da zažive u praksi 28GHz, 39GHz i 73GHz. Glavna razlika između ove dve grupe ogleda se u dubini prodiranja elektromagnetskog talasa. U drugoj grupi primetnije su više vrednosti za SAR ali je prodiranje elektromagnetskog talasa daleko manje pa se sva energija apsorbira u površinskim slojevima glave do oko 8mm (za pravac A<sub>2</sub>) dok je kod prve grupe frekvencija uočljivo prodiranje do rastojanja koje je i do 10 puta veće.

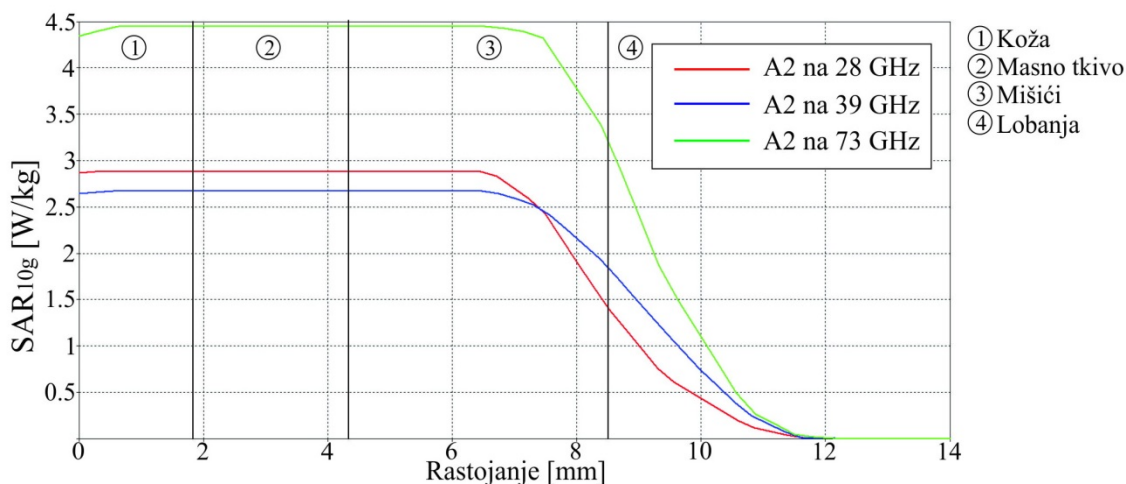
Za sve frekvencije, bazično ograničenje za SAR<sub>1g</sub> je premašeno u više sloja/tkiva. Za frekvencije od 0.9GHz i 1.8GHz više vrednosti su prisutne u prva četiri sloja do dubine od oko 12mm, dok su na 2.1GHz više vrednosti prisutne u prva tri sloja do dubine od 7mm. Na 28GHz i 39GHz i 73GHz maksimalne vrednosti su premašene u prva tri sloja do oko 6mm.



Slika 4.187 Grafik raspodele SAR<sub>10g</sub> duž pravca A<sub>2</sub> na 0.9GHz, 1.8GHz i 2.1GHz

Na slici 4.187 dat je uporedni prikaz vrednosti za SAR<sub>10g</sub> duž pravca A<sub>2</sub> za frekvencije 0.9GHz, 1.8GHz i 2.1GHz. Sa slike vidimo da je oblik krive raspodele SAR<sub>10g</sub> duž pravca A<sub>2</sub> sličan za sve tri frekvencije. Najviša vrednost za SAR je na 1.8GHz i iznosi oko 3.8W/kg, na 0.9GHz je 3.5W/kg i na 2.1GHz oko 1.8 W/kg. SAR na 1.8GHz je viši u odnosu na 0.9GHz (do 0.3W/kg) samo do oko 7mm, nakon čega vrednosti za SAR na 0.9GHz postaju veće (do 0.3W/kg) do potpunog apsorbovanja energije.

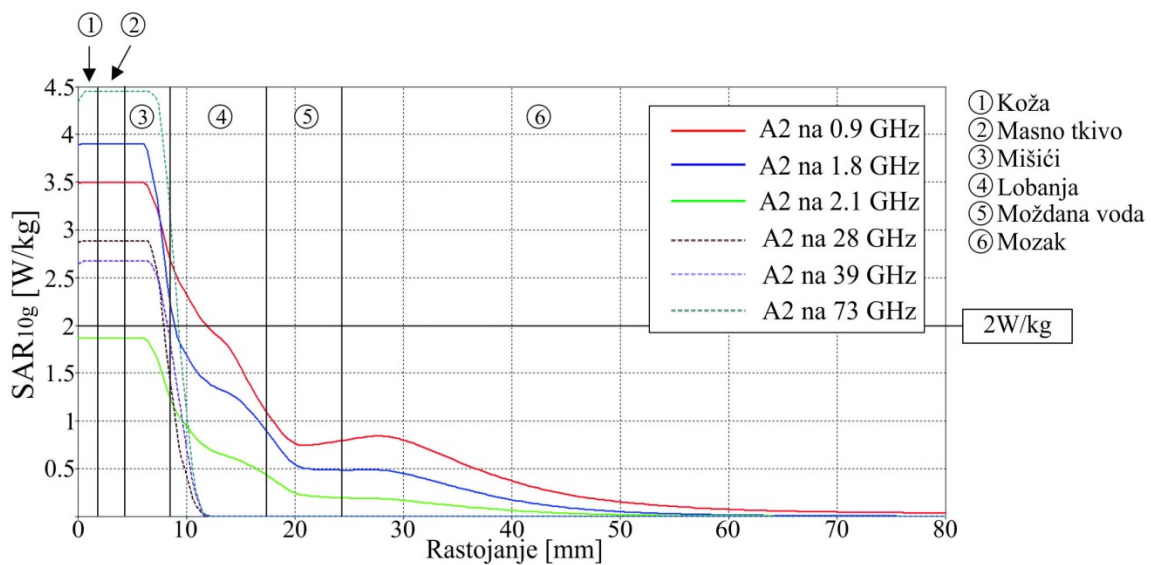
Na 26mm vrednost za SAR na 0.9GHz je 0.75W/kg, na 1.8GHz oko 0.5W/kg i na 2.1GHz je 0.25W/kg. Na oko 30mm SAR na 0.9GHz raste do 0.85W/kg, na 1.8GHz ostaje 0.5W/kg i na 2.1GHz blago pada na 0.2W/kg. Nakon 30mm primetno je smanjenje vrednosti za sve tri krive i do potpunog apsorbovanja elektromagnetske energije dolazi na oko 70mm.



Slika 4.188 Grafik raspodele SAR<sub>10g</sub> duž pravca A<sub>2</sub> na 28GHz, 39GHz i 73GHz

Oblik kriva na slici 4.188 koja prikazuje promene vrednosti SAR<sub>10g</sub> duž pravca A<sub>2</sub> na 28GHz, 39GHz i 73GHz, je gotovo isti kao na slici 4.185. I za slučaj SAR<sub>10g</sub> najviša vrednost je na 73GHz i iznosi oko 4.5W/kg od početka do oko 6.5mm, na 28GHz je oko 2.8W/kg do 6.5mm, dok je na 39GHz to oko 2.65W/kg takođe do oko 6.5mm.

Na 73GHz vrednosti za SAR su sve vreme više nego na preostale dve frekvencije. Za razliku od SAR<sub>1g</sub> ovde su krive na 28GHz i 39GHz zamenile mesta. Vrednosti su više duž pravca A<sub>2</sub> na 28GHz do oko 7.5mm u odnosu na one na 39GHz, a nakon toga vrednosti za SAR postaju više na 39GHz (do 0.4W/kg) i ovaj trend je očuvan do potpunog apsorbovanja energije za sve tri frekvencije na oko 12mm.



Slika 4.189 Grafik raspodele SAR<sub>10g</sub> duž pravca A<sub>2</sub> za sve frekvencije

Na slici 4.189 dat je uporedni prikaz vrednosti za SAR<sub>10g</sub> duž pravca A<sub>2</sub> za sve frekvencije od interesa. U odnosu na SAR<sub>1g</sub> odnosi između krivih na različitim frekvencijama su malo izmenjeni. I dalje su najviše vrednosti za SAR na 73GHz, dok su i na 28GHz i 39GHz vrednosti niže u odnosu na 0.9GHz i 1.8GHz. U oba slučaja i za SAR<sub>1g</sub> i za SAR<sub>10g</sub> najniže vrednosti su na 2.1GHz.

I ovde se nameće da je glavna razlika između ove dve grupe frekvencija upravo u dubini prodiranja elektromagnetskog talasa. Za drugu grupu frekvencija prodiranje elektromagnetskog talasa je daleko manje pa se sva energija apsorbuje do rastojanja od oko 12mm koje se nalazi u lobanji modela glave deteta (za pravac A<sub>2</sub>). Kod prve grupe frekvencija prodiranje elektromagnetskog talasa je daleko veće i vidimo da talas prodire duboko u mozak modela glave deteta.

Na svim frekvencijama (osim na 2.1GHz), vrednost bazičnog ograničenja za SAR<sub>10g</sub> je premašena u više sloja/tkiva. Na frekvencijama od 0.9GHz i 1.8GHz više vrednosti su prisutne u koži, masnom tkivu, mišićima i lobanji i to do dubine od oko 12mm na 0.9GHz do oko 8.5mm na 1.8GHz. Na 28GHz i 39GHz vrednost bazičnog ograničenja je premašena u koži, masnom tkivu i mišićima na rastojanju od oko 8mm od početka modela, dok su na 73GHz više vrednosti prisutne i u lobanji do dubine od oko 9mm.

## 5. Zagrevanje tkiva i organa usled zračenja mobilnog telefona

Kao što je poznato, osnovna mera za procenu bezbednosti izlaganja RF elektromagnetskom zračenju koja je propisana standardima je SAR. Međutim, povećanje temperature u ljudskoj glavi je jedan od dominantnih faktora koji prouzrokuje štetne fiziološke efekte. Zapravo, napomenuto je da bi povećanje temperature u mozgu od oko 3.5°C trebalo da bude dozvoljena granica koja ne dovodi do fizioloških oštećenja [125]. Međutim, navodi se da malo povećanje temperature u hipotalamusu od 0.2–0.3 °C dovodi do izmenjenog termoregulatornog ponašanja [126].

Verovatno najbolji način da se razume elektromagnetsko dejstvo na organizam je istraživanje toplotne interakcije sa telom. Procena efekata izloženosti zračenju mobilnih telefona se zasniva na određivanju prodrlog elektromagnetskog polja unutar glave i njegove raspodele, kao i apsorbovane energije, što rezultira povećanjem temperature tkiva u ljudskoj glavi. Zagrevanje tkiva je uzrokovano apsorbovanjem energije zbog jonske provodnosti tkiva kao i usled gubitaka povezanih sa kretanjem molekula izazvanih vremenski promenljivim elektromagnetskim poljem. Porast temperature u tkivu je određen brzinom apsorbovanja elektromagnetske energije u tkivu i metaboličkom brzinom grejanja, kao i toplotnog rasipanja provođenjem i protokom krvi.

Poznavanje termalnih karakteristika bioloških tkiva je osnova za razumevanje procesa prenosa toplote u biološkom sistemu [127-129]. Prenos toplote u živim tkivima je komplikovan proces jer podrazumeva kombinaciju toplotne provodnosti u tkivima, prostiranje i perfuziju krvi i metaboličko generisanje toplote. Energija deponovana u tkivu dovodi do porasta temperature, koja takođe zavisi od sistema rashlađivanja tkiva. Temperatura tkiva može kontinualno da se povećava ako je apsorbovana energija veća nego metabolički odgovor rashladnog sistema tkiva, kao što je perfuzija krvi.

Raspodela temperature tkiva tokom izlaganja RF talasima može biti određena rešavanjem BHT jednačine (poglavlje 1.3), koja uzima u obzir provođenje toplote, perfuziju krvi i spoljašnje zagrevanje.

Za analizu problema zagrevanja tkiva i organa usled zračenja mobilnog telefona korišćen je isti model glave deteta koji je već opisan u poglavlju 3.3 kao i isti parametri zračenja mobilnog telefona na frekvenciji od 900MHz.

Raspodela temperature unutar modela čoveka se dobija rešavanjem Peneove *bioheat* jednačine (poglavlje 1.3.1) uz dodatak člana  $\rho_{tk}SAR$  koji se odnosi na zapreminsku gustinu apsorbovane snage koja potiče od spoljašnjeg izvora [130]:

$$\rho_{tk}C_{tk} \frac{\partial T_{tk}}{\partial t} = \nabla \cdot k_{tk} \nabla T_{tk} + \rho_{kr}C_{kr} \omega_{kr} (T_{art} - T_{tk}) + q_m + \rho_{tk}SAR . \quad (5.1)$$

U tabeli 5.1 dati su toplotni parametri tkiva/organa [124, 131-133].

Tabela 5.1 Toplotni parametri tkiva/organa glave

	Tkiva/organi	$c$ [ kJ/kgK ]	$k$ [ W/mK ]	$B$ [ W/m <sup>3</sup> K ]
1.	Kost	1.313	0.32	3400
2.	Mozak*	3.630	0.51	40000
3.	Moždana voda	4.096	0.57	0
4.	Masno tkivo	2.348	0.21	1700
5.	Hrskavica	3.568	0.49	9000
6.	Hipofiza	3.687	0.51	360000
7.	Kičmena moždina	3.630	0.51	35000
8.	Mišići glave	3.421	0.49	2700
9.	Oko*	3.615	0.53	0
10.	Koža	3.391	0.37	9100
11.	Jezik	3.421	0.49	13000
12.	Zubi	1.255	0.59	1000
13.	Pršljenovi	1.313	0.32	3400

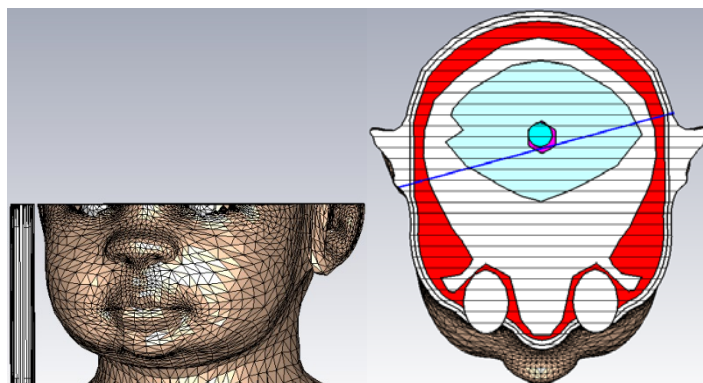
\* Elektromagnetske osobine organa su uzete kao srednja vrednost.

U tabeli 5.1,  $c$  predstavlja specifičnu toplotu,  $k$  termalnu provodnost, a  $B$  je koeficijent perfuzije krvi  $B = \rho_{kr}C_{kr} \omega_{kr}$ .

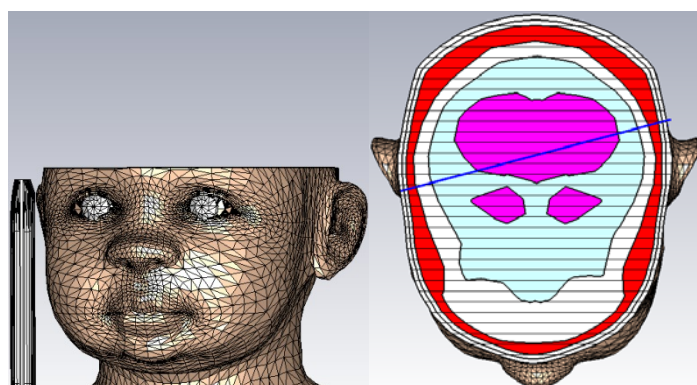
Za spoljašnju temperaturu uzeta je vrednost 25°C, a temperatura krvi je 37°C [134].

Porast temperature biće dat za više horizontalnih preseka modela dečije glave. Preseci modela glave deteta sa pravcima A, B, C, D prikazani su na slikama 5.1-5.4.

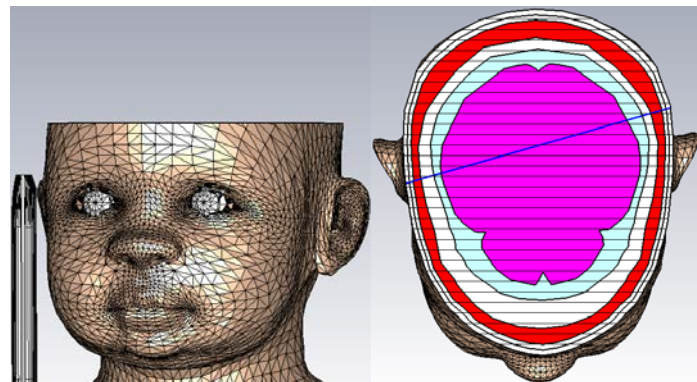
Svi pravci leže u ravnima normalnim na ravan telefona. Pravac A se nalazi u nivou PIFA antene, dok se pravci B, C i D nalaze u ravnima koje presecaju mozak modela glave deteta. Shodno ovome, upravo će najviše pažnje biti usmereno na porast temperature u mozgu modela deteta i oblasti koja se nalazi u nivou antene mobilnog telefona.



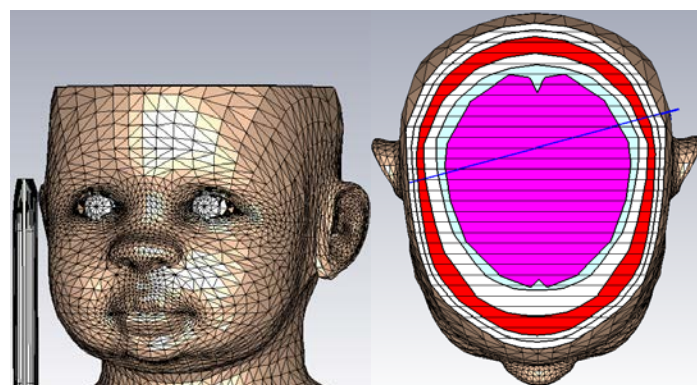
Slika 5.1 Horizontalni poprečni presek modela glave deteta u kome leži pravac A



Slika 5.2 Horizontalni poprečni presek modela glave deteta u kome leži pravac B



Slika 5.3 Horizontalni poprečni presek modela glave deteta u kome leži pravac C

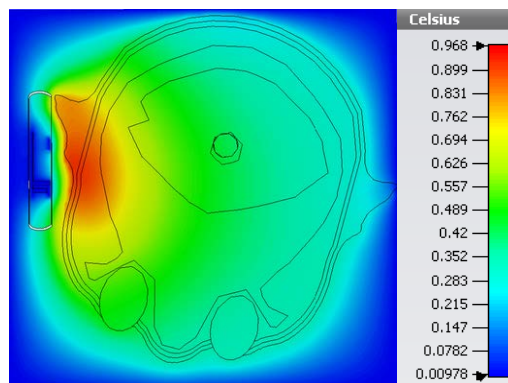


Slika 5.4 Horizontalni poprečni presek modela glave deteta u kome leži pravac D



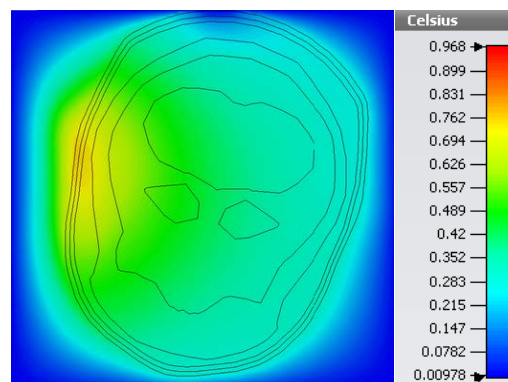
Treba napomenuti da je početna temperatura krvi od 37°C podešena na nultu vrednost u labeli boja kako bi porast temperature bio pregledniji.

Na slici 5.5 prikazan je porast temperature za horizontalni poprečni presek modela glave u kome leži pravac A. Sa slike se vidi da je maksimalno povećanje temperature 0.968°C.

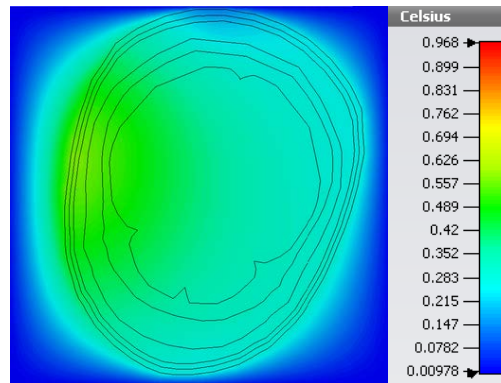


Slika 5.5 Porast temperature za horizontalni poprečni presek u kome leži pravac A

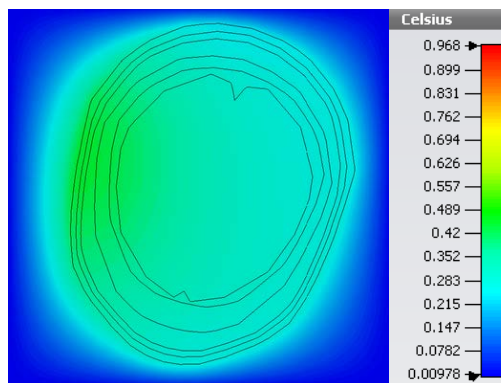
Posebna pažnja prilikom analize porasta temperature posvećena je maksimalnom povećanju temperature u mozgu kao posledice zagrevanja tkiva i organa usled dejstva elektromagnetskog polja. Na slikama 5.6-5.8 prikazano je povećanje temperature za različite horizontalne poprečne preseke mozga modela glave deteta koji odgovaraju pravcima B, C i D, respektivno.



Slika 5.6 Porast temperature za horizontalni poprečni presek u kome leži pravac B

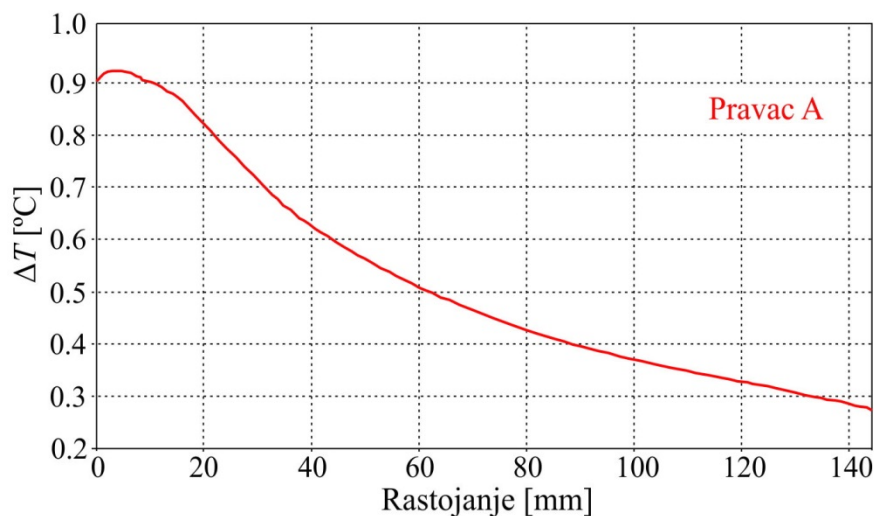


Slika 5.7 Porast temperature za horizontalni poprečni presek u kome leži pravac C

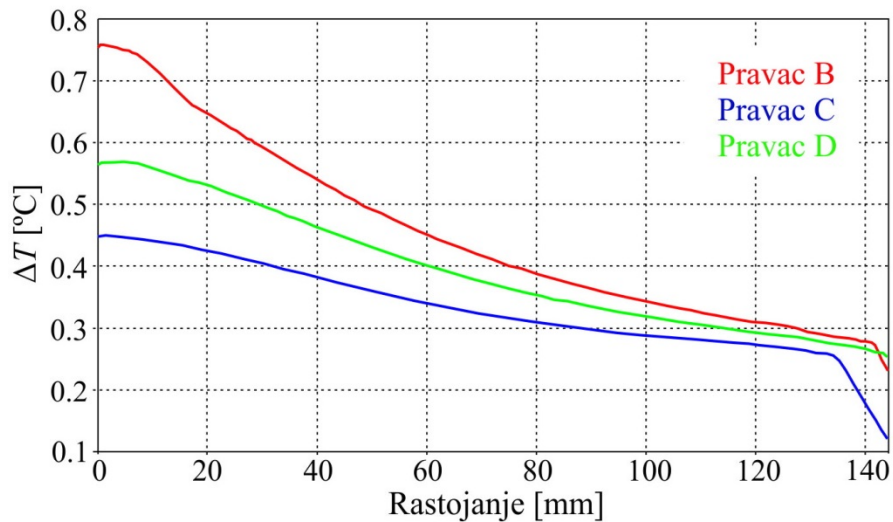


Slika 5.8 Porast temperature za horizontalni poprečni presek u kome leži pravac D

Na slici 5.9 data je kriva zavisnosti promene temperature u funkciji rastojanja duž pravca A. Sa slike se jasno vidi da je najveći porast temperature upravo u onim tkivima i organima koji su najbliže izvoru zračenja. Sa udaljavanjem od mobilnog telefona temperatura opada ali sporije nego što je to slučaj sa vrednostima za SAR (videti poglavlje 4). Maksimalno povećanje temperature za ovaj pravac je  $0.91^{\circ}\text{C}$ .



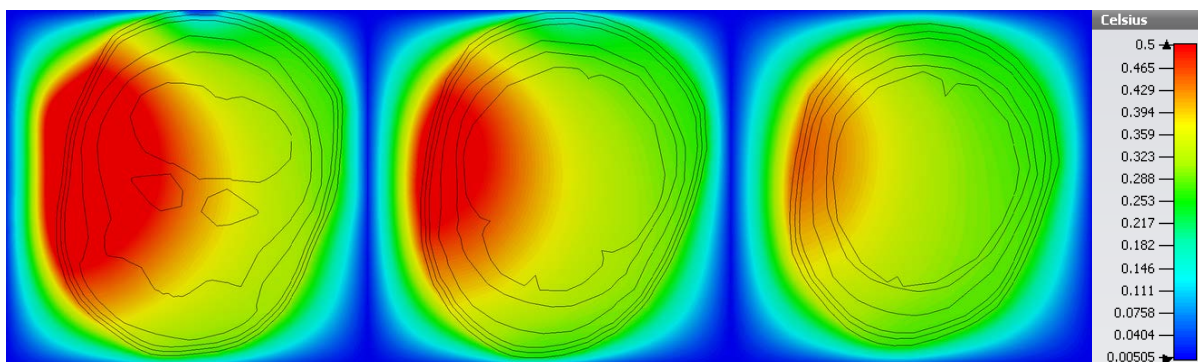
Slika 5.9 Grafik zavisnosti porasta temperature duž pravca A



Slika 5.10 Grafik zavisnosti porasta temperature duž pravaca B, C i D

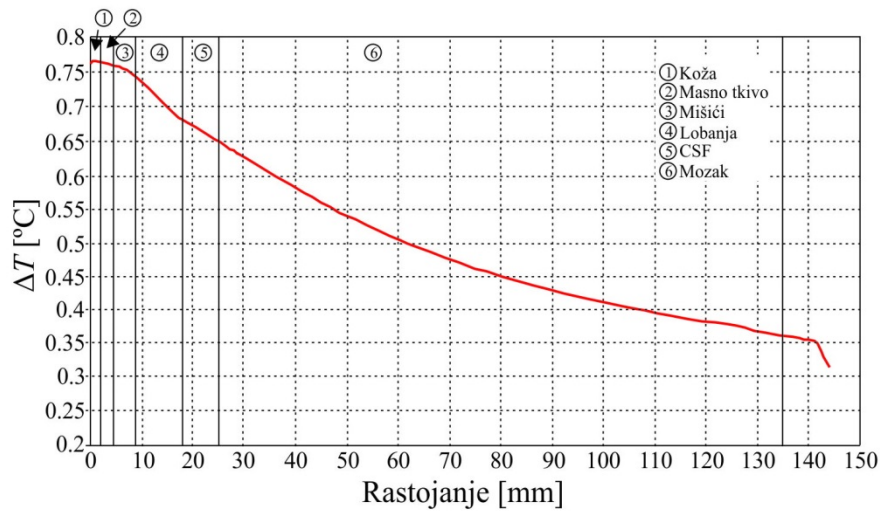
Grafik zavisnosti porasta temperature duž pravaca B, C i D prikazan je na slici 5.10. Maksimalno povećanje temperature za pravac B je  $0.76^{\circ}\text{C}$ , za pravac C  $0.57^{\circ}\text{C}$  i za pravac D  $0.45^{\circ}\text{C}$ . Ovo je i očekivano jer je prvi presek najbliži anteni mobilnog telefona a treći najdalji.

U cilju preglednijeg prikaza razlike porasta temperature za ova tri preseka na slici 5.11 dat je njihov uporedni prikaz sa unapred podešenom labelom na  $0.5^{\circ}\text{C}$ .

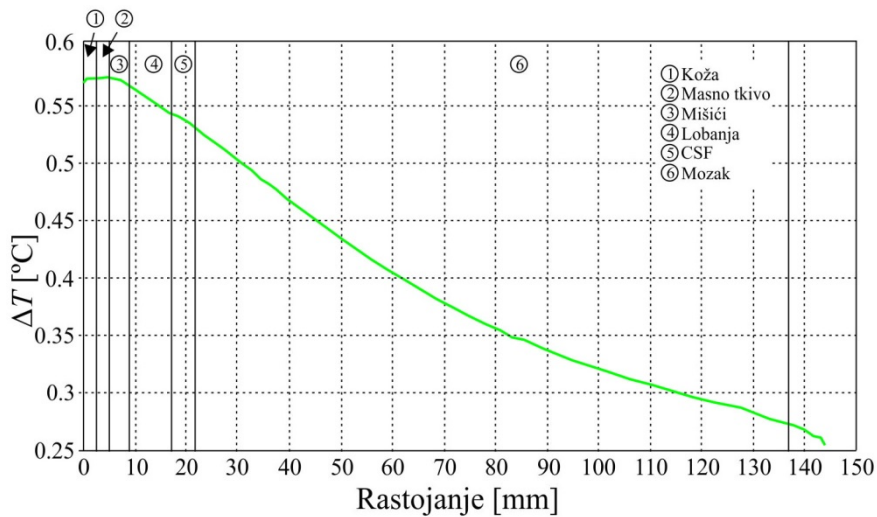


Slika 5.11 Uporedni prikaz porasta temperature za preseke u kojima leže pravci B, C i D

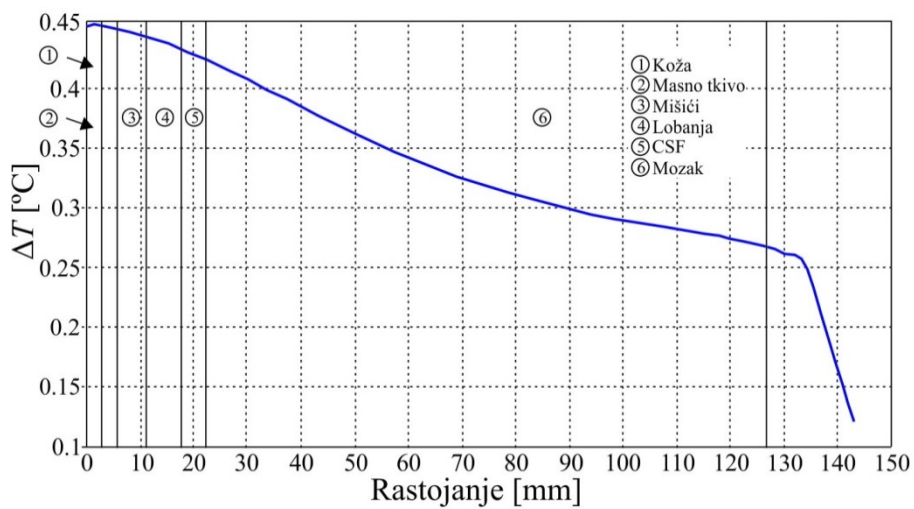
Na slikama 5.12, 5.13 i 5.14 prikazana je zavisnost porasta temperature u različitim tkivima i organima od rastojanja duž izabranih pravaca B, C i D u mozgu.



Slika 5.12 Grafik zavisnosti porasta temperature duž pravca B



Slika 5.13 Grafik zavisnosti porasta temperature duž pravca C



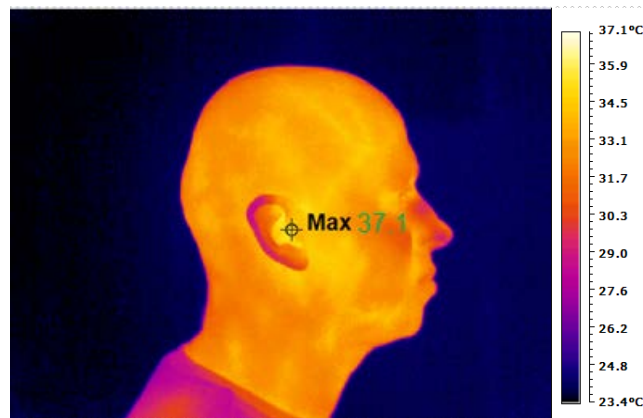
Slika 5.14. Grafik zavisnosti porasta temperature duž pravca D

Za sva tri pravca, maksimalni porast temperature u mozgu ne prelazi  $0.65^{\circ}\text{C}$ . Za pravac B, porast temperature u mozgu se kreće u opsegu od  $0.65^{\circ}\text{C}$  do  $0.36^{\circ}\text{C}$ , za pravac C od  $0.53^{\circ}\text{C}$  do  $0.27^{\circ}\text{C}$  i za pravac D od  $0.42^{\circ}\text{C}$  do  $0.27^{\circ}\text{C}$ .

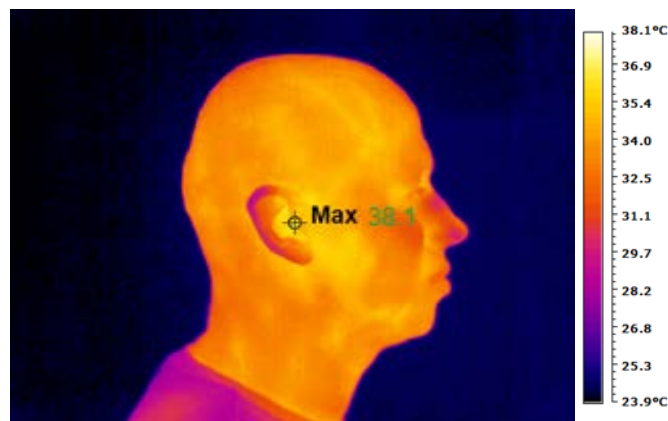
Treba napomenuti da su ovi preseci proizvoljno odabrani i da će porast temperature u mozgu varirati zavisno od odabranog preseka, tj. u zavisnosti od rastojanja od antene mobilnog telefona.

Rezultati porasta temperature dobijeni ovom simulacijom su upoređeni sa rezultatima koji su dobijeni eksperimentalnim putem za odraslu osobu. U tu svrhu korišćena je termovizijska kamera EASIR-9. Eksperimentalna analiza porasta temperature kod dece nije vršena iz etičkih principa kako se deca ne bi izlagala elektromagnetskom zračenju mobilnih telefona zarad eksperimenta.

Na slikama 5.15 i 5.16 prikazana je raspodela temperature na površini glave za dva različita slučaja.



Slika 5.15. Raspodela temperature na površini glave pre razgovora



Slika 5.16. Raspodela temperature na površini glave posle 15to minutnog razgovora

Na prvoj slici data je raspodela temperature pre korišćenja mobilnog telefona, a na drugoj raspodela temperature nakon 15 minuta razgovora telefonom.

Kao što se vidi sa slika, razlika u temperaturi pre započinjanja razgovora i nakon 15 minuta razgovora telefonom je  $1^{\circ}\text{C}$  što je u saglasnosti sa rezultatima koji su dobijeni numeričkom simulacijom.

Na osnovu svih prikazanih rezultata, primećeno je da temperatura u mozgu ne prelazi  $0.7^{\circ}\text{C}$  što je ispod praga za izazivanje neželjenih termičkih efekata na neurone [135], dok u ostalim delovima glave ne prelazi  $1^{\circ}\text{C}$ . Naravno treba imati u vidu da je ovde simulirano 15to minutno izlaganje zračenju mobilnog telefona. Izlaganje zračenju mobilnog telefona tokom dužeg vremenskog perioda bi za posledicu verovatno imalo drugačije vrednosti porasta temperature.

Ovako dobijeni rezultati ukazuju na to da je pored doziometrijske potrebno vršiti i termalnu analizu uticaja zračenja mobilnog telefona.

## 6. Prodiranje elektromagnetskog talasa u oko deteta

Jedan od svakako najzastupljenijih vidova korišćenja pametnih mobilnih telefona kod dece jeste surfovanje internetom. Nove funkcije koje nude pametni telefoni, aplikacije za društvene mreže i deljenje sadržaja na mreži, dopisivanje i video ćaskanje, motivišu povećanu upotrebu telefona već u ranom uzrastu kod dece.

Ono što je zajedničko za takvu vrstu korišćenja telefona jeste da se u svim tim slučajevima telefon drži neposredno ispred lica korisnika kako bi bilo moguće pratiti sadržaj na ekranima telefona. Na ovaj način, zračenje mobilnog telefona se usmerava na lice i oči. Svakako, posebnu pažnju treba obratiti na oči korisnika jer pored toga što spadaju u osetljive organe, direktno su izložene spoljašnjem uticaju jer osim kapaka nemaju drugu fizičku zaštitu.

Oko nije pravilnog sferičnog oblika. Dimenzije oka kod odraslih osoba se mogu razlikovati samo za jedan do dva milimetra. Visina oka, je oko 24mm kod odraslih, dok je pri rođenju oko 16-17mm. Očna jabučica brzo raste, tako da do treće godine iznosi 22.5-23mm. Od treće do trinaeste godine života, oko dostiže svoju punu veličinu. Zapremina oka je 6.5ml, a težina 7.5g [136].

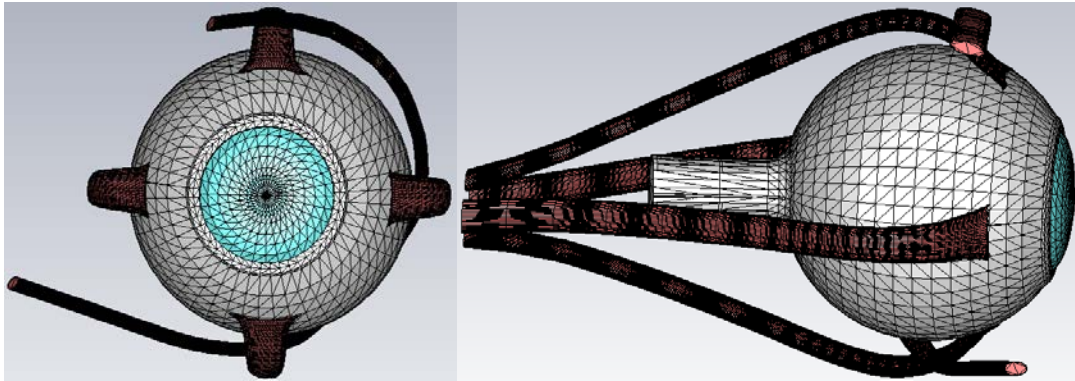
Kako je rečeno, jedina fizička zaštita očiju od spoljašnjeg uticaja jesu kapci. Međutim, kako su kapci podignuti prilikom gledanja sadržaja na ekranu telefona, a i vlaženje oka je smanjeno zbog manje frekvencije zatvaranja kapaka, oko je direktno izloženo uticaju elektromagnetskog talasa koji dopire od antene mobilnog telefona.

U cilju utvrđivanja uticaja elektromagnetskog talasa na oči deteta, količine apsorbovane energije, porasta temperature usled apsorpcije energije elektromagnetskog talasa, formiran je numerički model oka koji po svojim karakteristikama, dimenzijama i anatomskom obliku, odgovara oku deteta. Spoljašnji izgled oka i poprečni presek prikazani su na slikama 6.1 i 6.2, respektivno.

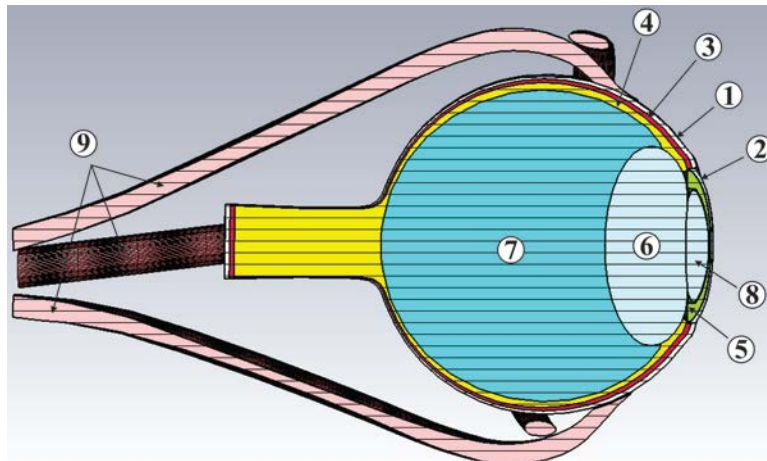
Model oka se sastoji iz sledećih delova:

1. Beonjača (Sclera),
2. Rožnjača (Cornea),
3. Sudovnjača (Choroid),
4. Mrežnjača (Retina),
5. Dužica (Iris),
6. Sočivo (Lens),
7. Staklasto telo (Vitreous Body),

8. Očna vodica (Aqueous Humor),
9. Mišići oka.



Slika 6.1 Spoljašnji izgled modela oka (oko sa mišićima)



Slika 6.2 Poprečni presek modela oka deteta

U procesu simulacije biće razmatran uticaj zračenja mobilnog telefona na oči modela deteta za različite udaljenosti od prednjeg dela lica. Telefon je postavljen vertikalno ispred modela glave deteta u položaj koji je pogodan za gledanje sadržaja sa ekrana telefona na rastojanjima od 3, 6, 9 i 12cm. Kao rezultat uticaja zračenja telefona biće analizirane sledeće veličine: električno polje,  $SAR_{1g}$ ,  $SAR_{10g}$  i temperatura. Snaga zračenja antene mobilnog telefona je 1W, a noseća frekvencija mobilnog telefona je 900MHz.

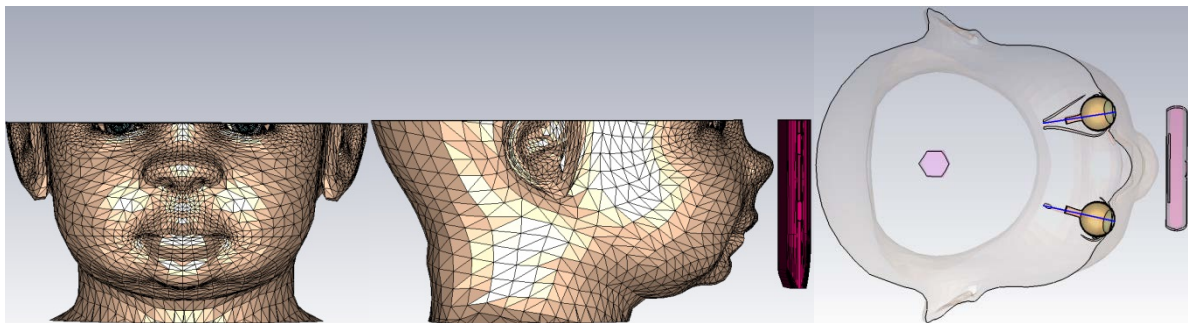
U tabeli 6.1 date su elektromagnetske osobine tkiva koja čine oko [124, 137] dok su osobine modela glave već opisane u poglavlju 3.3. Brojevi na slici 6.2 odgovaraju rednom broju ispred odgovarajućeg tkiva oka u tabeli 6.1.



Tabela 6.1 Elektromagnetske osobine tkiva oka za  $f = 900\text{MHz}$

	Tkivo	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
1.	Beonjača	55.30	1.170	1032
2.	Rožnjača	55.20	1.390	1051
3.	Sudovnjača	59.20	2.110	1060
4.	Mrežnjača	53.42	1.670	1039
5.	Dužica	30.74	0.880	1040
6.	Sočivo	35.80	0.485	1076
7.	Staklasto telo	68.90	1.640	1005
8.	Očna vodica	68.52	2.090	1010
9.	Mišići oka	55.00	0.943	1090

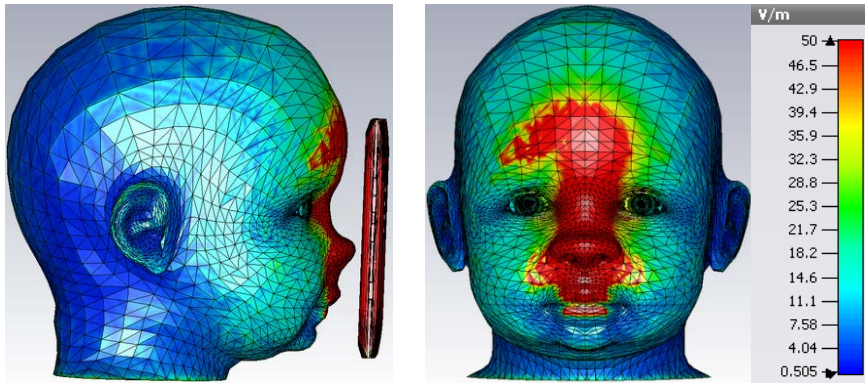
Na slici 6.3 prikazan je presek modela glave deteta sa pravcima po kojim će se vršiti analiza promene intenziteta električnog polja, vrednosti SAR i temperature.



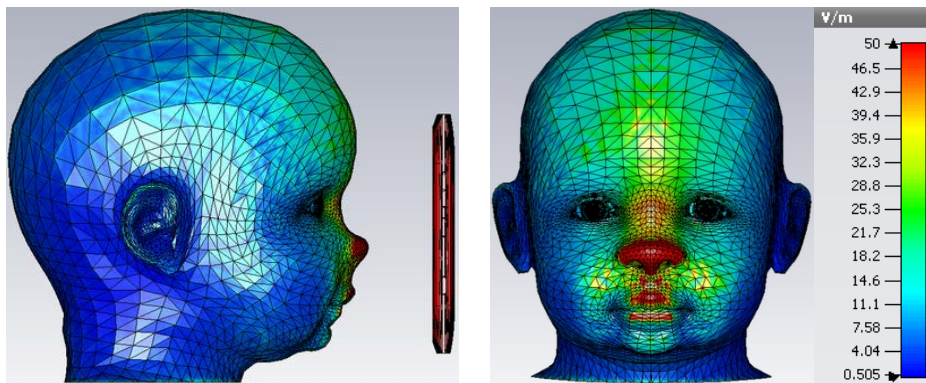
Slika 6.3 Presek modela glave deteta po sredini očiju sa ucrtanim pravcima za analizu

## 6.1 Vrednost intenziteta električnog polja

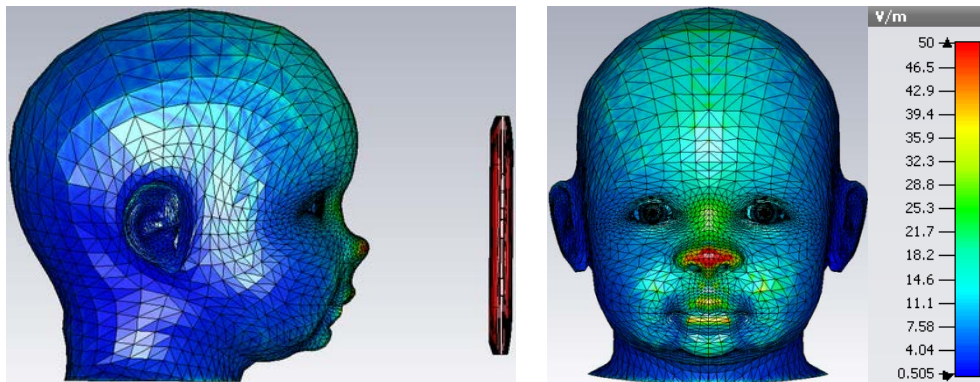
Na slikama 6.4-6.7 dat je uporedni prikaz intenziteta električnog polja na površini modela glave deteta. Paleta koja pokazuje vrednost intenziteta električnog polja je podešena na istu vrednost za sva rastojanja od izvora zračenja kako bi razlike bile uočljivije.



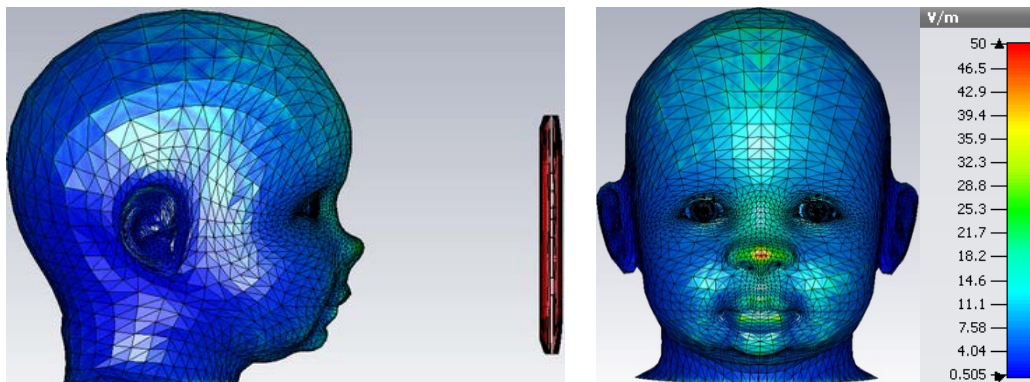
Slika 6.4  $E$  [V/m] po površini modela glave za rastojanju od 3cm od telefona



Slika 6.5  $E$  [V/m] po površini modela glave za rastojanja od 6cm od telefona



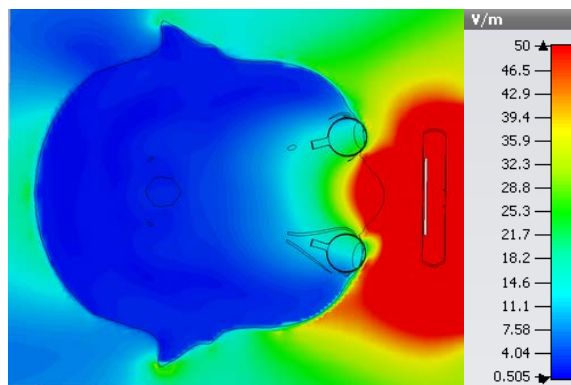
Slika 6.6  $E$  [V/m] po površini modela glave za rastojanja od 9cm od telefona



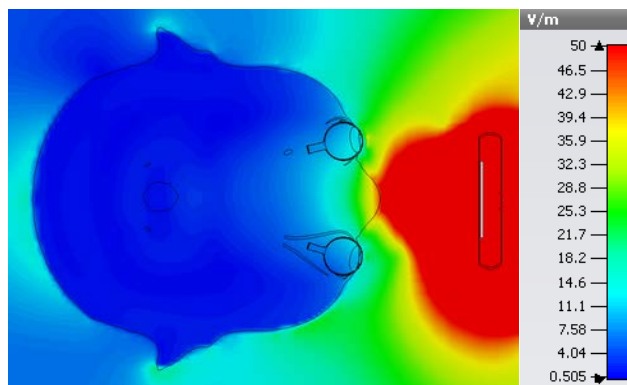
Slika 6.7  $E$  [V/m] po površini modela glave za rastojanja od 12cm od telefona

Analizom slika 6.4-6.7, vidimo da su najveće vrednosti intenziteta električnog polja na potezu od gornje usne do čela. To je i razumljivo jer je upravo ovaj deo lica najbliži mobilnom telefonu pa je tu i nivo zračenja najveći. Kako udaljenost telefona od lica raste, smanjuju se i vrednost intenziteta električnog polja. Vidimo da je maksimum električnog polja za sve slučajeve udaljavanja od telefona na površini nosa koji je uvek najbliži izvoru zračenja.

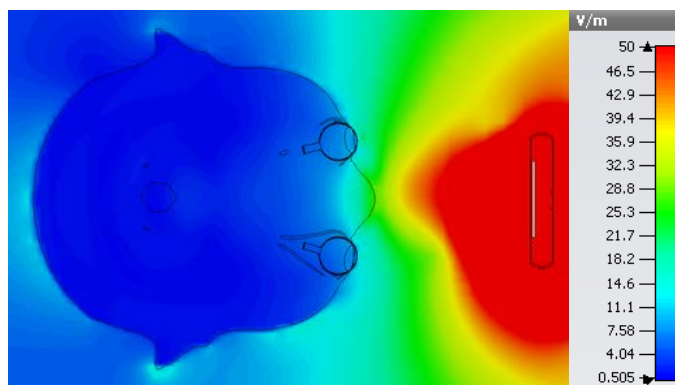
Na slikama 6.8-6.11, prikazane su vrednosti intenziteta električnog polja unutar glave modela za horizontalni poprečni presek u visini zenica očiju.



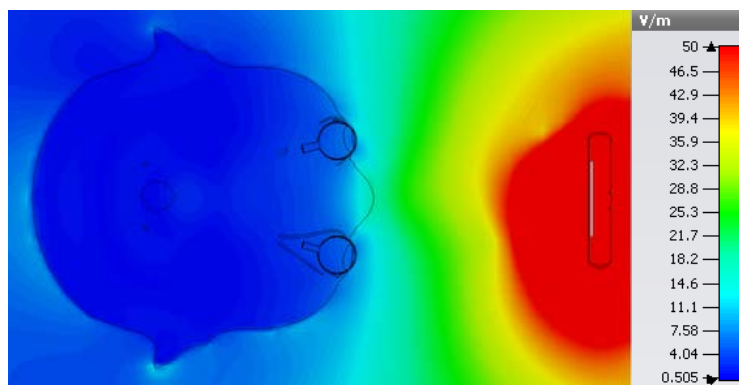
Slika 6.8  $E$  [V/m] za horizontalni poprečni presek za rastojanje od 3cm od telefona



Slika 6.9  $E$  [V/m] za horizontalni poprečni presek za rastojanje od 6cm od telefona



Slika 6.10  $E$  [V/m] za horizontalni poprečni presek za rastojanje od 9cm od telefona

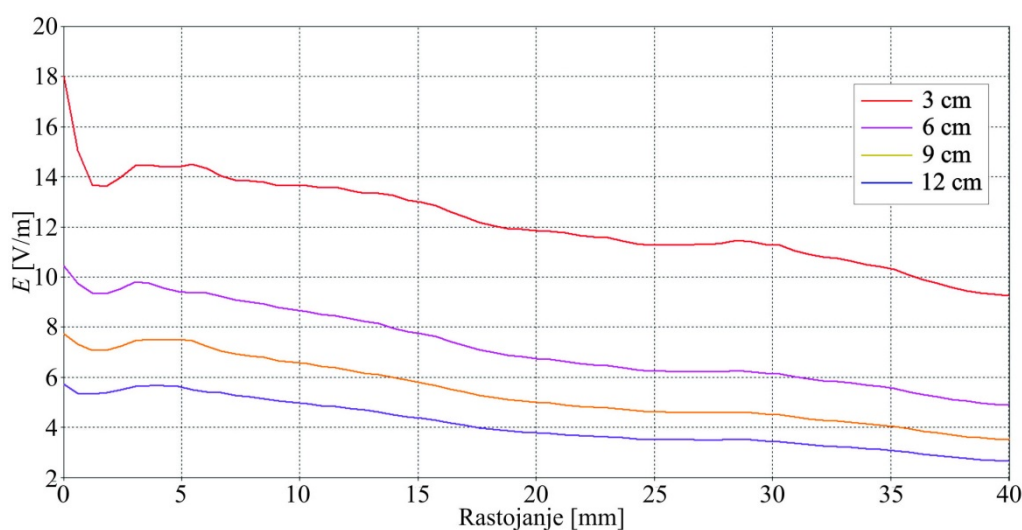


Slika 6.11  $E$  [V/m] za horizontalni poprečni presek za rastojanje od 12cm od telefona

Lako je pretpostaviti na osnovu slika 6.4-6.7, da će i vrednosti intenziteta električnog polja unutar glave modela a samim tim i dubina prodiranja polja biti najveća za slučaj kada je izvor zračenja najbliži licu modela glave deteta.

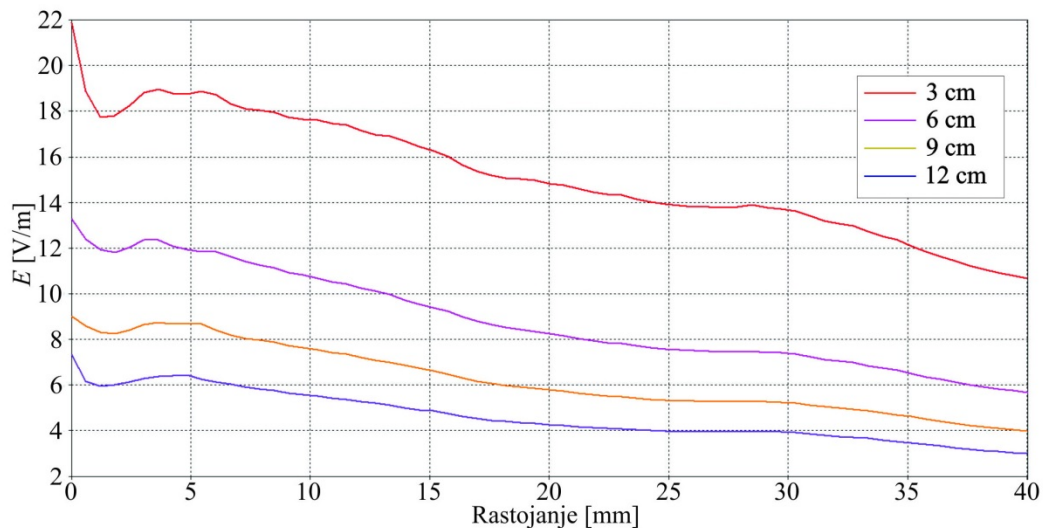
Sa povećanjem rastojanja telefona od glave modela vrednosti intenziteta električnog polja značajno opadaju. Kao što se vidi sa slika 6.8-6.11, najveće vrednosti intenziteta električnog polja su u unutrašnjosti nosa i lobanje, tj. u koži, masnom tkivu i kostima lobanje. Vidimo da su vrednosti intenziteta električnog polja u sva četiri slučaja na granici referentnog graničnog nivoa za električno polje ili iznad ove granice (16.5V/m na 900MHz). Sa slike 6.8 vidimo da elektromagnetski talas prodire duboko u glavu modela i da su do dubine od nekoliko centimetara vrednosti polja iznad referentnog graničnog nivoa.

Na slikama 6.12 i 6.13 dati su grafici zavisnosti intenziteta električnog polja za oba oka u funkciji rastojanja od izvora zračenja za pravce koji prolaze po sredini očiju.



Slika 6.12  $E$  [V/m] za desno oko za sve četiri udaljenosti od telefona

Sa slike 6.12 vidimo da je oblik kriva zavisnosti intenziteta električnog polja od rastojanja u desnom oku sličan za sva četiri rastojanja oka od izvora. Najviše vrednosti su za slučaj rastojanja od 3cm i idu od 18V/m na početku oka do 9.3V/m na kraju očnog živca. Za udaljenost od 6cm maksimalna vrednost polja je 10.5V/m, za 9cm 7.7V/m i za 12cm 5.7V/m. Minimalne vrednosti polja na kraju očnog živca su 4.8V/m, 3.5V/m i 2.7V/m, respektivno.



Slika 6.13  $E$  [V/m] za levo oko za sve četiri udaljenosti od telefona

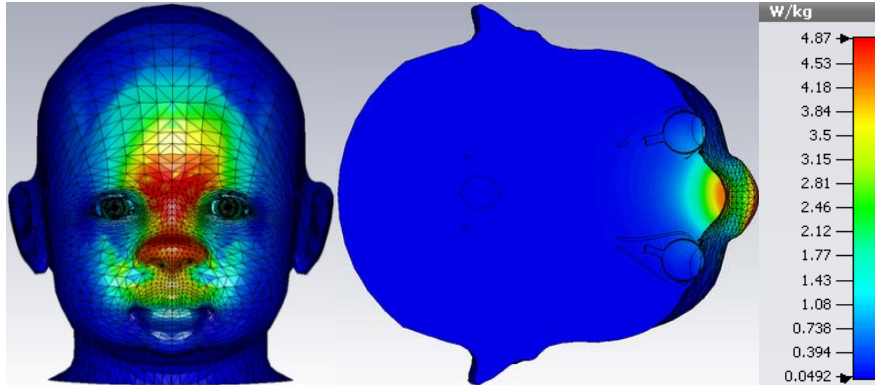
Na slici 6.13 dat je oblik kriva zavisnosti intenziteta električnog polja od rastojanja u levom oku za sva četiri rastojanja oka od izvora. Najviše vrednosti su za slučaj rastojanja od 3cm i idu od 22V/m na početku oka do 10.8V/m na kraju očnog živca. Za rastojanje od 6cm maksimalna vrednost polja je 13.3V/m, za 9cm 9V/m i za 12cm 7.3V/m. Minimalne vrednosti polja na kraju očnog živca su 5.7V/m, 4V/m i 3V/m, respektivno.

Ono što se može primetiti iz ove analize jeste da su vrednosti intenziteta električnog polja više u levom oku nego u desnom oku. Više vrednosti intenziteta električnog polja u levom oku su posledica karakteristike zračenja PIFA antene i položaja u kom se nalazi mobilni telefon.

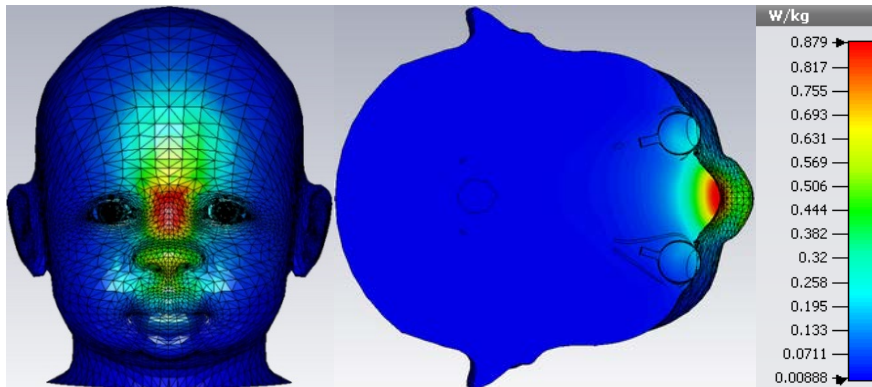
## 6.2 Raspodela vrednosti SAR

Imajući u vidu da je oko mali organ i da je njegova težina manja od 10g, nepotrebno je analizirati raspodelu  $SAR_{10g}$  jer će pri analizi u konačnoj zapremini svakako biti obuhvaćen i deo tkiva koji ne pripada oku.

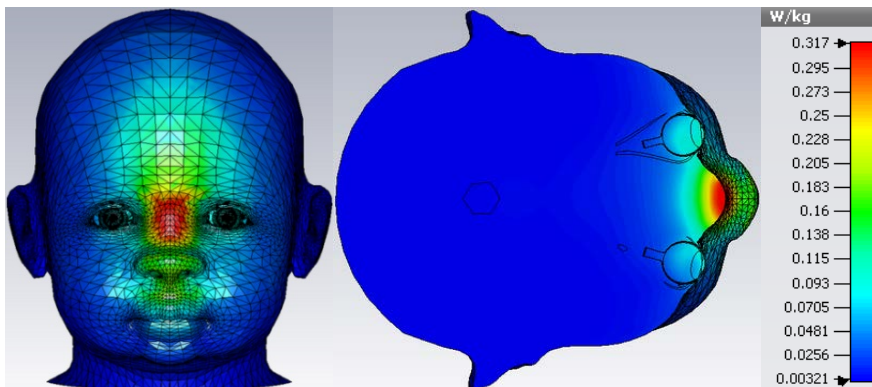
Raspodela vrednosti  $SAR_{1g}$  na površini modela glave deteta i za horizontalni poprečni presek u visini zenica očiju i različite udaljenosti od izvora zračenja data je na slikama 6.14-6.17



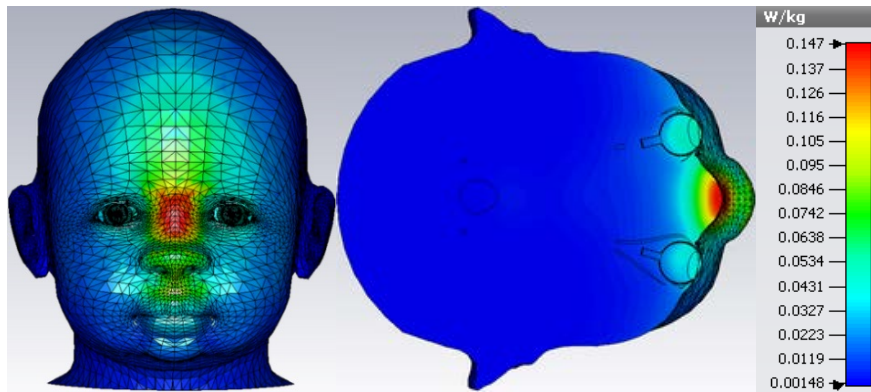
Slika 6.14 Raspodela  $SAR_{1g}$  [W/kg] za udaljenost od 3cm modela glave deteta od telefona



Slika 6.15 Raspodela  $SAR_{1g}$  [W/kg] za udaljenost od 6cm modela glave deteta od telefona



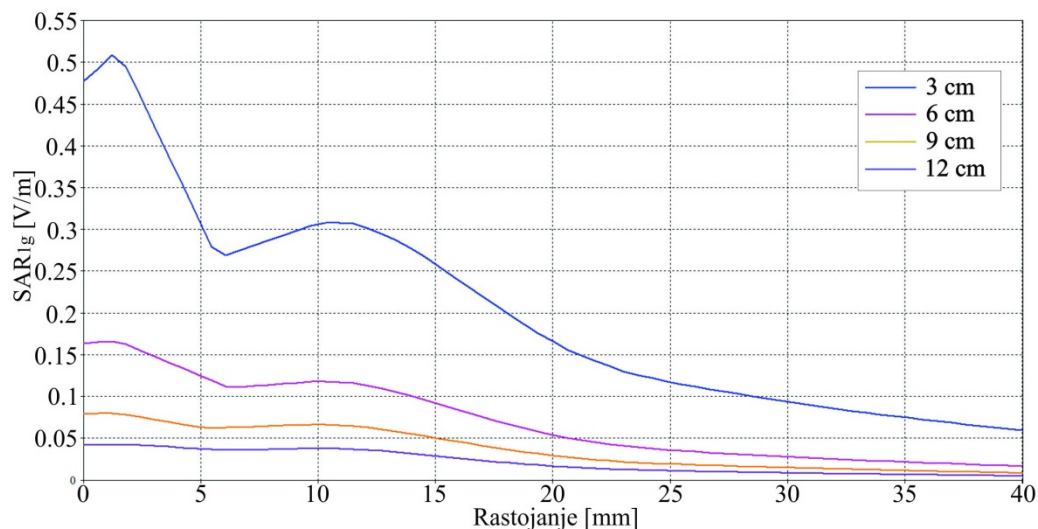
Slika 6.16 Raspodela  $SAR_{1g}$  [W/kg] za udaljenost od 9cm modela glave deteta od telefona



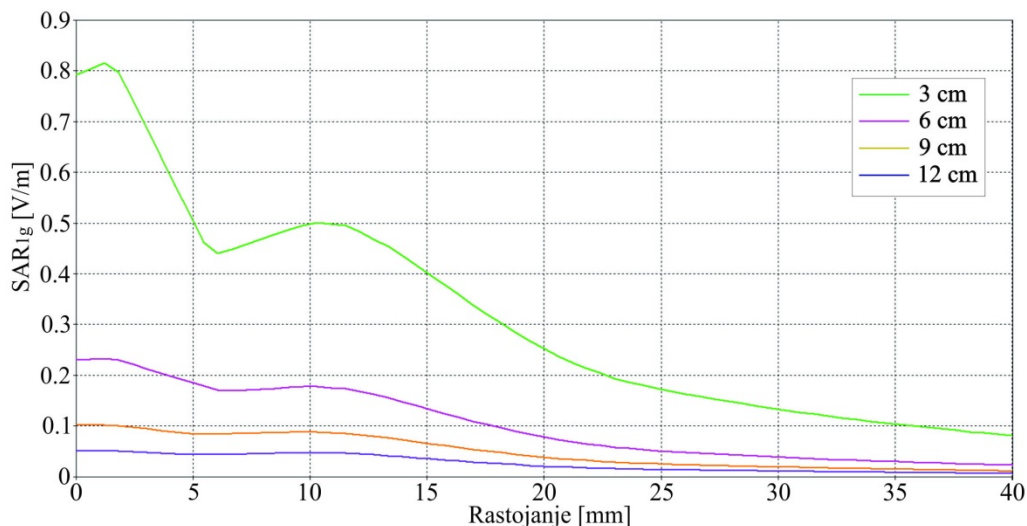
Slika 6.17 Raspedela  $SAR_{1g}$  [W/kg] za udaljenost od 12cm modela glave deteta od telefona

Kao i kod intenziteta električnog polja, najveća količina apsorbovane energije će biti skoncentrisana na prednjem delu lica od gornje usne do čela. Međutim, vidimo da su ovde najveće vrednosti na gornjem delu nosa, za razliku od vrednosti intenziteta električnog polja gde je to bilo na donjem delu nosa. Maksimalna vrednosti  $SAR_{1g}$  na rastojanju od 3cm je  $4.87W/kg$ , što je značajno više od vrednosti bazičnog ograničenja (za oko 3 puta). Visoke vrednosti  $SAR_{1g}$  su prisutne i u unutrašnjosti modela, što se može videti na osnovu poprečnog preseka sa slike 6.14. Za ostala rastojanja glave od telefona ove vrednosti su značajno manje od vrednosti bazičnog ograničenja.

Na slikama 6.18 i 6.19 date su krive zavisnosti  $SAR_{1g}$  od rastojanja za desno i levo oko, respektivno.



Slika 6.18 Grafik raspodele  $SAR_{1g}$  [W/kg] za desno oko za sve četiri udaljenosti od telefona



Slika 6.19 Grafik raspodele  $SAR_{1g}$  [W/kg] za levo oko za sve četiri udaljenosti od telefona

Poput kriva zavisnosti intenziteta električnog polja od rastojanja i u slučaju raspodele  $SAR_{1g}$  oblik kriva je gotovo identičan. Najviša zabeležena vrednost za  $SAR_{1g}$  je u levom oku i to za rastojanje od 3cm i iznosi 0.82W/kg, dok je u desnom 0.51W/kg. Za ostala rastojanja ove vrednosti su daleko manje.

### 6.3 Raspodela temperature

Kao što je već diskutovano, apsorpcija elektromagnetske energije u biološkom tkivu rezultira povećanjem temperature u tom tkivu. Shodno tome, imamo pojavu zagrevanja očiju kada su izložena zračenju mobilnog telefona. Kao što je već bilo reči, raspodela temperature u očima dobija se rešavanjem Peneove *bioheat* jednačine. Da bismo rešili BHT jednačinu, neophodno je zadati odgovarajuće toplotne parametre za tkiva oka (Tabela 6.2). Spoljašnja temperatura je podešena na 25°C, a temperatura krvi na 37°C.

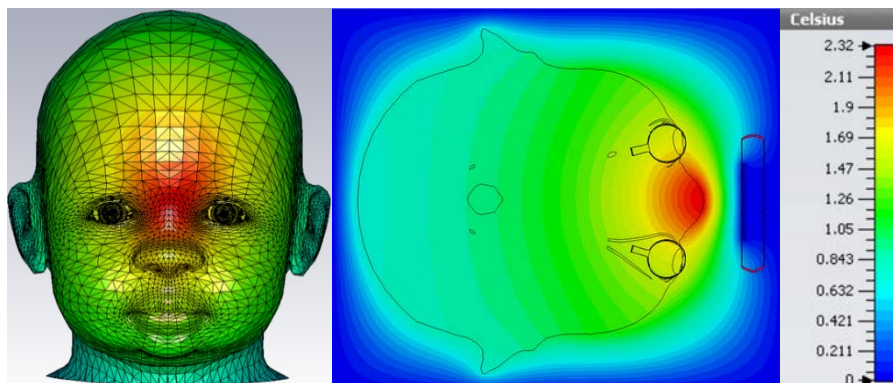
U tabeli 6.2,  $k$  je termalna provodnost,  $c$  je specifična toplota i  $B$  je koeficijent perfuzije krvi.

Na slikama 6.20-6.23 prikazana je promena temperature na površini modela glave deteta i za horizontalni presek po sredini očiju. Početna temperatura od 37°C je u tabeli podešena na 0. U svim slučajevima je simulirano korišćenje mobilnog telefona pri konstantnoj snazi od 1W i za vremenski period od 30min. Vreme koje prosečni korisnik provede čitajući sadržaj sa ekrana telefona je duže nego prilikom razgovora, pa se samim tim i vreme trajanja ekspozicije prilikom čitanja razlikuje u odnosu na vreme simulacije prenosa govora.



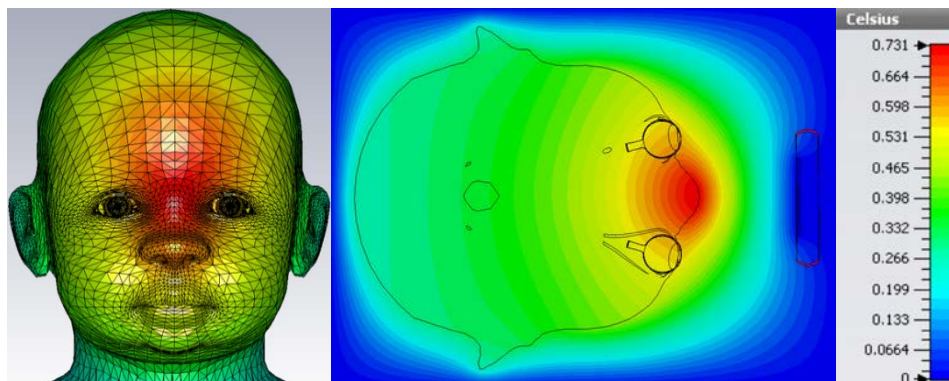
Tabela 6.2 Toplotni parametri tkiva oka [137]

Tkivo	$k$ [W/m°C]	$c$ [J/kg°C]	$B$ [W/m <sup>3</sup> °C]
1. Beonjača	0.58	3800	80000
2. Rožnjača	0.52	3600	0
3. Sudovnjača	0.58	3800	80000
4. Mrežnjača	0.58	3800	80000
5. Dužica	0.52	3600	35000
6. Sočivo	0.40	3000	0
7. Staklasto telo	0.58	4000	0
8. Očna vodica	0.58	4000	0
9. Mišići oka	0.50	3800	2700

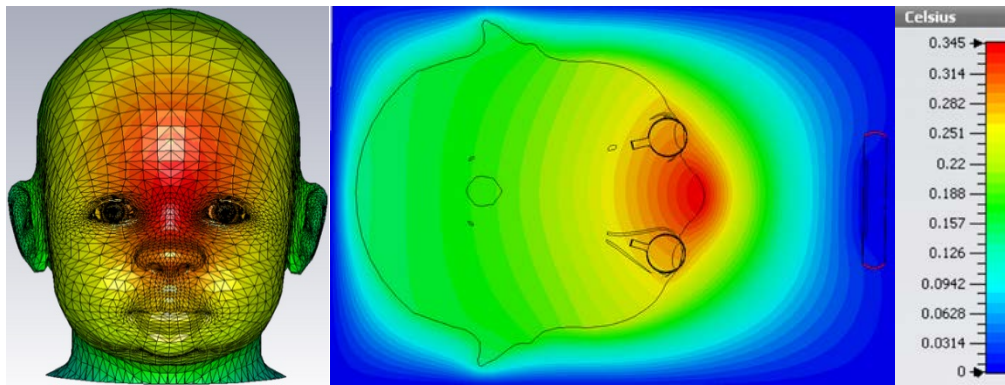


Slika 6.20 Promena temperature  $\Delta T$  [°C] za udaljenost telefona od 3cm od glave deteta

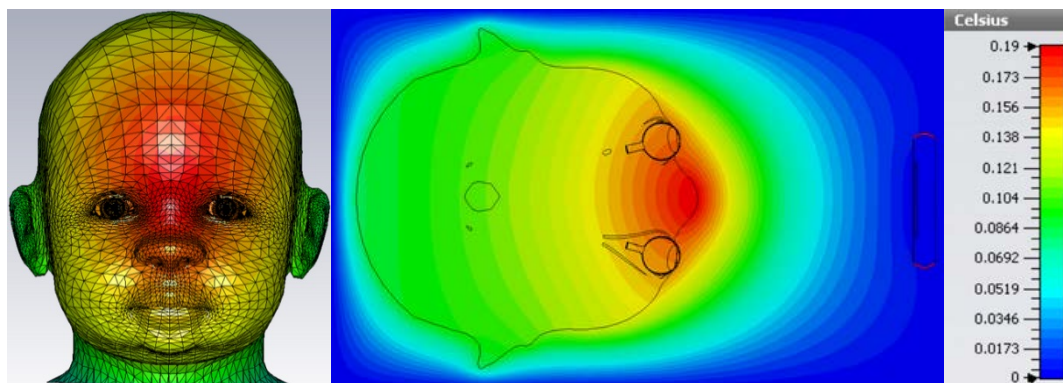
Vidimo sa slike 6.20 da je maksimalno povećanje temperature čak 2.32°C od početne i da se u gotovo dve trećine modela glave deteta porast temperature nije manji od 1°C. Najviše vrednosti temperature su pre svega u koži nosa, masnom tkivu i lobanji modela glave. Isto tako, možemo zapaziti da su i u očima prisutne značajno povišene vrednosti temperature.



Slika 6.21 Promena temperature  $\Delta T$  [°C] za udaljenost telefona od 6cm od glave deteta



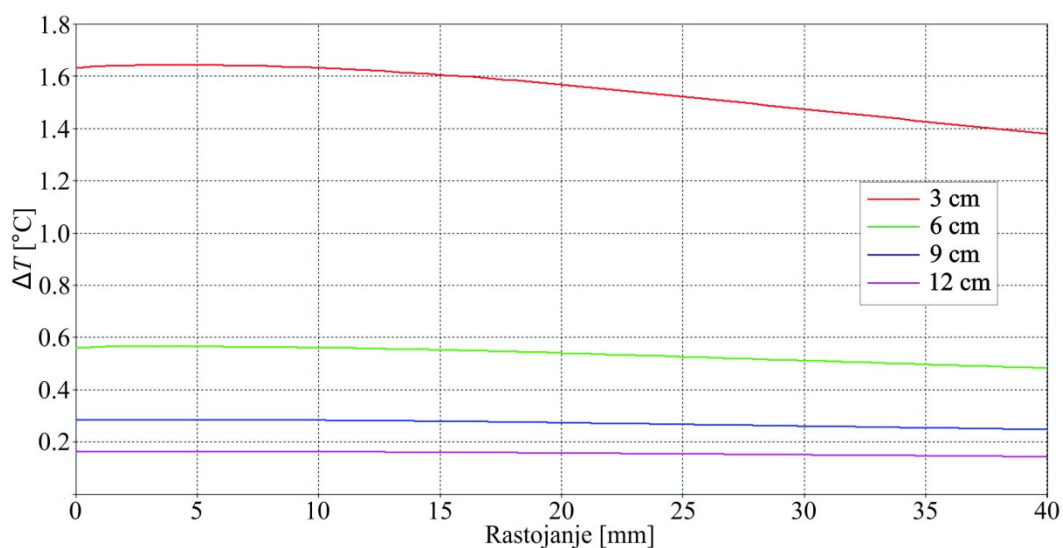
Slika 6.22 Promena temperature  $\Delta T$  [°C] za udaljenost telefona od 9cm od glave deteta



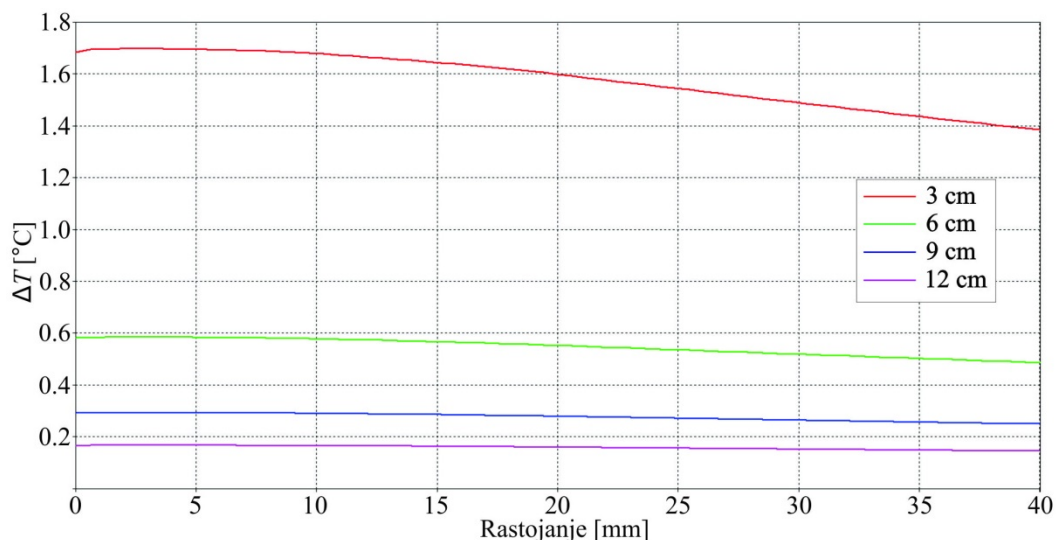
Slika 6.23 Promena temperature  $\Delta T$  [°C] za udaljenost telefona od 12cm od glave deteta

Relativno više vrednosti porasta temperature,  $0.73^{\circ}\text{C}$ , prisutne su i za slučaj udaljenosti telefona od glave deteta od 6cm, dok su u ostalim slučajevima ove vrednosti dosta niže,  $0.345^{\circ}\text{C}$  i  $0.19^{\circ}\text{C}$  za 9cm i 12cm, respektivno.

Na slikama 6.24 i 6.25 date su krive promene temperature  $\Delta T$  [°C] u funkciji rastojanja za desno i levo oko duž pravaca.



Slika 6.24 Porast temperature  $\Delta T$  [°C] za desno oko za sva četiri rastojanja



Slika 6.25 Porast temperature  $\Delta T$  [°C] za levo oko za sva četiri rastojanja

Oblik kriva promene temperature u funkciji rastojanja za oba oka daleko je uniformniji nego kod promene intenziteta električnog polja i SAR. Takođe, primetna je mnogo manja razlika između donjih i gornjih granica promene temperature, tj. raspodela temperature je prilično homogena.

Za desno oko duž pravca za slučaj rastojanja od 3cm, najveća promena je  $1.64^{\circ}\text{C}$  a najmanja  $1.38^{\circ}\text{C}$ . Razlika u temperaturi između početka oka i kraja očnog živca je samo  $0.26^{\circ}\text{C}$ , što je smanjenje od oko 15.8% od maksimalne vrednosti. Za 6cm najviša promena je  $0.565^{\circ}\text{C}$  na početku oka, za 9cm  $0.284^{\circ}\text{C}$  i za 12cm je  $0.162^{\circ}\text{C}$ . Za sva tri slučaja odstupanje najviših i najnižih vrednosti je u proseku između 12 i 15%.

Kod levog oka duž pravca vrednosti su neznatno više, tako da za rastojanja od 3cm najveća promena je  $1.695^{\circ}\text{C}$ , za 6cm  $0.585^{\circ}\text{C}$ , za 9cm  $0.293^{\circ}\text{C}$  i za 12cm  $0.166^{\circ}\text{C}$ . Za sva rastojanja, odstupanje najviših i najnižih vrednosti je od 18 do 13% kako rastojanje raste.

Na osnovu prethodne analize vidimo da je referentni granični nivo za vrednosti intenziteta električnog polja prekoračen u slučaju kada se telefon nalazi veoma blizu očiju deteta i te vrednosti idu do oko  $30\text{V/m}$  unutar oka. Za ostala rastojanja te vrednosti su značajno manje.

Na osnovu dobijenih vrednosti za  $\text{SAR}_{1g}$  za sva rastojanja, možemo videti da gotovo ni u jednom slučaju nije premašena vrednost bazičnog ograničenja od  $1.6\text{W/kg}$ . Ova vrednost je premašena samo za rastojanje telefona od glave od 3cm i to u oblasti između očiju, ali ne i u očima modela glave deteta.

Najveće povećanje temperature, kako je i očekivano, je dobijeno za slučaj kada je telefon najbliži glavi modela i to od  $2.32^{\circ}\text{C}$ . Međutim, to povećanje temperature nije prisutno

u očima već u delu između očiju. U očima je najveći porast temperature  $1.8^{\circ}\text{C}$  za to rastojanje, dok u ostalim slučajevima ta vrednost opada na  $0.2^{\circ}\text{C}$  za najveću simuliranu udaljenost.

Tokom uobičajnog korišćenja mobilnog telefona za čitanja sadržaja sa ekrana, telefon se nalazi na rastojanjima koja su veća od onih koja su korišćena tokom simulacije. Imajući u vidu prethodnu analizu možemo reći da očekivane vrednosti intenziteta električnog polja i SAR ne bi trebalo da premaše referentne granične nivoe i bazična ograničenja. Slično prethodnom, i porast temperature u očima ne bi trebalo da dostigne visoke vrednosti za neki kraći period korišćenja telefona.

## 7. Poređenje rezultata simulacije sa aspekta različitih vrednosti elektromagnetskih osobina tkiva kod dece i odraslih

Kao što je već rečeno, većina studija koja se bavi uticajem elektromagnetskog zračenja koje potiče od mobilnih telefona se fokusirala na utvrđivanje apsorbovane energije u standardnim modelima glave odrasle osobe. Isto tako, međunarodni bezbednosni standardi i preporuke o granicama izlaganja elektromagnetskim poljima su razvijeni na osnovu istraživanja za odrasle. Mada svaki od standarda propisuje bezbednosne granice za izlaganje elektromagnetskom polju, potrebno je proceniti koliko su one validne za bezbedno izlaganje dece.

Kao što je ranije pomenuto, razlika između različitog uticaja elektromagnetskog zračenja na odrasle osobe i decu, pored razlike u veličini i obliku glave, ogleda se i u razlici u morfologiji i sastavu tkiva. Tu se pre svega misli na sadržaj vode u tkivu kao i razvoj različitih organa sa godinama.

Analiza uticaja elektromagnetskih osobina tkiva na raspodelu elektromagnetskog polja izvršena je za model glave deteta kod koga su korišćene različite vrednosti elektromagnetskih osobina tkiva i organa. U prvom slučaju, elektromagnetske osobine tkiva i organa su identične odrasloj osobi, a u drugom tkiva i organi imaju elektromagnetske osobine koje su na osnovu raspoloživih podataka prilagođene uzrastu deteta (videti poglavlje 1.2.3).

U tabeli 7.1 su date vrednosti za elektromagnetske osobine tkiva i organa prilagođene deci za različite frekvencije. Vrednosti za elektromagnetske karakteristike tkiva i organa su dobijene procentualnim uvećanjem vrednosti elektromagnetskih osobina tkiva i organa odrasle osobe. To uvećanje se kreće od recimo 5% za hipofizu pa do 25% za kožu, dok su vrednosti elektromagnetskih osobina jezika iste kao kod odrasle osobe [23, 28, 138-140].

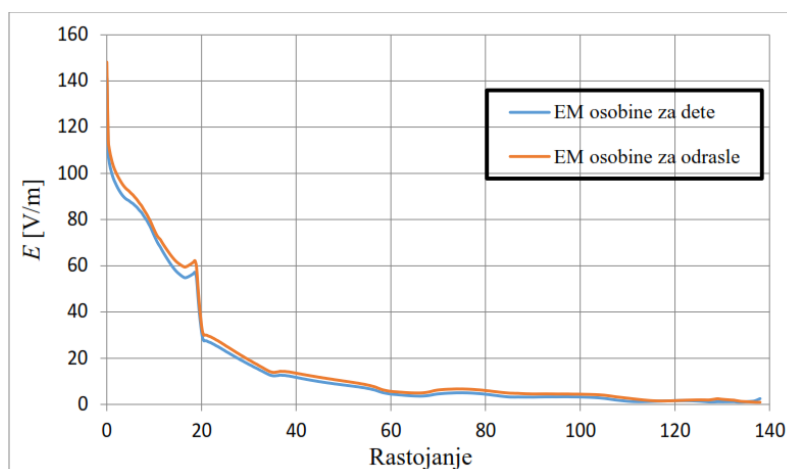
Tabela 7.1 Elektromagnetske osobine tkiva i organa prilagođenih detetu za 0.9, 1.8 i 2.1GHz

Tkiva/organi	0.9GHz		1.8GHz		2.1GHz	
	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)
1. Kost	14.79	0.180	14.02	0.345	13.78	0.412
2. Mozak*	55.24	0.960	55.60	2.140	54.87	2.354
3. Moždana voda	81.84	2.930	80.17	3.550	79.69	3.830
4. Masno tkivo	13.48	0.132	13.12	0.230	13.00	0.271
5. Hrskavica	49.11	0.899	46.23	1.484	45.43	1.714
6. Hipofiza	62.09	1.082	60.10	1.575	60.00	1.768
7. Kičmena moždina	38.77	0.697	36.86	1.023	36.39	1.154
8. Mišići glave	62.32	1.065	60.61	1.513	60.28	1.705
9. Oko*	59.17	1.212	55.24	1.669	57.12	1.865
10. Koža	51.58	1.078	48.47	1.468	47.85	2.135
11. Jezik	55.30	0.936	53.60	1.370	53.10	1.560
12. Zubi	14.79	0.180	14.02	0.345	13.78	0.412
13. Pršljenovi	14.79	0.180	14.02	0.345	13.78	0.412

\* Elektromagnetske osobine organa su uzete kao srednja vrednost.

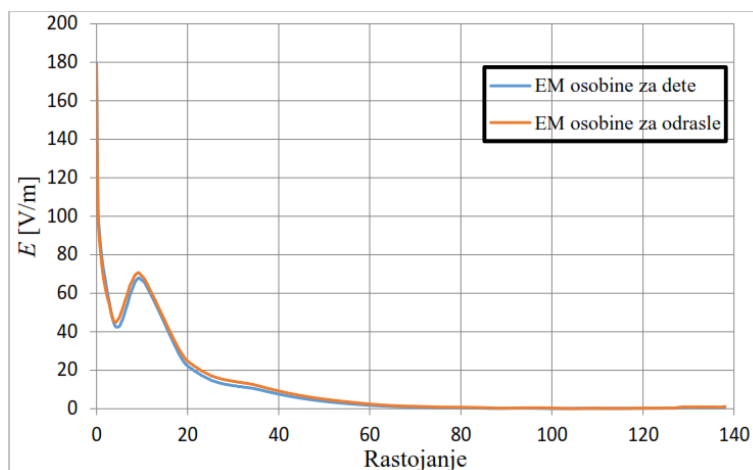
## 7.1 Poređenje vrednosti intenziteta električnog polja

Na slikama 7.1-7.3 prikazan je uporedni prikaz vrednosti intenziteta električnog polja za model glave deteta za slučaj različitih vrednosti elektromagnetskih osobina tkiva i za sve tri frekvencije, respektivno.

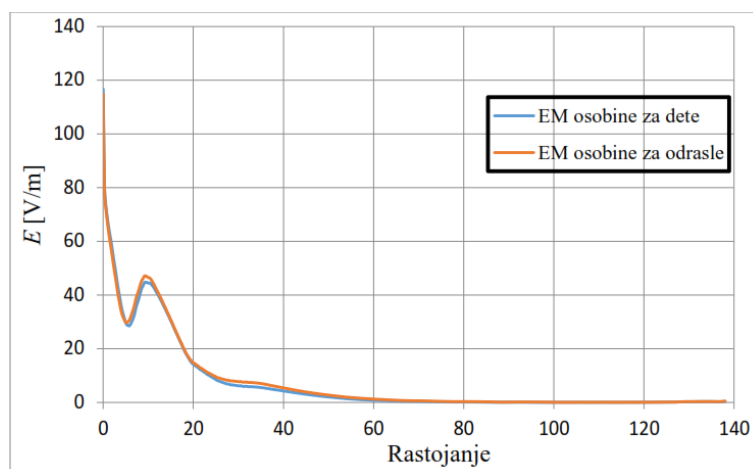


Slika 7.1 Grafik promene intenziteta električnog polja za različite EM osobine na  $f=0.9\text{GHz}$

Ako pogledamo sliku 7.1, uočava se izvesno odstupanje vrednosti intenziteta električnog polja za  $f=0.9\text{GHz}$  za slučaj kada se koriste elektromagnetske osobine tkiva odrasle osobe i elektromagnetske osobine deteta. Intenzitet električnog polja u slučaju elektromagnetskih osobina tkiva za odraslu osobu je uglavnom veći nego za slučaj elektromagnetskih osobina za dete. Najveće odstupanje vrednosti intenziteta električnog polja je u površinskom sloju modela tj. u koži i iznosi  $7\text{V/m}$ .



Slika 7.2 Grafik promene intenziteta električnog polja za različite EM osobine na  $f=1.8\text{GHz}$



Slika 7.3 Grafik promene intenziteta električnog polja za različite EM osobine na  $f=2.1\text{GHz}$

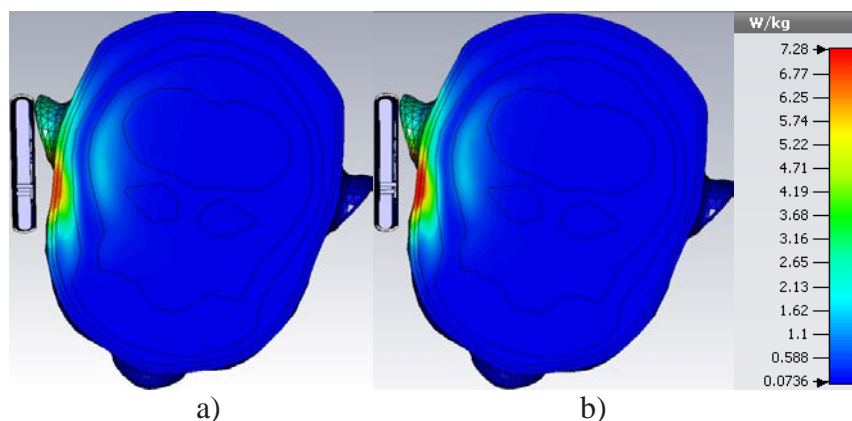
Vidimo da je maksimalna vrednost intenziteta električnog polja za frekvenciju od  $1.8\text{GHz}$  (slika 7.2), veća u slučaju korišćenja elektromagnetskih osobina tkiva/organa za dete za oko  $4.4\text{V/m}$ . Ovo povećanje je zabeleženo u koži i delu masnog tkiva. U ostalim slučajevima polje je uglavnom veće u slučaju korišćenja elektromagnetskih osobina tkiva/organa za odraslu osobu i najveće odstupanje iznosi  $5.6\text{V/m}$  (što predstavlja povećanje od 11.5% u odnosu na model sa elektromagnetskim osobinama za dete).

Na frekvenciji od 2.1GHz, (slika 7.3) intenzitet električnog polja za slučaj elektromagnetskih osobina deteta je veći u koži i masnom tkivu za oko 2.7V/m. U ostalim slučajevima polje je veće u slučaju korišćenja elektromagnetskih osobina tkiva za odraslu osobu, tako da najveće odstupanje iznosi 3.4V/m (što predstavlja povećanje od 9.5% u odnosu na model sa elektromagnetskim osobinama za dete).

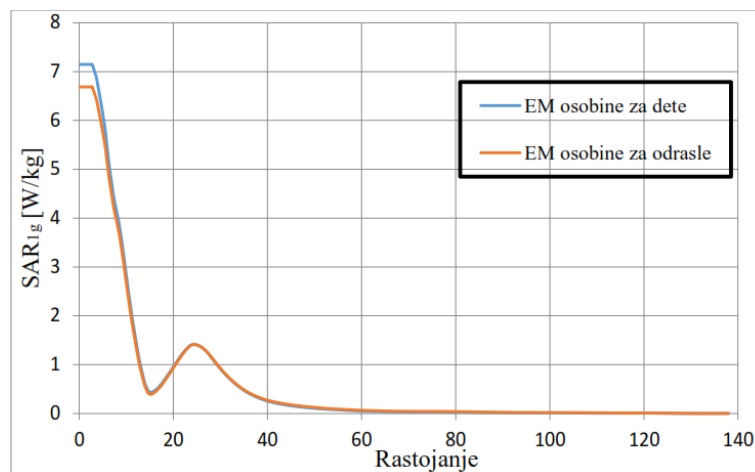
## 7.2 Poređenje raspodele vrednosti SAR

Raspodela  $SAR_{1g}$  i  $SAR_{10g}$  za različite elektromagnetske osobine tkiva modela glave deteta prikazana je na slikama 7.4 i 7.6, respektivno, za frekvenciju  $f=0.9GHz$ .

Sa slika se vidi da je apsorbovana energija u površinskim slojevima modela glave deteta veća kod modela sa vrednostima za elektromagnetske osobine tkiva za dete u oba slučaja, i za slučaj usrednjavanja za 1g i za 10g.



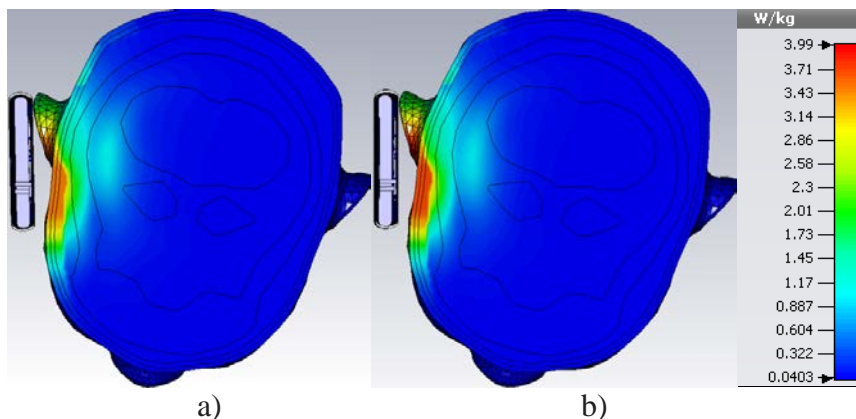
Slika 7.4  $SAR_{1g}$  [W/kg] unutar glave modela deteta: a) sa EM osobinama za odrasle, b) sa EM osobinama za dete za  $f=0.9GHz$



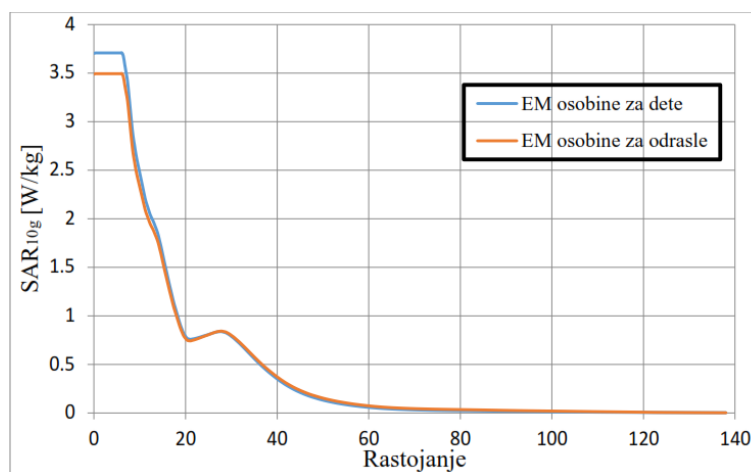
Slika 7.5 Grafik raspodele  $SAR_{1g}$  za različite EM osobine za  $f=0.9GHz$



U slučaju  $SAR_{10g}$ , vrednost SAR veća je kod modela sa elektromagnetskim osobinama za dete za oko 10% u odnosu na model sa elektromagnetskim osobinama odrasle osobe (slika 7.5). Ovaj porast vrednosti za  $SAR_{10g}$  je primetan u površinskim slojevima modela do dubine od oko 25mm. U ostalim slučajevima vrednosti za  $SAR_{10g}$  su neznatno veće kod modela sa elektromagnetskim osobinama za odraslu osobu, tj. ta odstupanja su reda mW/kg.

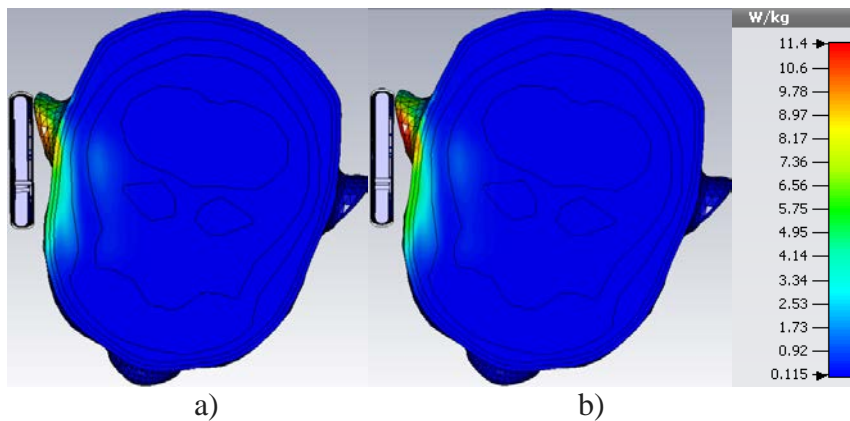


Slika 7.6  $SAR_{10g}$  [W/kg] unutar glave modela deteta: a) sa EM osobinama za odrasle, b) sa EM osobinama za dete za  $f=0.9\text{GHz}$

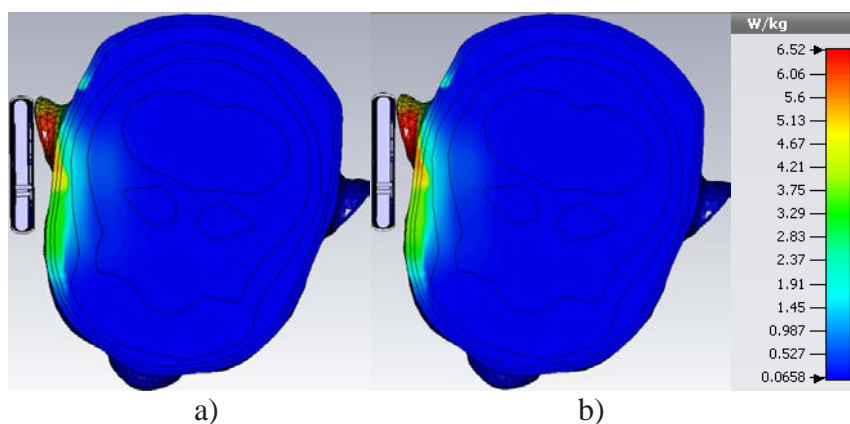


Slika 7.7 Grafik raspodele  $SAR_{10g}$  za različite EM osobine za  $f=0.9\text{GHz}$

U slučaju  $SAR_{10g}$  vrednost je za 0.21W/kg veća kod modela sa elektromagnetskim osobinama za dete (slika 7.7) u površinskim slojevima modela (do dubine od 25mm).



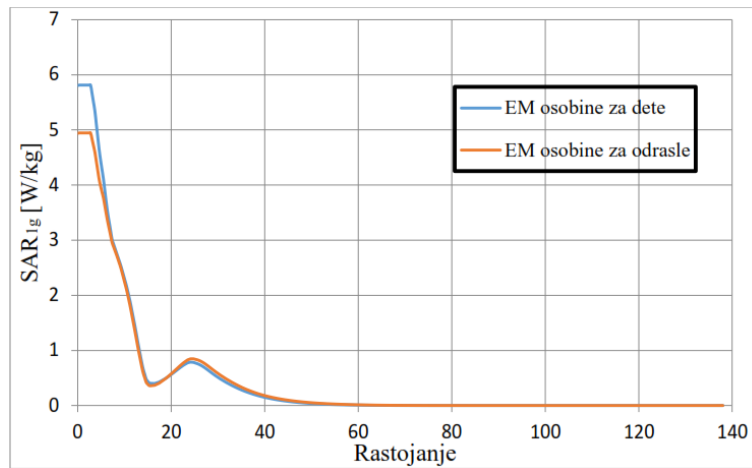
Slika 7.8 SAR<sub>1g</sub> [W/kg] unutar glave modela deteta: a) sa EM osobinama za odrasle, b) sa EM osobinama za dete za  $f=1.8\text{GHz}$



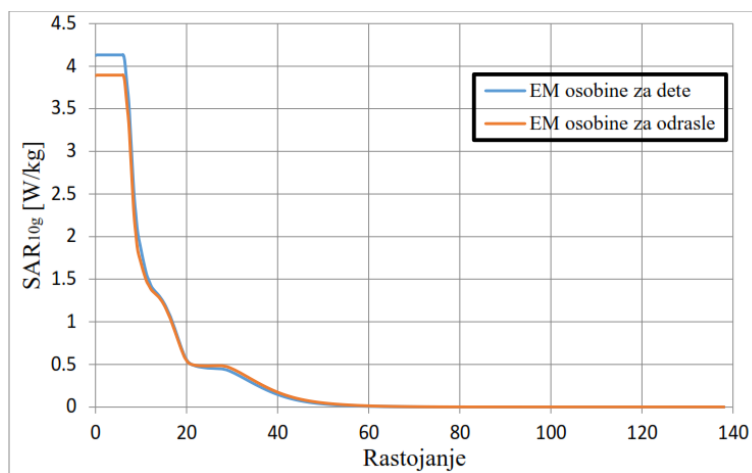
Slika 7.9 SAR<sub>10g</sub> [W/kg] unutar glave modela deteta: a) sa EM osobinama za odrasle, b) sa EM osobinama za dete za  $f=1.8\text{GHz}$

Raspodela SAR<sub>1g</sub> i SAR<sub>10g</sub> za različite elektromagnetske karakteristike tkiva modela prikazana je na slikama 7.8 i 7.9, respektivno, za frekvenciju  $f=1.8\text{GHz}$ .

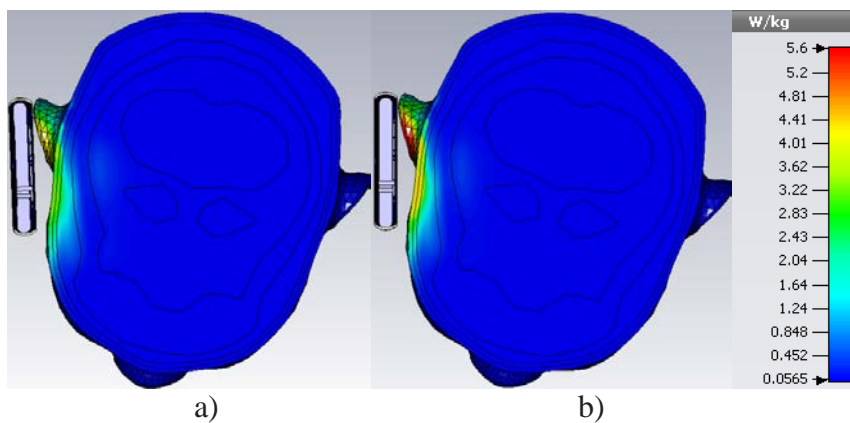
Trend povećanja vrednosti za SAR u površinskim slojevima modela sa elektromagnetskim osobinama tkiva za dete primetan je i za  $f=1.8\text{GHz}$ . Porast od  $0.87\text{W/kg}$  ( $\sim 15\%$ ) je pronađen za SAR<sub>1g</sub> (slika 7.10), dok je za SAR<sub>10g</sub> (slika 7.11) to  $0.25\text{W/kg}$  ( $\sim 10\%$ ).



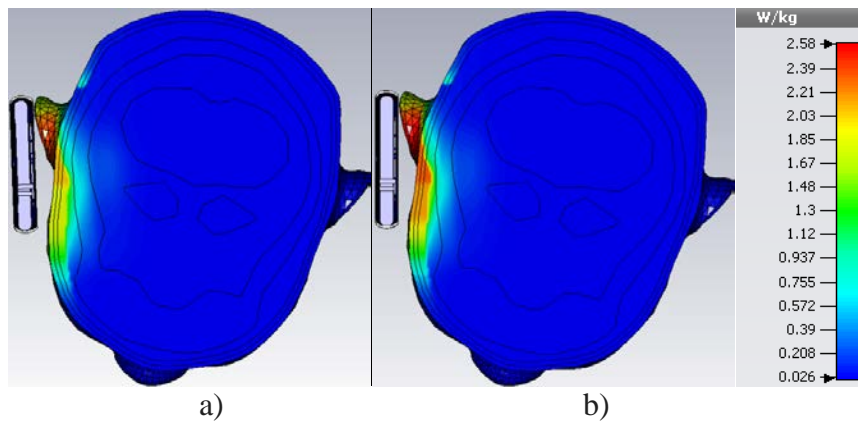
Slika 7.10 Grafik raspodele SAR<sub>1g</sub> za različite EM osobine za  $f=1.8\text{GHz}$



Slika 7.11 Grafik raspodele SAR<sub>10g</sub> za različite EM osobine za  $f=1.8\text{GHz}$

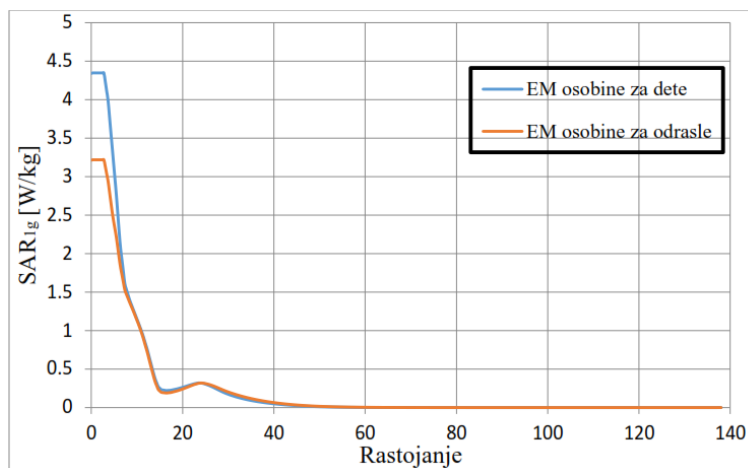


Slika 7.12 SAR<sub>1g</sub> [W/kg] unutar glave modela deteta: a) sa EM osobinama za odrasle, b) sa EM osobinama za dete za  $f=2.1\text{GHz}$

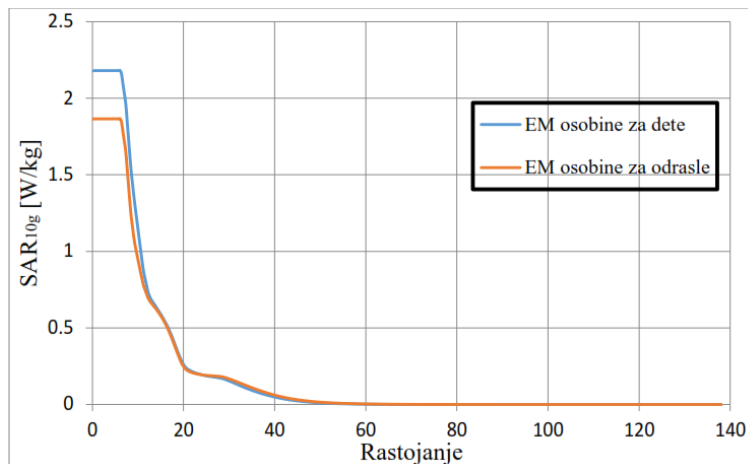


Slika 7.13 SAR<sub>10g</sub> [W/kg] unutar glave modela deteta: a) sa EM osobinama za odrasle, b) sa EM osobinama za dete za  $f=2.1\text{GHz}$

Raspodela SAR<sub>1g</sub> i SAR<sub>10g</sub> na frekvenciji  $f=2.1\text{GHz}$  prikazana je na slikama 7.12 i 7.13, respektivno. Vrednosti za SAR u površinskim slojevima modela sa elektromagnetskim osobinama tkiva za dete su kao i u slučajevima frekvencija od 0.9GHz i 1.8GHz veće nego u modelu sa elektromagnetskim osobinama tkiva za odraslu osobu. Kod SAR<sub>1g</sub> (slika 7.14) to je 1.12W/kg (~26%) dok je za SAR<sub>10g</sub> (slika 7.15) 0.32W/kg (~16%).



Slika 7.14 Grafik raspodele SAR<sub>1g</sub> za različite EM osobine za  $f=2.1\text{GHz}$



Slika 7.15 Grafik raspodele SAR<sub>10g</sub> za različite EM osobine za  $f=2.1\text{GHz}$

Na osnovu prethodno dobijenih rezultata može se zaključiti da iako je oblik krive raspodele za električno polje i SAR za model glave deteta isti kad se koriste elektromagnetske osobine tkiva i odrasle osobe i deteta, izvesna odstupanja u vrednostima postoje. Na većim frekvencijama je primetna veća apsorpcija elektromagnetske energije dok je dubina prodiranja elektromagnetskog talasa veća na nižim frekvencijama.

Povećanje vrednosti za SAR<sub>1g</sub> u površinskim slojevima modela sa elektromagnetskim osobinama tkiva deteta u odnosu na isti model sa elektromagnetskim osobinama tkiva odrasle osobe nije zanemarljivo i ide od 0.46W/kg za  $f=0.9\text{GHz}$  pa do 1.12W/kg za  $f=2.1\text{GHz}$ .

Na osnovu sveobuhvatne analize dva anatomske i geometrijske ista modela glave deteta sa različitim elektromagnetskim osobinama tkiva i organa, evidentno je da su prisutna odstupanja u vrednostima intenziteta električnog polja i SAR.

Analizirajući vrednosti intenziteta električnog polja za oba modela, može se zaključiti da su najveće razlike prisutne u površinskim slojevima, tačnije u koži. Budući da su tu i najviše vrednosti električnog polja za oba slučaja, odstupanje od oko 7V/m procentualno nije veliko. Ono što je zanimljivo jeste da su, osim u početnim slojevima, uglavnom više vrednosti kod modela sa elektromagnetskim osobinama za odraslu osobu. Primera radi, na 0.9GHz je zabeleženo odstupanje od 110%, međutim ta razlika je 1.3V/m. Na 1.8GHz najveće odstupanje je 420%, ali je to svega 0.25V/m.

Za razliku od intenziteta električnog polja, razlike u odstupanjima u vrednosti SAR nisu zanemarljive. To se pre svega odnosi na vrednosti koje su prisutne u površinskim slojevima modela glave deteta. I kod SAR<sub>1g</sub> i SAR<sub>10g</sub> u površinskim slojevima su zabeležene više vrednosti u slučaju modela deteta kada se koriste elektromagnetske karakteristike za tkiva/organe deteta. Procentualno za SAR<sub>1g</sub> više su za od 10% (0.46W/kg) na 0.9GHz do 26%

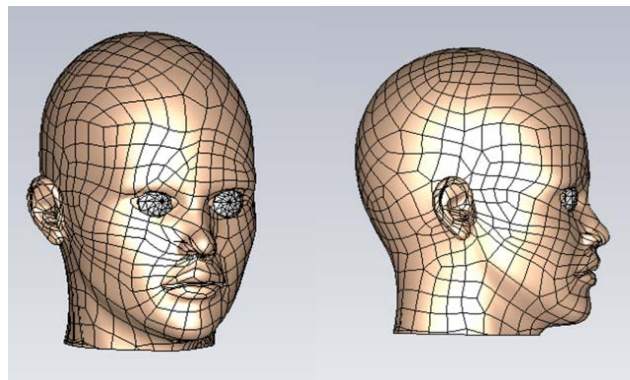
(1.12W/kg) na 2.1GHz. Ova povećanja nisu mala imajući u vidu činjenicu da su dobijene vrednosti za SAR<sub>1g</sub> kod modela sa elektromagnetskim osobinama za odraslu osobu od 2 do 4.2 puta veće od maksimalno dozvoljenih 1.6W/kg. Za SAR<sub>10g</sub> više vrednosti za model sa elektromagnetskim osobinama deteta su više procentualno od 6% do 16%, u proseku oko 0.3W/kg. Kako su na 0.9GHz i 1.8GHz vrednosti za SAR<sub>10g</sub> već bile premašene i do 2 puta za model sa elektromagnetskim osobinama za odraslu osobu, ovo povećanje dodatno podiže nivo SAR u površinskim slojevima glave deteta. Na 2.1GHz ova vrednost je bila ispod maksimalno dozvoljene granice od 2W/kg kod modela sa elektromagnetskim osobinama za odraslu osobu, tako da sa ovim povećanjem vrednost za SAR<sub>10g</sub> malo premašuje graničnu vrednost kod modela sa elektromagnetskim osobinama tkiva/organa deteta.

Generalno, kao zaključak analize uticaja morfoloških osobina tkiva i organa na raspodelu elektromagnetskog polja nameću se sledeće činjenice:

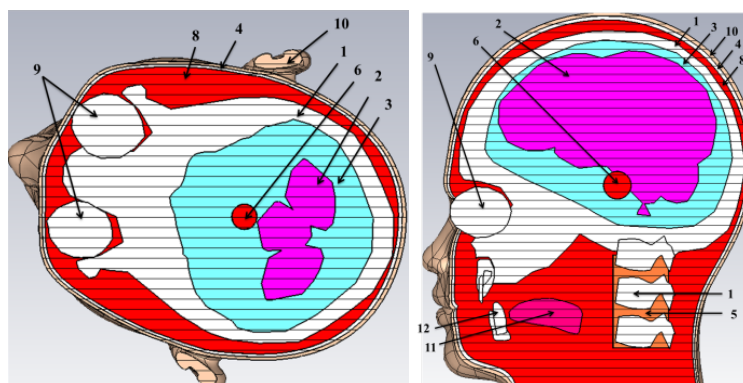
- vrednosti intenziteta električnog polja kod modela sa elektromagnetskim osobinama tkiva/organa za odraslu osobu su nešto veće nego kod modela sa elektromagnetskim osobinama za decu, osim u površinskim slojevima uz izvor zračenja (u koži i masnom tkivu).
- morfološke osobine tkiva/organa u površinskim slojevima kod modela sa elektromagnetskim osobinama za decu utiču na porast vrednosti SAR. Kako su ove vrednosti za SAR veće ili jednake vrednostima bazičnih ograničenja, doći će do premašenja vrednosti bazičnih ograničenja za SAR za sve razmatrane frekvencije.

## 8. Poređenje rezultata simulacije sa aspekta anatomskih karakteristika glave odrasle osobe i deteta

Kako bismo utvrdili da li dimenzije i oblik glave imaju značajan uticaj na količinu apsorbirane elektromagnetske energije, biće izvršeno poređenje uticaja zračenja mobilnog telefona na model glave deteta i odrasle osobe. U tu svrhu razvijen je model glave koji po svojim karakteristikama, dimenzijama i anatomskom obliku, odgovara glavi odrasle osobe. Spoljašnji izgled i poprečni preseći modela glave odrasle osobe dati su na slikama 8.1 i 8.2, respektivno. Za poređenje uticaja zračenja biće korišćen već postojeći model dečije glave. Numeracija tkiva i organa modela odrasle osobe je identična kao kod modela dečije glave (videti poglavlje 3.3).



Slika 8.1 Spoljašnji izgled modela glave odrasle osobe



Slika 8.2 Poprečni preseći modela glave odrasle osobe sa numerisanim tkivima i organima

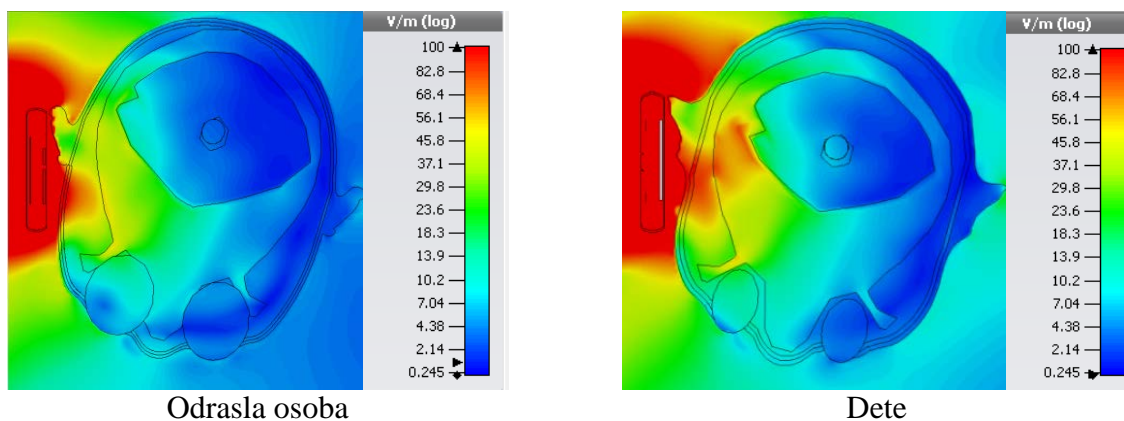
U fazi kreiranja modela biće zadati što je moguće približniji uslovi kako bi dobijeni rezultati mogli da se porede sa što manjom neizvesnošću. Tu se pre svega misli na istu mrežu oba modela, istu oblast integracije kao i identične karakteristike zračenja antene mobilnog

telefona ( $P=1W$ ). Takođe, biće korišćene iste elektromagnetske osobine tkiva i organa za oba modela, osobine koje odgovaraju odrasloj osobi.

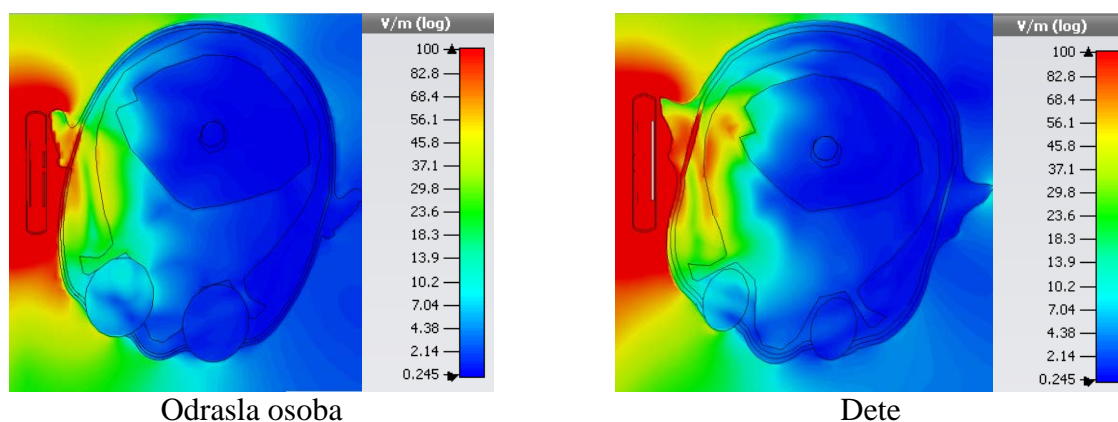
Biće analizirane razlike u vrednostima električnog polja,  $SAR_{1g}$  i  $SAR_{10g}$  za noseće frekvencije signala od 0.9GHz, 1.8GHz i 2.1GHz.

## 8.1 Poređenje vrednosti intenziteta električnog polja

Na slikama 8.3-8.5 su prikazane vrednosti intenziteta električnog polja za isti presek i različite frekvencije. Vrednosti intenziteta električnog polja predstavljeni su spektrom boja čije vrednosti mogu da se vide na paleti boja na desnoj strani slika. Kako bi razlike bile uočljivije paleta za obe simulacije je podešena na istu vrednost. Treba istaći da su sve slike modela glave deteta uvećane na veličinu modela glave odrasle osobe kako bi jasnije bile uočljive razlike u vrednostima intenziteta električnog polja i SAR za oba modela.

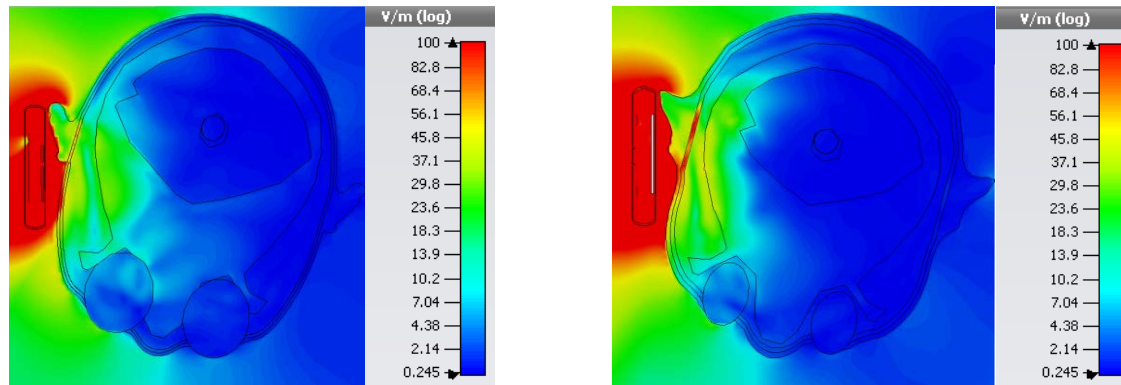


Slika 8.3  $E$  [V/m] za horizontalni poprečni presek za  $f=0.9GHz$



Slika 8.4  $E$  [V/m] za horizontalni poprečni presek za  $f=1.8GHz$





Odrasla osoba  
 Dete  
 Slika 8.5  $E$  [V/m] za horizontalni poprečni presek za  $f=2.1\text{GHz}$

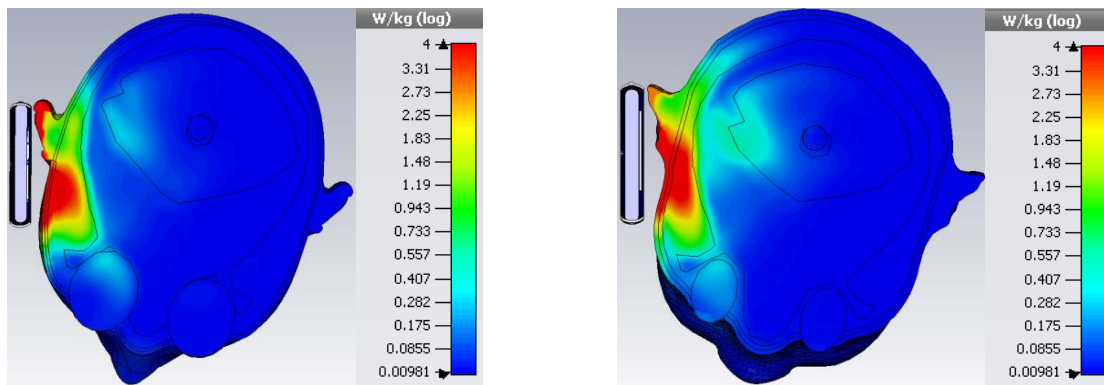
Vrednosti za intenzitet električnog polja u modelima odrasle osobe i deteta su posmatrane za horizontalni presek koji je normalan na mesto gde se nalazi port koji služi za napajanje antene a u visini očiju oba modela. Zbog opštih razlika u anatomiji glave i geometrije modela odrasle osobe i deteta, debljina slojeva a samim tim i rastojanje između posmatranih tkiva i organa nisu isti.

Kao što se vidi sa slike 8.3, vrednosti intenziteta električnog polje unutar glave modela deteta i modela glave odrasle osobe se razlikuju. Primetno je da su u istim oblastima (ista tkiva i organi) prisutne više vrednosti intenziteta električnog polja kod modela deteta u odnosu na model odrasle osobe, upravo zbog gore pomenutih razloga. Takođe, kao što se vidi sa slike, kod modela deteta je prisutna i veća dubina prodiranja elektromagnetskog talasa. Isto možemo primetiti i na slikama 8.4 i 8.5.

Ako posmatramo samo preseke modela odrasle osobe ili samo modela deteta za sve tri frekvencije, vidimo da vrednost intenziteta električnog polja sa porastom rastojanja od izvora brže opada sa porastom frekvencije. Zabeležene su veće vrednosti intenziteta električnog polje od referentnog graničnog nivoa u koži, masnom tkivu, mišićima glave, lobanji i moždanoj vodi za oba modela i mozgu kod modela deteta.

## 8.2 Poređenje raspodele vrednosti SAR

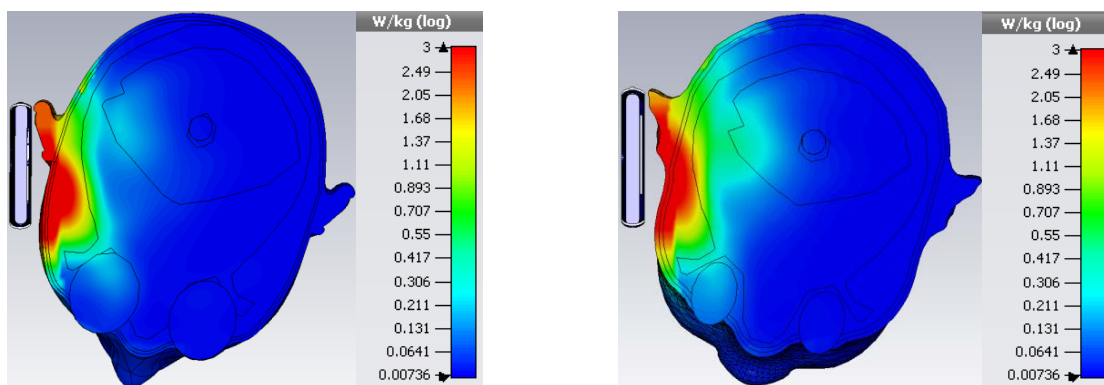
Raspodela vrednosti  $SAR_{1g}$  i  $SAR_{10g}$  je data za horizontalni poprečni presek gde su pronađene maksimalne vrednosti SAR kod modela odrasle osobe. Kako se maksimalne vrednosti za SAR razlikuju kod ova dva modela, vrednosti u paleti boja za  $SAR_{1g}$  i  $SAR_{10g}$  su podešene na  $4\text{W/kg}$  za oba modela kako bi se jasnije uočile razlike između oblasti sa većom apsorpcijom elektromagnetske energije.



Odrasla osoba

Deteta

Slika 8.6 SAR<sub>1g</sub> [W/kg] unutar modela glave odrasle osobe i deteta za  $f=0.9\text{GHz}$

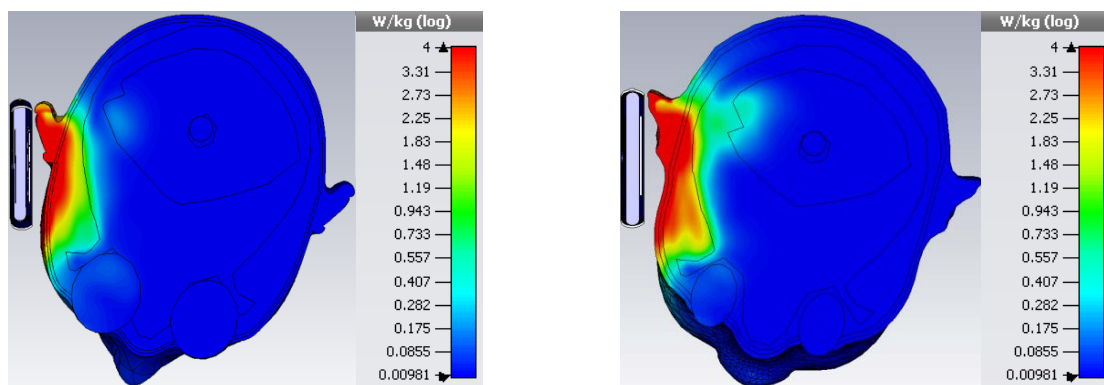


Odrasla osoba

Deteta

Slika 8.7 SAR<sub>10g</sub> [W/kg] unutar modela glave odrasle osobe i deteta za  $f=0.9\text{GHz}$

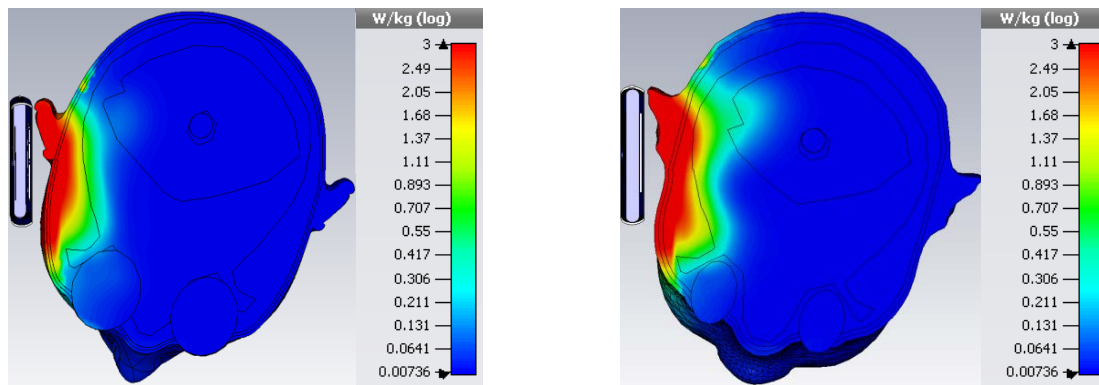
Na slikama 8.6 i 8.7 dat je uporedni prikaz raspodele SAR<sub>1g</sub> i SAR<sub>10g</sub>, respektivno, za  $f=0.9\text{GHz}$  u modelima glave odrasle osobe i deteta. Kao što se sa slika može videti, u modelu glave deteta prodiranje elektromagnetskog talasa je veće. U tim oblastima je prisutna apsorpcija elektromagnetske energije, a samim tim su i vrednosti SAR veće u odnosu na model glave odrasle osobe.



Odrasla osoba

Deteta

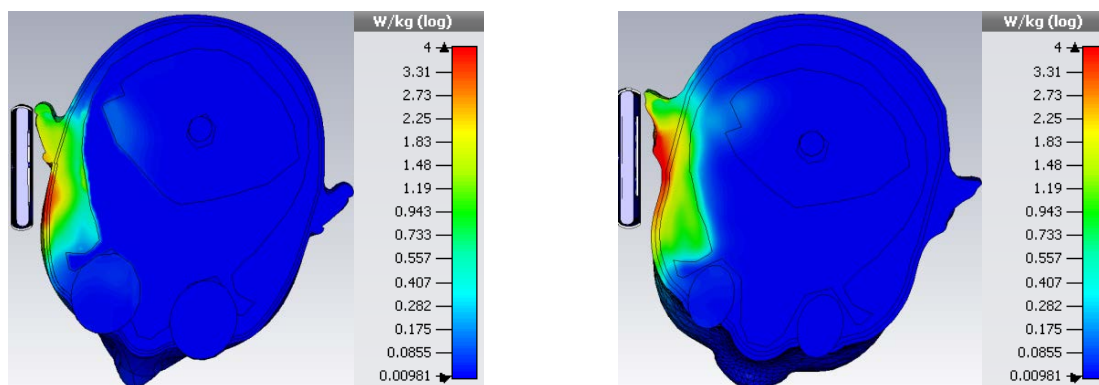
Slika 8.8 SAR<sub>1g</sub> [W/kg] unutar modela glave odrasle osobe i deteta za  $f=1.8\text{GHz}$



Odrasla osoba

Dete

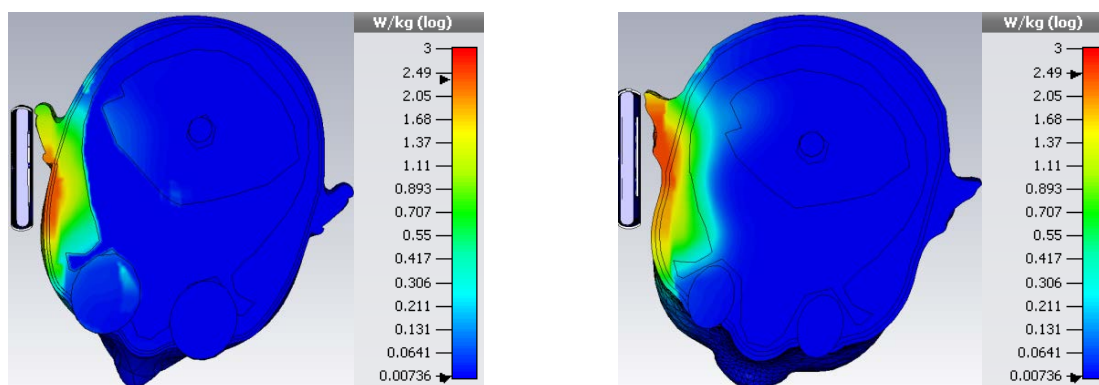
Slika 8.9 SAR<sub>10g</sub> [W/kg] unutar modela glave odrasle osobe i deteta za  $f=1.8\text{GHz}$



Odrasla osoba

Dete

Slika 8.10 SAR<sub>1g</sub> [W/kg] unutar modela glave odrasle osobe i deteta za  $f=2.1\text{GHz}$



Odrasla osoba

Dete

Slika 8.11 SAR<sub>10g</sub> [W/kg] unutar modela glave odrasle osobe i deteta za  $f=2.1\text{GHz}$

Na slikama 8.8 i 8.9 je dat uporedni prikaz raspodele SAR<sub>1g</sub> i SAR<sub>10g</sub> respektivno, za  $f=1.8\text{GHz}$ , a na slikama 8.10 i 8.11 raspodela SAR<sub>1g</sub> i SAR<sub>10g</sub> za  $f=2.1\text{GHz}$  u modelima glava odrasle osobe i deteta.

Na osnovu svih ovih slika može se zaključiti da je prodor elektromagnetskog talasa za sve tri frekvencije i za oba usrednjavanja vrednosti za SAR veći kod modela glave deteta. Veće vrednosti SAR kod deteta su posledica razlika u anatomiji glave i geometrije modela u

odnosu na odraslu osobu. Ova razlika se ogleda u različitoj debljini tkiva i organa u glavi deteta i odrasle osobe.

Vrednosti za SAR u tkivima i organima neposredno uz izvor zračenja značajno su više nego što je to prikazano gornjom granicom paleta boja. Maksimalne vrednosti za SAR u površinskim slojevima (u koži, masnom tkivu i delu mišića glave) su za oba usrednjavanja, sve tri frekvencije i za oba modela više ili jednake vrednostima bazičnih ograničenja za SAR od 1.6W/kg i 2W/kg. Najveće vrednosti za SAR su svakako u tkivu kože koje je najbliže izvoru zračenja i više su od dva do pet puta od vrednosti bazičnih ograničenja (u zavisnosti od usrednjavanja i frekvencije). U masnom tkivu glave je odnos proračunatih vrednosti i vrednosti bazičnih ograničenja od 1 do 3.5, dok je u delu mišića od 1 do 3.

Najveće vrednosti za SAR kod odrasle osobe su na frekvenciji od 0.9GHz dok je kod deteta to na 1.8GHz. Ovo je direktna posledica veće vrednosti električnog polja kod odrasle osobe na 0.9GHz, dok je kod deteta najveća vrednost električnog polja na 1.8GHz.

Ono što je evidentno sa slika koje prikazuju raspodelu 1g i 10g SAR je da vrednosti za SAR u mozgu i odrasle osobe i deteta ne prelaze vrednosti bazičnih ograničenja za SAR.

Posmatrajući horizontalne poprečne preseke oba modela, možemo primetiti da je kod modela glave deteta vidljiva veća površina sa povišenim vrednostima apsorbovane elektromagnetske energije.

## 9. Poređenje rezultata simulacije za model fantoma i realističnijeg modela glave čoveka

Kao što je već rečeno (poglavlje 1.2.2), za merenje vrednosti SAR u laboratorijskim uslovima koristi se aparatura koja se sastoji od fantom modela ljudske glave, robota sa mernom sondom i mobilnog telefona kao izvora zračenja (slika 9.1).

Fantom je načinjen tako da se bazira na obliku i dimenzijama glave odrasle muške osobe. Fantom je napunjen tečnošću čije karakteristike odgovaraju dielektričnim osobinama tkiva ljudske glave. Elektromagnetske osobine tkiva glave modela su iste ili približne elektromagnetskim osobinama moždanog tkiva ljudi.

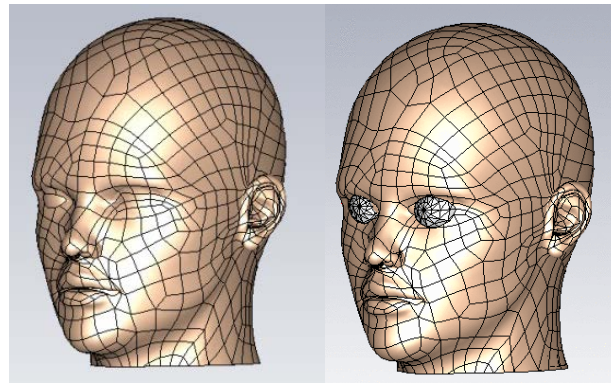
Robot se sastoji od mehaničke ruke i posebne sonde koja se koristi za merenje jačine električnog polja unutar fantoma a zatim se ovi podaci koriste za izračunavanje SAR.



Slika 9.1 Fantom i robot sa sondom [141]

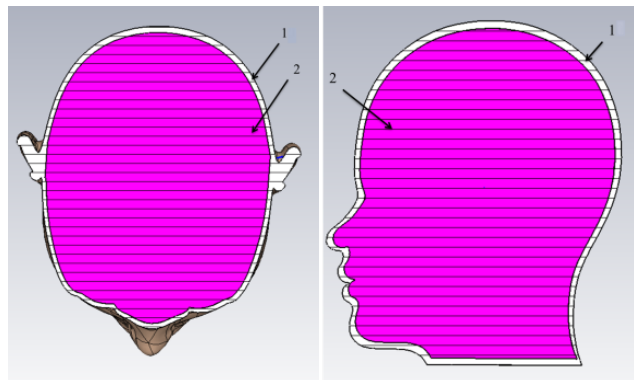
Kako bismo utvrdili koliko ovako dobijene vrednosti za jačinu električnog polja i SAR u glavi fantoma odstupaju od vrednosti za jačinu električnog polja i SAR koje bi se dobile simulacijom za realističniji model ljudske glave, neophodno je napraviti direktno poređenje ova dva modela.

U tu svrhu, unutrašnjost model glave odrasle osobe biće modifikovana da odgovara modelu fantoma koji se koristi za eksperimentalno određivanje vrednosti električnog polja i SAR od mobilnog telefona. Oba modela imaju gotovo isti spoljašnji izgled (kod realističnijeg modela prisutne su oči) kako bi uslovi izlaganja elektromagnetskom zračenju bili identični (slika 9.2).



a) model A                      b) model B  
Slika 9.2 Spoljašnji izgled dva modela

Model fantoma (model A) kreiran je kao fantom sa dva sloja, ljuska i tečnost. Ljuska ima karakteristike koje odgovaraju dielektričnim osobinama fiberglasa (staklena vlakna), a tečnost dielektrične osobine tkiva mozga (slika 9.3). Model B je opisan u poglavlju 8.



Slika 9.3 Poprečni presek modela fantoma sa označenim delovima (model A)

U cilju što realnijeg poređenja, u procesu simulacije oba modela su kreirana tako da imaju identičnu mrežu, oblast integracije istih dimenzija kao i identične karakteristike zračenja antene mobilnog telefona ( $P=1W$ ). Biće izvršeno poređenje raspodele električnog polja,  $SAR_{1g}$  i  $SAR_{10g}$  za noseću frekvencije mobilnog telefona od 900MHz.

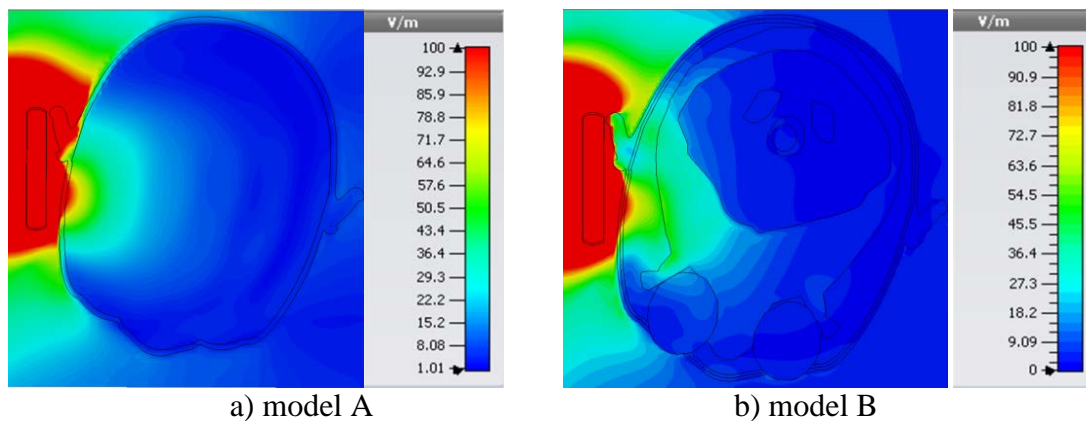
Vrednosti elektromagnetskih osobina modela fantoma (model A) za frekvenciju od 900MHz date su u tabeli 9.1 [142, 143]. Elektromagnetske osobine tkiva i organa modela B su date u poglavlju 3.3

Tabela 9.1 Elektromagnetske osobine modela A za  $f=900\text{MHz}$

	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Heat Capacity (kJ/kgK)	Thermal conductivity (W/m°C)
1. Ljuska	3.5	0	1000	0.8	0.4
2. Tečnost	45.80	0.766	1030	3.630	0.51

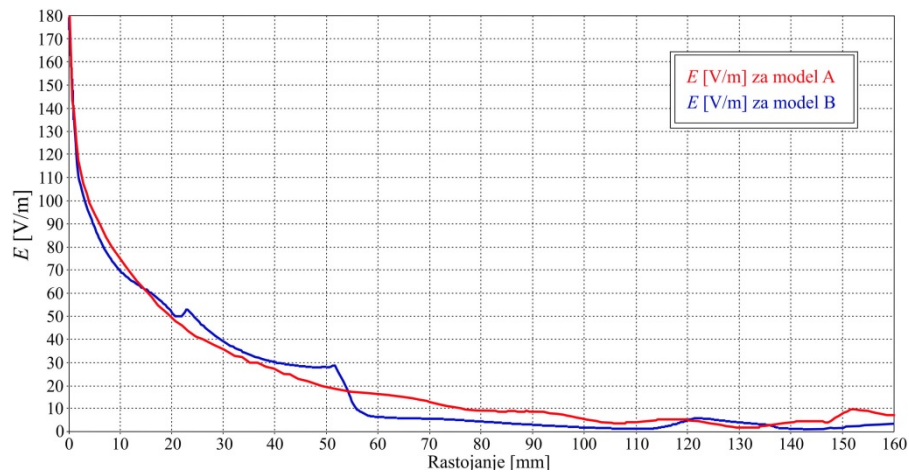
## 9.1 Rezultati proračuna intenziteta električnog polja za oba modela

Na slici 9.4 prikazane su vrednosti intenziteta električnog polja na frekvenciji  $f=900\text{MHz}$  za oba modela i za isti horizontalni poprečni presek u visini napajanja PIFA antene. Gornja vrednost intenziteta električnog polja u labeli je podešena za oba modela na istu vrednost kako bi razlika u raspodeli bila uočljivija. Vrednosti su date u paleti boja sa desne strane slika.

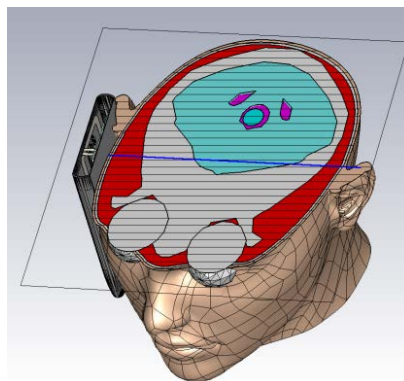


Slika 9.4  $E$  [V/m] za horizontalni poprečni presek po sredini ušnog kanala za a) model A i b) model B

Različite vrednosti intenziteta električnog polja kod modela A i B su posledica različite unutrašnje strukture ova dva modela. Za razliku od modela A gde je unutrašnjost homogena pa se elektromagnetski talas prostire nesmetano, kod modela B prilikom prostiranja elektromagnetski talas prolazi kroz više slojeva tj. tkiva i organa. Kako se različita tkiva i organi odlikuju različitim elektromagnetskim osobinama, uslovi prostiranja neće biti isti u svim slojevima. Ovo je upravo glavni razlog zbog čega se vrednosti intenziteta električnog polja razlikuju u slučaju modela B u odnosu na model A (slika 9.5). Vrednosti intenziteta električnog polja za oba modela su date za liniju čiji je položaj prikazan na slici 9.6.



Slika 9.5 Grafik promene  $E$  [V/m] duž linije koja leži u ravni preseka (slika 9.6)



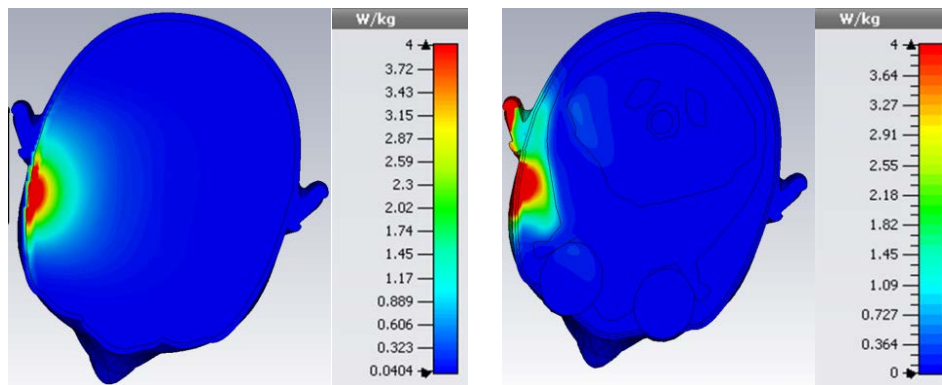
Slika 9.6 Linija za procenu intenziteta električnog polja za presek u nivou napajanja PIFA

Sa prethodnih slika, možemo primetiti da su najveće vrednosti električnog polja upravo u okolini izvora zračenja, gde je ujedno i najveći uticaj zračenja. Vrednost intenziteta električnog polja se drastično smanjuje udaljavanjem od izvora zračenja. Iz tog razloga, potencijalne biološke efekte zračenja treba posmatrati u koži, potkožnom masnom tkivu, mišićima glave, kao i delu mozga bliže izvoru zračenja. Isto tako, može se uočiti da je intenzitet električnog polja na određenim rastojanjima od izvora zračenja negde veći kod modela B a negde kod modela A. Ova razlika ide i do 10V/m u oba slučaja i upravo je posledica različite strukture ova dva modela (slika 9.5).

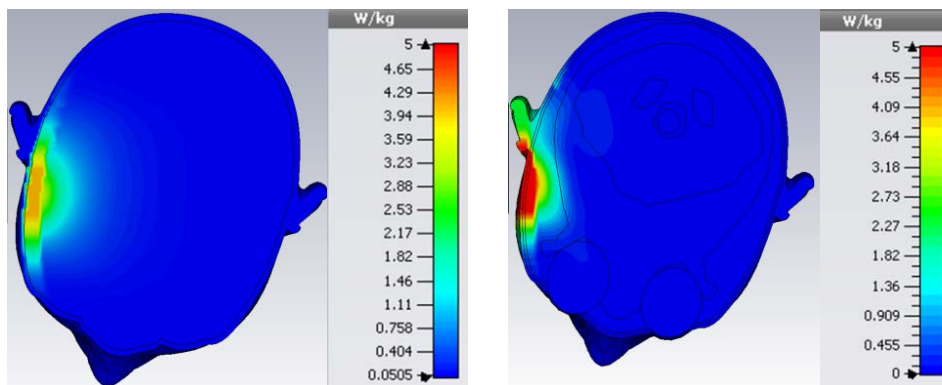
## 9.2 Poređenje raspodele vrednosti SAR

Na sledećim slikama biće dat uporedni prikaz vrednosti za SAR usrednjene za 1g i 10g za oba modela za isti poprečni presek kao i kod raspodele električnog polja.





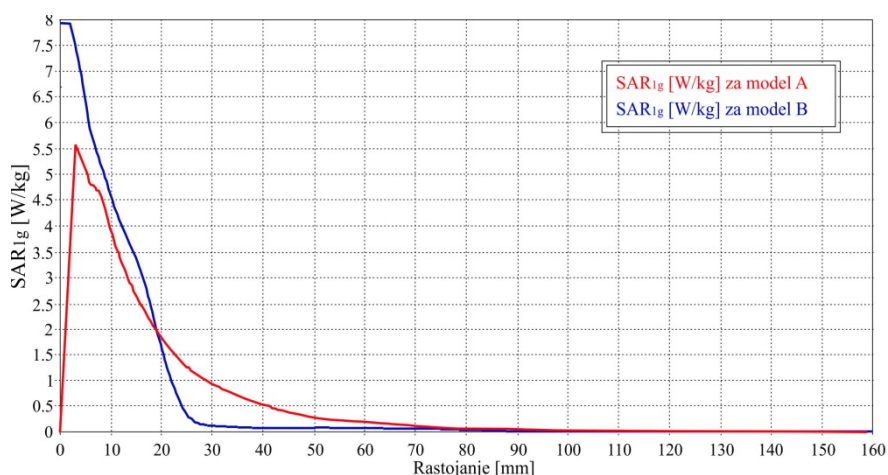
model A  
model B  
Slika 9.7 SAR<sub>1g</sub> [W/kg] unutar glave modela A i modela B



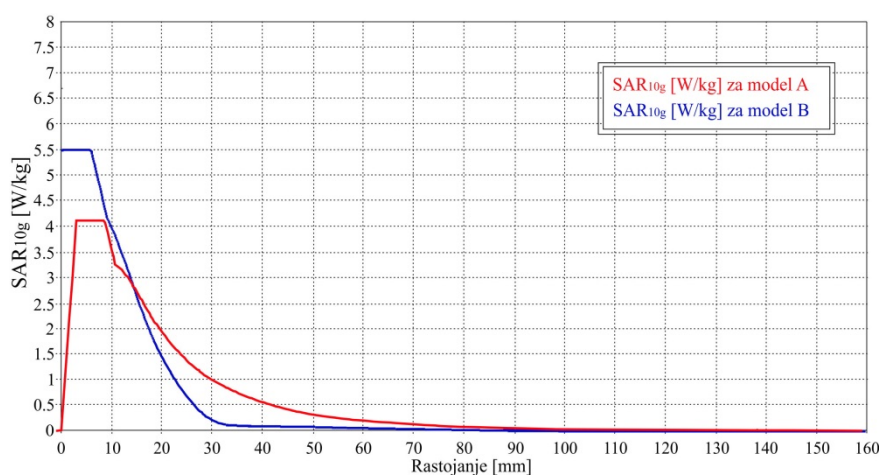
model A  
model B  
Slika 9.8 SAR<sub>10g</sub> [W/kg] unutar glave modela A i modela B

Sa prethodnih slika može se videti da je maksimalna vrednost apsorbovane energije veća u slučaju modela B. To je pre svega posledica materijala od koga je načinjena ljuska modela A. Sa slike 9.7 i 9.8, takođe se može videti da u ljusci modela A praktično i nema apsorpcije energije jer je provodnost tog materijala gotovo jednaka nuli.

Međutim, zbog razlike u unutrašnjoj strukturi modela A i modela B, možemo primetiti da je dubina penetracije talasa veća u slučaju fantoma (modela A). Manja dubina prodiranja elektromagnetskog talasa u realističnijem modelu glave je zbog prisustva više slojeva različitih elektromagnetskih osobina koji doprinose da apsorpcija energije u tom tkivu/organu bude veća.



Slika 9.9 SAR<sub>1g</sub> [W/kg] za model A i model B



Slika 9.10 SAR<sub>10g</sub> [W/kg] za model A i model B

Na slikama 9.9 i 9.10 dat je grafički prikaz raspodele za SAR<sub>1g</sub> i SAR<sub>10g</sub> za oba modela duž linije koja je prikazana na slici 9.6. Kao što je prethodno rečeno, maksimalne vrednosti za SAR<sub>1g</sub> i SAR<sub>10g</sub> su veće kod modela B i ta razlika ide od oko 2.5W/kg za SAR<sub>1g</sub> pa do oko 1.5W/kg za SAR<sub>10g</sub>. Pri porastu rastojanja od izvora zračenja, vrednosti za SAR za oba modela se približavaju i postaju jednake na određenom rastojanju od mesta prodiranja u modele. Nakon toga, zbog homogenosti unutrašnjosti modela A i odsustva uticaja različitih slojeva tj. tkiva i organa, uočavaju se veće vrednosti za SAR kod modela A u odnosu na model B. Maksimalna razlika u vrednostima za SAR<sub>1g</sub> i SAR<sub>10g</sub> u tom slučaju je oko 1W/kg i 0.7W/kg, respektivno.

Rezultati dobijeni tokom izlaganja elektromagnetskom zračenju mobilnog telefona su pokazali da postoje odstupanja u izračunatim vrednostima za intenzitet električnog polja i SAR za ova dva modela. Razlike u proračunatim vrednostima za električno polje i SAR u istim tačkama za dva modela, što se može videti sa slika 9.4, 9.7 i 9.8, su posledica razlika u unutrašnjoj strukturi modela. Odstupanja u vrednostima za intenzitet električnog polja i SAR

su posledica postojanja samo jednog sloja u slučaju modela fantoma, i njegovih homogenih karakteristika, koji zamenjuje sva biološka tkiva unutar glave.

Pouzdaniji rezultati se dobijaju pomoću modela B budući da ovaj model uzima u obzir više bioloških organa i tkiva sa adekvatnim elektromagnetskim osobinama. Prednost modela B je mogućnost definisanja vrednosti intenziteta električnog polja i apsorbovane energije u svakom organu ili tkivu glave zasebno.

# ZAKLJUČAK

Poslednjih godina svedoci smo velike ekspanzije u razvoju i korišćenju izvora nejonizujućih zračenja. Razvoj mobilnih komunikacija i, posebno, svakodnevno korišćenje mobilnih telefona tokom poslednjih nekoliko godina izazvalo je veliku društvenu i naučnu zabrinutost zbog mogućih štetnih efekata elektromagnetskog zračenja tih izvora na korisnika.

Kako bi se na što adekvatniji način odgovorilo izazovima koje nameće masovna upotreba mobilnih telefona neophodno je na pravi način definisati problem. Neophodan je razvoj modela sa što približnijim karakteristikama stvarnog biološkog sistema, pravilno modeliranje i definisanje parametara izvora elektromagnetskog zračenja kao i razmatranje realnih scenarija koji podrazumevaju slučajeve najčešćih oblika korišćenja mobilnih telefona.

U ovoj disertaciji je izvršeno opsežno istraživanje uticaja elektromagnetskog zračenja koje potiče od mobilnog telefona na numeričkom modelu glave deteta. Takođe, razvijen je model oka deteta sa pravilno definisanim anatomskim i morfološkim osobinama za procenu uticaja elektromagnetskog talasa za slučaj korišćenja telefona za gledanje sadržaja sa ekrana telefona tokom surfovanja internetom. Za potrebe istraživanja razlike uticaja elektromagnetskog zračenja na decu i odrasle osobe kreirana su još dva modela, model glave odrasle osobe i model fantoma.

Kao izvor elektromagnetskog zračenja kreiran je model savremenog pametnog mobilnog telefona koji se sastoji od kućišta sa displejem i PIFA antene. U svim simulacijama razmatran je slučaj kada antena mobilnog telefona zrači sa snagom od 1W. Izvršeno je istraživanje za frekvencije 0.9GHz, 1.8GHz, 2.1GHz, 28GHz, 32GHz i 73GHz.

Najpre je simuliran slučaj uticaja zračenja mobilnog telefona na numerički model glave sedmogodišnjeg deteta kada se telefon koristi u režimu prenosa govora. Telefon se nalazi uz uvo modela glave deteta i zakošen je prema licu tako da prekriva čitavo uvo deteta. Analizirana je raspodela elektromagnetskog polja u modelu glave deteta za više različitih horizontalnih preseka koji su izabrani tako da dobro reprezentuju uticaj zračenja s obzirom na položaj mobilnog telefona.

Analiza intenziteta električnog polja je pokazala da su u više tkiva/organa za sve preseke prisutne vrednosti koje su iznad referentnih graničnih nivoa definisanih Pravilnikom o granicama izlaganja nejonizujućim zračenjima. Kako su Pravilnikom propisane vrednosti polja u slobodnom prostoru, bez prisustva čoveka, ne treba zanemariti činjenicu da ove vrednosti u telu moraju da budu manje kao posledica apsorpcije u tkivima i organima.

Na frekvenciji od 0.9GHz, analiza vrednosti intenziteta električnog polja duž pravaca odgovarajućih preseka pokazuje da je najviša vrednost dobijena u preseku koji odgovara mestu napajanja PIFA antene. Pokazano je da su referentni granični nivoi premašeni od 3 do više od 9 puta, zavisno od posmatranog preseka ili pravca. Takođe bitna činjenica je da su ove visoke vrednosti, u zavisnosti od preseka, prisutne u koži, masnom tkivu glave, mišićima glave, lobanji, moždanoj vodi i delu mozga koji je bliži izvoru zračenja.

Na frekvenciji od 1.8GHz dubina do koje su dobijene visoke vrednosti intenziteta električnog polja je manja nego na 0.9GHz ali su zato prisutne više vrednosti polja. Premašenja referentnih graničnih nivoa na ovoj frekvenciji su još izraženija i idu od 3 do više od 11 puta, zavisno od posmatranog preseka ili pravca. Tkiva/organi u kojima su prisutne visoke vrednosti intenziteta električnog polja su koža, masno tkivo, mišići i lobanja.

Kao za prethodne dve frekvencije i na frekvenciji od 2.1GHz su dobijene vrednosti intenziteta polja iznad referentnih graničnih nivoa. Najviša vrednost intenziteta električnog polja je dobijena u preseku koji se nalazi ispod očiju modela glave deteta. Ta vrednost je bliska najvišoj vrednosti na 0.9GHz, ali je dubina do koje su prisutne više vrednosti od referentnih graničnih nivoa na ovoj frekvenciji najmanja. Može se uočiti da su povišene vrednosti intenziteta električnog polja prisutne u istim tkivima i organima kao i na 1.8GHz.

Kako su za sve tri frekvencije u modelu glave deteta prisutne visoke vrednosti intenziteta električnog polja evidentno je da će i za sve ove frekvencije biti prekoračena i bazična ograničenja za SAR. Maksimalne vrednosti na 0.9GHz za  $SAR_{1g}$  i  $SAR_{10g}$  premašuju bazična ograničenja, u zavisnosti od usrednjavanja, od 1.9 do više od 4 puta, zavisno od posmatranog preseka ili pravca. Najviše vrednosti za  $SAR_{1g}$  za sve preseke ponaosob su iznad bazičnih ograničenja. Najveća premašenja su za presek koji odgovara mestu napajanja PIFA antene i presek u visini očiju modela glave deteta, više od 4 puta. Najviše vrednosti za  $SAR_{10g}$  su i do 2 puta iznad bazičnih ograničenja. Gotovo za sve preseke, oblasti sa većom apsorpcijom elektromagnetske energije obuhvataju kožu, masno tkivo glave, mišiće glave, lobanju, moždanu vodu i mali deo mozga.

Na 1.8GHz dobijene su najviše vrednosti i za  $SAR_{1g}$  i  $SAR_{10g}$  u odnosu na druge dve frekvencije. Premašenje bazičnih ograničenja je nešto više od 6 puta za  $SAR_{1g}$  i 3 puta za  $SAR_{10g}$ . Ako analiziramo preseke, najveće prekoračenje za  $SAR_{1g}$  je za presek koji se nalazi u visini očiju od 6 puta do 3.5 puta za  $SAR_{10g}$  za presek koji se nalazi ispod njega. Upravo su za ova dva preseka više vrednosti za SAR od bazičnih prisutne u koži, masnom tkivu, mišićima i lobanji, dok su za ostale preseke premašenja prisutna u koži, masnom tkivu i mišićima.

Najniže maksimalne vrednosti za SAR za ove tri frekvencije su na 2.1GHz, ali su i one iznad bazičnih ograničenja. Za presek u visini PIFA antene i presek iznad njega, vrednosti za SAR<sub>10g</sub> su ispod bazičnih ograničenja. Tkiva/organi u kojima su prisutne više vrednosti za SAR od bazičnih su koža, masno tkivo i mišići glave.

Ono što je evidentno je da za sve tri prethodno analizirane frekvencije postoje oblasti u glavi modela deteta gde su i vrednosti za intenzitet električnog polja i za SAR izuzetno visoke i premašuju i do nekoliko puta i referentne granične nivoe i bazična ograničenja. Upravo na ona tkiva i organe koji se nalaze u ovim oblastima treba obratiti posebnu pažnju za procenu eventualnih štetnih bioloških efekata usled zračenja mobilnih telefona.

Suštinska razlika između rezultata dobijenih za aktuelne frekvencija koje se danas koriste u mobilnim komunikacijama i frekvencija koje su predviđene za buduće 5G mreže je u dubini prodiranja elektromagnetskog talasa. Za sve tri frekvencije korišćene u analizi (28GHz, 39GHz, 73GHz) pronađene su više vrednosti za intenzitet električnog polja od referentnog graničnog nivoa, ali su one skoncentrisane samo u površinskom sloju modela, tj. koži i to do dubine manje od 1mm. Na rastojanjima većim od 1mm ove vrednosti su mnogo manje od vrednosti referentnog graničnog nivoa. Takođe, maksimalne vrednosti intenziteta električnog polja za sve tri frekvencije su nekoliko puta manje od maksimalnih vrednosti intenziteta električnog polja na frekvencijama od 0.9GHz, 1.8GHz i 2.1GHz.

Zanimljivo je da su vrednosti za SAR<sub>1g</sub> na ovim frekvencijama značajno više nego na 0.9GHz, 1.8GHz i 2.1GHz, iako su vrednosti intenziteta električnog polja niže. Ovo odstupanje je posledica razlike u vrednostima elektromagnetskih osobina bioloških tkiva. Maksimalna vrednosti za SAR<sub>1g</sub> na 28GHz prekoračuje bazična ograničenja 7 puta, na 39GHz 5.6 puta, dok je na 73GHz to prekoračenje gotovo 9.5 puta. Za SAR<sub>10g</sub> na 28GHz prekoračenje je 1.45 puta, na 39GHz 1.3 puta i na 73GHz 2.2 puta.

Za sve predložene 5G frekvencije gotovo sva apsorpcija elektromagnetske energije je u površinskim slojevima modela glave, u koži, masnom tkivu i mišićima glave.

Uporednom analizom raspodele elektromagnetskog polja na svih šest frekvencija, vidimo da je situacija povoljnija u slučaju 5G frekvencija kada je u pitanju maksimalna vrednost intenziteta električnog polja u glavi modela deteta, kao i da postoji izuzetno mala oblast (reda milimetra) u kojoj su lokalizovane ove vrednosti u odnosu na frekvencije 0.9GHz, 1.8GHz i 2.1GHz. Međutim, kod vrednosti za SAR treba obazrivije izvlačiti zaključke. Gotovo sva elektromagnetska energija se apsorbuje u mnogo manjoj zapremini tkiva/organa nego na frekvencijama 0.9GHz, 1.8GHz i 2.1GHz, tačnije, u vrlo tankom sloju

uz površinu glave, ali su pri tome prisutne izuzetno visoke vrednosti za SAR koje mogu da predstavljaju značajan faktor kod pojave eventualnih štetnih bioloških efekata.

Pored istraživanja raspodele SAR, ispitivani su efekti zagrevanja tkiva i organa u modelu glave deteta za slučaj razgovora mobilnim telefonom. Najveći porast temperature je u tkivima i organima koji su najbliže izvoru zračenja. Maksimalno povećanje temperature u glavi modela deteta dobijeno simulacijom je  $0.97^{\circ}\text{C}$ . Sa udaljavanjem od mobilnog telefona temperatura opada, ali sporije nego što je to slučaj sa vrednostima za SAR.

Analizom porasta temperature za pravce koji prolaze kroz mozak vidimo da maksimalni porast temperature u mozgu ne prelazi  $0.65^{\circ}\text{C}$ . Porast temperature u mozgu se kreće u opsegu od  $0.27^{\circ}\text{C}$  do  $0.65^{\circ}\text{C}$ .

Treba napomenuti da su ovi preseci proizvoljno odabrani i da će porast temperature u mozgu varirati zavisno od odabranog preseka, tj. u zavisnosti od rastojanja od antene mobilnog telefona.

Ono što se može izvesti kao zaključak da povećanje temperature u mozgu nije prelazilo  $0.7^{\circ}\text{C}$ , što je prema ustaljenom mišljenju ispod praga za izazivanje neželjenih termičkih efekata na neurone. Međutim, treba imati u vidu da postoje istraživanja koja daju i drugačije zaključke. Na primer, nađeno je da čak i malo povećanje temperature u hipotalamusu od  $0.2\text{--}0.3^{\circ}\text{C}$  dovodi do izmenjenog termoregulatornog ponašanja. Dakle, s obzirom da istraživanja nisu dala konačnu reč u pogledu praga za povećanje temperature u mozgu nakon koga dolazi do neželjenih efekata, potrebno je dodatno povesti računa o efektima povećanja temperature.

Kako sve više dece pristupa internetu putem mobilnog telefona, izvršeno je istraživanje uticaja zračenja mobilnog telefona na dete tokom gledanja sadržaja na ekranu. Analiziran je uticaj elektromagnetskog polja telefona za više različitih udaljenosti telefona od očiju deteta. Telefon je postavljen vertikalno ispred modela glave deteta u položaj koji je pogodan za gledanje sadržaja sa ekrana telefona na rastojanjima od 3, 6, 9 i 12cm. Usled takvog položaja telefona, elektromagnetsko zračenje je usmereno na lice i oči. Zbog blizine telefona u odnosu na druge delove lica, uticaju elektromagnetskog zračenja najviše su bili izloženi nos i oblast između očiju. Posebna pažnja prilikom ispitivanja uticaja zračenja mobilnog telefona bila je usmerena na oči deteta. Analiza je izvršena duž pravaca koji su prolazili kroz središnji deo očiju, od zenice do ocnog nerva za oba oka.

Najviše vrednosti intenziteta električnog polja su dobijene u slučaju kad je telefon bio najbliže glavi deteta (3cm od glave deteta) i ove vrednosti su bile iznad referentnih graničnih nivoa. Vrednosti intenziteta električnog polja samo za dva najbliža rastojanja su iznad ili na

granici vrednosti referentnog graničnog nivoa, dok su na ostalim rastojanjima ispod ove vrednosti.

Najveća količina apsorbovane energije je skoncentrisana na prednjem delu lica od gornje usne do čela. Maksimalna vrednosti SAR<sub>1g</sub> na rastojanju od 3cm je značajno viša od vrednosti bazičnog ograničenja, oko 3 puta. Za ostala rastojanja glave od telefona ove vrednosti su značajno manje od vrednosti bazičnog ograničenja. Međutim, vrednosti za SAR<sub>1g</sub> u očima su za sva četiri rastojanja od telefona bile ispod vrednosti bazičnog ograničenja.

Tokom ispitivanja porasta temperature u očima deteta, najveće povećanje temperature je dobijeno za slučaj kada je telefon najbliži glavi modela i to od 2.3 °C u delu između očiju i 1.8°C u očima. Kao što vidimo, značajno povećanje temperature u površinskim slojevima i očima modela je prisutno samo u slučaju kada se telefon nalazi veoma blizu lica. U slučaju kada je telefon dovoljno udaljen od lica nema značajnijeg povećanja temperature u površinskim slojevima lica i u očima deteta.

Imajući u vidu prethodnu analizu možemo reći da očekivane vrednosti intenziteta električnog polja i SAR, za odstojanja mobilnog telefona od lica deteta koja su uobičajna za čitanje sadržaja sa ekrana, ne bi trebalo da premaše referentne granične nivoe i bazična ograničenja. Slično prethodnom, i porast temperature u očima ne bi trebalo da dostigne visoke vrednosti za neki uobičajni period korišćenja telefona. Možemo zaključiti da je ovakav način korišćenja mobilnog telefona bezbedniji nego kad je telefon neposredno uz glavu korisnika.

Kako bismo utvrdili da li različite elektromagnetske osobine tkiva i organa dece i odraslih imaju uticaj na raspodelu apsorbovane energije elektromagnetskog talasa izvršena je uporedna analiza istog modela glave deteta sa različitim vrednostima elektromagnetskih osobina tkiva i organa. U prvom slučaju, elektromagnetske osobine tkiva i organa su odgovarajuće odrasloj osobi, a u drugom tkiva i organi su imali elektromagnetske osobine koje su na osnovu raspoloživih podataka prilagođene uzrastu deteta.

Intenzitet električnog polja na 0.9GHz u slučaju elektromagnetskih osobina tkiva za odraslu osobu je uglavnom veći nego za slučaj elektromagnetskih osobina za dete. Najveće odstupanje vrednosti intenziteta električnog polja je u površinskom sloju glave tj. u koži. Nasuprot ovome, na 1.8GHz maksimalna vrednost intenziteta električnog polja u koži i delu masnog tkiva je veća u slučaju korišćenja elektromagnetskih osobina tkiva/organa za dete. Kako se udaljavamo od izvora zračenja, veće vrednosti intenziteta električnog polja preovlađuju u slučaju korišćenja elektromagnetskih osobina tkiva/organa za odraslu osobu. Na 2.1GHz situacija je ista kao na 1.8GHz.



Analizirajući vrednosti intenziteta električnog polja za oba modela, može se zaključiti da su najveće razlike prisutne u koži. Međutim, to odstupanje procentualno nije veliko, jer su tu kod oba modela prisutne najviše vrednosti. Ono što je zanimljivo jeste da su, osim u početnim slojevima, uglavnom više vrednosti kod modela sa elektromagnetskim osobinama za odraslu osobu.

Obrnuto, u slučaju modela deteta kada se koriste odgovarajuće elektromagnetske osobine tkiva deteta u površinskim slojevima se dobijaju više vrednosti i za SAR<sub>1g</sub> i SAR<sub>10g</sub>, u odnosu na model sa tkivima odrasle osobe. Ove vrednosti još više prekoračuju bazična ograničenja u poređenju sa rezultatima prethodnih analiza.

S obzirom da je u prethodnoj analizi razmatran uticaj različitih morfoloških karakteristika tkiva/organa dece i odraslih, potrebno je utvrditi da li dimenzije i oblik glave imaju značajan uticaj na količinu apsorbovane energije elektromagnetskog talasa. U tu svrhu, izvršene su dve simulacije pod istovetnim uslovima sa dva geometrijski različita modela glave, glave deteta i odrasle osobe. Korišćen je isti telefon i isti položaj i rastojanje od modela. U oba slučaja su korišćene elektromagnetske osobine tkiva i organa odrasle osobe kako bismo isključili ostale faktore koji mogu da utiču na razliku u dobijenim vrednostima. Posmatran je horizontalni presek, koji je normalan na mesto gde se nalazi port koji služi za napajanje antene.

Kod modela deteta više vrednosti intenziteta električnog polja od referentnih prisutne su u više različitih tkiva i organa nego kod modela odrasle osobe, što je posledica veće dubine prodiranja elektromagnetskog talasa u odnosu na dimenzije glave. Ove razlike su posledica razlika u anatomiji i geometriji glave deteta u odnosu na odraslu osobu. Kako elektromagnetski talas prodire kroz više tkiva i organa kod modela deteta nego kod modela odrasle osobe, veća je procentualno i zapremina u kojoj se apsorbuje elektromagnetska energija. Može se zaključiti da su vrednosti za SAR za sve frekvencije i za oba tipa usrednjavanja veće kod modela glave deteta.

U svrhu utvrđivanja validnosti eksperimentalno dobijenih vrednosti za SAR u modelu fantoma, izvršeno je poređenje rezultata numeričke analize u slučaju fantoma sa rezultatima za slučaj realističnijeg modela glave odrasle osobe. Cilj je bio da se utvrdi odstupanje izmerenih vrednosti intenziteta električnog polja i SAR kod fantoma koji se koristi u laboratorijskim uslovima i modela ljudske glave korišćenog u okviru ove teze pod istim uslovima. Oba modela imaju iste spoljašnje dimenzije.

Dobijene različite vrednosti intenziteta električnog polja kod modela fantoma i realističnijeg modela su posledica različite unutrašnje strukture ova dva modela. Kod modela

fantoma unutrašnjost je homogena pa se elektromagnetski talas prostire nesmetano, dok kod realističnijeg modela elektromagnetski talas prolazi kroz više slojeva tj. tkiva i organa. Kako se različita tkiva i organi odlikuju različitim elektromagnetskim osobinama, uslovi prostiranja neće biti isti u svim slojevima. Upravo zbog ovoga, vrednosti intenziteta električnog polja su u nekim oblastima više kod modela fantoma a u nekim kod realističnijeg modela.

Razlog veće dubine penetracije elektromagnetskog talasa kod modela fantoma je homogenost njegove unutrašnje strukture. Manja dubina prodiranja elektromagnetskog talasa u realističnijem modelu glave za posledicu ima veću apsorpciju elektromagnetske energije u tkivima/organima modela.

Jedna od svakako najbitnijih razlika između ova dva modela ogleda se u fizičkom rešenju ljuske modela fantoma. Ljuska modela fantoma je napravljena od čvrstog materijala zanemarljive provodnosti tako da u njoj praktično i nema apsorpcije energije. Kod realističnijeg modela su upravo u površinskim slojevima (koži i masnom tkivu) dobijaju najveće vrednosti za SAR. Sa udaljavanjem od izvora zračenja, vrednosti za SAR za oba modela se približavaju i postaju jednake na određenom rastojanju od mesta prodiranja u modele. Nakon toga, zbog homogene unutrašnjosti modela fantoma vrednosti za SAR postaju više nego kod realističnijeg modela.

Na osnovu ovoga može se zaključiti da se pouzdaniji rezultati dobijaju korišćenjem realističnijeg modela budući da ovaj model uzima u obzir više bioloških tkiva i organa sa adekvatnim elektromagnetskim osobinama. Prednost korišćenja realističnijeg modela je mogućnost definisanja vrednosti intenziteta električnog polja i apsorbovane energije u svakom organu ili tkivu glave zasebno.

Cilj ove disertacije bio je utvrditi kolika je izloženost dece zračenju mobilnih telefona kao i da li su nepovoljni efekti njihove izloženost veći u odnosu na odrasle osobe. Imajući u vidu rezultate više različitih istraživanja koja su izvršena u ovoj tezi, kao najvažnije možemo izdvojiti sledeće zaključke:

- Na frekvencijama od 0.9GHz, 1.8GHz i 2.1GHz za model deteta:
  - u više tkiva i organa prisutne su visoke vrednosti intenziteta električnog polja koje su iznad referentnih graničnih nivoa,
  - prekoračena su bazična ograničenja za SAR<sub>1g</sub> i SAR<sub>10g</sub>.
- Na frekvencijama predloženim za buduće 5G mreže (28GHz, 39GHz, 73GHz) za model deteta:
  - pronađene su više vrednosti za intenzitet električnog polja od referentnog graničnog nivoa, ali su one skoncentrisane samo u uzanom površinskom sloju modela, tj. koži,

- maksimalne vrednosti za SAR<sub>1g</sub> i SAR<sub>10g</sub> prekoračuju bazična ograničenja u sloju uz površinu modela koji obuhvata kožu, masno tkivo i deo mišićnog sloja glave.
- Maksimalni porast temperature u glavi deteta nakon 15-to minutnog razgovora je iznosio oko 1°C, dok porast temperature u mozgu nije prelazio 0.7°C.
- Tokom korišćenja mobilnog telefona za čitanja sadržaja sa ekrana, vrednosti intenziteta električnog polja i SAR premašuju referentne granične nivoe i bazična ograničenja samo kada se ekran telefona nalazi veoma blizu korisnika. Kod uobičajenih rastojanja vrednosti su unutar dozvoljenih granica. Slično, i porast temperature u očima ne dostiže visoke vrednosti za uobičajene pozicije pri korišćenju telefona.
- Morfološke karakteristika tkiva i organa dece u koži i masnom tkivu utiču na porast vrednosti za SAR. Posledica morfoloških razlika između glave deteta i glave odrasle osobe je da deca upijaju više elektromagnetskog zračenja u osetljivim tkivima glave.
- Usled opštih razlika u anatomiji glave i geometrije modela odrasle osobe i deteta, prisutne su više vrednosti intenziteta električnog polja i SAR kod modela deteta.
- Eksperimentalno određivanje vrednosti za SAR pomoću fantoma ima niz nedostataka:
  - nemoguće je doći do vrednosti za SAR u površinskom sloju modela, a upravo u površinskim slojevima (koži i masnom tkivu) se dobijaju najveće vrednosti za SAR,
  - homogena struktura fantoma za posledicu ima veću dubinu penetracije elektromagnetskog talasa a samim tim i niže vrednosti za SAR u koži, masnom tkivu, mišićima i malom delu lobanje u odnosu na realistični model.

Pored svega nabrojanog, ukoliko izloženost počinje vrlo rano u životu, može da se javi veća kumulativna doza tokom života. Kako elektromagnetska polja imaju kumulativne efekte, za koje postoje dokazi iz epidemiologije, onda se može očekivati da će rana izloženost već u detinjstvu biti povezana sa povećanim rizikom za pojavu štetnih efekata tokom života.

Na kraju kao preporuka, ukoliko nije moguće decu i adolescente držati dalje od mobilnih telefona, onda je bar neophodno ograničiti tj. svesti na minimum vreme tokom kojeg koriste ove uređaje.

Imajući u vidu postavljene ciljeve, kao i dobijene rezultate, doprinos ove disertacije se pre svega ogleda u:

- formiranju numeričkih modela sa anatomskim i morfološkim karakteristikama glave deteta i odrasle osobe, sa akcentom na numerički model glave deteta, budući da je većina studija o uticaju elektromagnetskog zračenja koje potiče od mobilnih telefona fokusirana na odrasle osobe.

- formiranju istraživačkih modela koji odgovaraju realnim situacijama korišćenja mobilnog telefona za prenos govora i podataka,
- detaljnoj analizi prostorne raspodele elektromagnetskog polja u biološkim tkivima glave deteta pri realnim uslovima korišćenja mobilnog telefona,
- detaljnoj analizi prostorne raspodele apsorbirane energije elektromagnetskog talasa i njene zavisnosti od elektromagnetskih osobina bioloških tkiva,
- izvršenom ispitivanju efekata zagrevanja tkiva i organa u modelu glave deteta i utvrđenoj apsolutnoj promeni temperature u biološkim tkivima i organima koji su posebno senzitivni na elektromagnetsko polje,
- utvrđenom uticaju razlika u morfološkim karakteristikama tkiva i organa na prostiranje elektromagnetskog talasa,
- utvrđenom uticaju razlike u apsorbovanju energije elektromagnetskog zračenja na biološka tkiva i organe u dečijoj glavi u odnosu na glavu odrasle osobe,
- pokazanim nedostacima eksperimentalnog određivanja SAR vrednosti mobilnog telefona u laboratorijskim uslovima.

Rezultati prikazani u disertaciji predstavljaju dobru osnovu i ukazuju na pravce za nastavak istraživanja uticaja elektromagnetskog zračenja mobilnih telefona i drugih bežičnih komunikacionih uređaja u dečjem uzrastu. Pored dodatne analize uticaja mobilnih telefona koja će pratiti tehnološke trendove, potrebno je ispitati uticaj tablet računara, pametnih satova i drugih bežičnih personalnih uređaja na biološka tkiva. Takođe, sa sve većom upotrebom ovih uređaja potrebno je posvetiti dodatnu pažnju efektima zagrevanja bioloških tkiva i organa i efektima istovremene izloženosti čoveka od strane više bežičnih uređaja u savremenom životnom i radnom okruženju.

## Literatura

- [1] The Statistics Portal. Dostupno na <https://www.statista.com/statistics/274774/forecast-of-mobile-phone-users-worldwide/>
- [2] 10th Annual Cisco Visual Networking Index (VNI) Mobile Forecast Projects 70 Percent of Global Population Will Be Mobile Users. Dostupno na <https://newsroom.cisco.com/press-release-content?articleId=1741352>.
- [3] V. Rideout, M. Saphir, S. Pai, A. Rudd, J. Pritchett, "Zero to Eight: Children's media use in America 2013," A Common Sense Media Research Study, 2013.
- [4] Ofcom, "Children and Parents: Media Use and Attitudes Report," Research Document, 2014.
- [5] The Cell Phone Problem – Technology, Exposures, Health Effects. Environment & Human Health, INC. Dostupno na [http://www.ehhi.org/reports/cellphones/cell\\_phone\\_report\\_EHHi\\_Feb2012.pdf](http://www.ehhi.org/reports/cellphones/cell_phone_report_EHHi_Feb2012.pdf).
- [6] Could the 5G Future Pose a Health Risk?, dostupno na <http://www.lightreading.com/mobile/5g/could-the-5g-future-pose-a-health-risk-/d/d-id/723324?print=yes>.
- [7] Millimeter waves: How we got here, the physical challenges, and 5G opportunities, dostupno na <http://www.nutaq.com/blog/millimeter-waves-how-we-got-here-physical-challenges-and-5g-opportunities>.
- [8] 5G: What Is It & Why Does It Matter?, dostupno na <http://www.lightreading.com/mobile/5g/5g-what-is-it-and-why-does-it-matter/a/d-id/714803>.
- [9] Q. Zhao, J. Li, "Rain attenuation in millimeter wave ranges," In Proceedings of the IEEE international Symposium Antennas, Propagation & EM theory, pp. 1–4, 2006.
- [10] R. J. Humpleman, P. A. Watson, "Investigation of attenuation by rainfall at 60 GHz," Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, vol. 125, no. 2, pp. 85–91, 1978.
- [11] E-band technology. E-band Communications, dostupno na <http://www.e-band.com/index.php?id=86>.
- [12] T. Rappaport et al., "Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: It will work!," IEEE Access, 1, pp. 335–349, 2013.
- [13] S. Yost, "mmWave: Battle of the Band". Dostupno na <http://www.ni.com/white-paper/53096/en/>.
- [14] T. S. Rappaport, J. N. Murdock, F. Gutierrez, "State of the art in 60 GHz integrated circuits & systems for wireless communications," Proc. IEEE, vol. 99, no. 8, pp. 1390–1436, 2011.
- [15] M. A. Bhat, V. Kumar, "Calculation of SAR and Measurement of Temperature Change of Human Head due to The Mobile Phone Waves at Frequencies 900MHz and 1800MHz," *Advances in Physics Theories and Applications*, vol. 16, pp. 54-63, 2013.
- [16] T. Wessapan, S. Srisawatdhisukul, P. Rattanadecho, "Specific absorption rate and temperature distributions in human head subjected to mobile phone radiation at different frequencies," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 55, pp. 347-359, 2012.
- [17] ANSI (1982). American National Standards Institute. Safety Levels with respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 300kHz to 100GHz Report ANSI C95-1982, (New York: The IEEE Inc)
- [18] A. Christ, M. C. Gosselin, M. Christopoulou, S. Kühn, N. Kuster, "Age-dependent tissue-specific exposure of cell phone users," *Phys Med Biol.*, vol. 55, no. 7, pp. 1767-83, 2010.

- [19] H. Lai, "Neurological Effects of Radiofrequency Electromagnetic Radiation Relating to Wireless Communication Technology," IBC-UK Conference: "Mobile Phones - Is there a Health Risk?" September 16-17, 1997, Belgium, dostupno na [http://www.mapcruzin.com/radiofrequency/henry\\_lai1.htm](http://www.mapcruzin.com/radiofrequency/henry_lai1.htm)
- [20] Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks - SCENIHR, "Possible effects of Electromagnetic Fields (EMF) on Human Health".  
Dostupno na [https://ec.europa.eu/health/ph\\_risk/committees/04\\_scenihhr/docs/scenihhr\\_o\\_007.pdf](https://ec.europa.eu/health/ph_risk/committees/04_scenihhr/docs/scenihhr_o_007.pdf)
- [21] Electric properties of tissues by D Miklavcic, N Pavselj, F X Hart Wiley encyclopedia of biomedical engineering (2006) Volume: 209, Issue: 922834401, Publisher: Wiley Online Library, Pages: 1-12, ISSN: 00247790, DOI: 10.1002/9780471740360.ebs0403, PubMed: 13981120.
- [22] B. J. Roth, "The Electrical Conductivity of Tissues," The Biomedical Engineering Handbook: Second Edition. Editor Joseph D. Bronzino. ISBN: 978-0-8493-8594-0, DOI: 10.1201/9781420049510.
- [23] A. Peyman, S. Holden, C. Gabriel, "Dielectric Properties of Tissues at Microwave Frequencies," Mobile Telecommunications and Health Research Programme, dostupno na [http://www.mthr.org.uk/research\\_projects/documents/Rum3FinalReport.pdf](http://www.mthr.org.uk/research_projects/documents/Rum3FinalReport.pdf).
- [24] H. P. Schwan, K. R. Foster, "RF-Field Interactions with Biological Systems: Electrical Properties and Biophysical Mechanisms," *Proc. of the IEEE*, vol. 68, pp. 104-113, 1980.
- [25] R. Pethig, "Dielectric Properties of Biological Materials: Biophysical and Medical Applications," *IEEE Trans. Electr. Insul.*, vol. 19, pp. 453-473, 1984.
- [26] C. Gabriel, S. Gabriel, E. Corthout, "The dielectric properties of biological tissues: I. Literature survey," *Phys.Med.Biol.*, vol. 41, pp. 2231-2249, 1996.
- [27] K. R. Foster, H. P. Schwan, "Dielectric properties of tissues," CRC handbook of biological effects of electromagnetic fields, edited by: Polk C and Postow E, CRC Press, 1995.
- [28] A. Peyman, A. A. Rezazadeh, C. Gabriel, "Changes in the dielectric properties of rat tissue as a function of age at microwave frequencies", *Phys. Med. Biol.*, vol. 46, no. 6, pp. 1617-1629, 2001.
- [29] A. Peyman, A. A. Rezazadeh, C. Gabriel, "Changes in the dielectric properties of rat tissue as a function of age at microwave frequencies," Corrections to Peyman et al. (2001). *Phys. Med. Biol.*, vol. 47, pp. 2187-2188, 2002.
- [30] G. Schmid, R. Uberbacher, "Age dependence of dielectric properties of bovine brain and ocular tissue in the frequency range of 400 MHz to 18 GHz," *Phys. Med. Biol.*, vol. 50, pp. 4711-4720, 2005.
- [31] S. Gabriel, R. W. Lau, C. Gabriel, "The dielectric properties of biological tissues: II. Measurements in the frequency range 10 Hz to 20 GHz," *Phys. Med. Biol.*, vol. 41, pp. 2251-2269, 1996.
- [32] S. Gabriel, R. W. Lau, C. Gabriel, "The dielectric properties of biological tissues: III. Parametric models for the dielectric spectrum of tissues," *Phys. Med. Biol.*, vol. 41, pp. 2271-2293, 1996.
- [33] D. Haemmerich, D. J. Schutt, I. dos Santos, J. G. Webster, D. M. Mahvi, "Measurement of temperature-dependent specific heat of biological tissues," *Physiol. Meas.*, vol. 26, no. 1, pp. 59-67, 2005.
- [34] Specific Absorption Rate (SAR) For Cell Phones, dostupno na <https://www.fcc.gov/consumers/guides/specific-absorption-rate-sar-cell-phones-what-it-means-you>.
- [35] CENELEC - EN 50361. Basic standard for the measurement of specific absorption rate related to human exposure to electromagnetic fields from mobile phones (300MHz-3GHz).

- [36] IEC 62209-1:2005. Human exposure to radio frequency fields from hand-held and body-mounted wireless communication devices - Human models, instrumentation, and procedures - Part 1: Procedure to determine the specific absorption rate (SAR) for hand-held devices used in close proximity to the ear (frequency range of 300 MHz to 3 GHz).
- [37] IEEE 1528:200X. Recommended Practice for Determining the Peak Spatial-Average Specific Absorption Rate (SAR) in the Human Body Due to Wireless Communications Devices: Experimental Techniques.
- [38] B. B. Beard, W. Kainz, (2004), "Review and standardization of cell phone exposure calculations using the SAM phantom and anatomically correct head models," *BioMedical Engineering Online*, <http://www.biomedcentral.com/content/pdf/1475-925x-3-34.pdf> (accessed December 8, 2010).
- [39] C. C. Gordon, T. Churchill, C. E. Clauser et al., "Anthropometric Survey of U.S. Army Personnel: Methods and Summary Statistics Technical Report NATICK/TR-89/044," U.S. Army Natick Research, Development and Engineering Center, Natick, MA. 1989.
- [40] T. Williams, E. Services, D. Riley, "Standards for the Management of Potential Health Risks of EM Fields", dostupno na [http://www.compliance-club.com/archive/old\\_archive/031124.htm](http://www.compliance-club.com/archive/old_archive/031124.htm).
- [41] Phantoms for Dosimetric and Radiation Evaluations, dostupno na <http://www.speag.com/>.
- [42] D. Seabury, "An Update On SAR Standards And The Basic Requirements For SAR Assessment," ETS-Lindgren, dostupno na [http://www.ets-lindgren.com/pdf/sar\\_lo.pdf](http://www.ets-lindgren.com/pdf/sar_lo.pdf).
- [43] Government of Canada, "Specific absorption rate," [https://www.ic.gc.ca/eic/site/ceb-bhst.nsf/eng/h\\_tt00084.html#Q6](https://www.ic.gc.ca/eic/site/ceb-bhst.nsf/eng/h_tt00084.html#Q6).
- [44] A. A. de Salles, G. Bulla, C. E. Rodriguez, "Electromagnetic absorption in the head of adults and children due to mobile phone operation close to the head," *Electromagn Biol Med.*, vol. 25, no. 4, pp. 349-60, 2006.
- [45] O. P. Gandhi, L. L. Morgan, A. A. de Salles, Y. Y. Han, R. B. Herberman, D. L. Davis, "Exposure limits: the underestimation of absorbed cell phone radiation, especially in children," *Electromagn Biol Med.*, vol. 31, no. 1, pp. 34-51, 2012.
- [46] C. Oliveira, M. Mackowiak, L. M. Correia, "Exposure Assessment of Smartphones and Tablets," Twelfth International Symposium on Wireless Communication Systems, 25–28 August 2015, Brussels, Belgium.
- [47] J. Wiart, A. Hadjem, M. F. Wong, I. Bloch, "Analysis of RF exposure in the head tissues of children and adults," *Phys. Med. Biol.*, vol. 53, no. 13, pp. 3681–3695, 2008.
- [48] N. Kuster, "Past, current, and future research on the exposure of children," Foundation for Research on Information Technology in Society (IT<sup>2</sup>IS), Foundation Internal Report; 2009, dostupno na [http://www1.itis.ethz.ch/index/index\\_itis.html](http://www1.itis.ethz.ch/index/index_itis.html) [accessed 08.12.10].
- [49] Wu Bo, "Comparative Study of Numerically Computed Spatial Peak SAR Values in Uniformly Scaled SAM Head Models Exposed to Mobile Phone Radiation," *Electromagnetic Compatibility*, 2007. EMC 2007, pp. 451 – 454.
- [50] M. Lu, S. Ueno, "Comparison of specific absorption rate induced in brain tissues of a child and an adult using mobile phone," *J. Appl. Phys.*, vol. 111, no. 7, pp. 07B311-1\_07B311-3, 2012.

- [51] A. K. Datta, *Biological and Bioenvironmental Heat and Mass Transfer*, Marcel Dekker, Inc., ISBN 978-0-8247-0775-3, New York, USA, 2002.
- [52] H. H. Pennes, "Analysis of tissue and arterial blood temperatures in the resting human forearm," *Journal of applied physiology*, vol. 1, no. 2, pp. 93–122, 1948.
- [53] A. Zolfaghari, M. Maerefat, "A New Simplified Thermoregulatory Bioheat Model for Evaluating Thermal Response of the Human Body to Transient Environment," *Building and Environment*, Vol. 45, No. 10, pp. 2068-2076, ISSN 0360-1323, 2010.
- [54] A. Zolfaghari, M. Maerefat, (2011), Bioheat Transfer, *Developments in Heat Transfer*, Dr. Marco Aurelio Dos Santos Bernardes (Ed.), InTech, DOI: 10.5772/22616. Dostupno na <http://www.intechopen.com/books/developments-in-heat-transfer/bioheat-transfer>.
- [55] F. Kreith, (2000), *The CRC Handbook of Thermal Engineering*, CRC Press, ISBN 978-0-84939581-9, Boca Raton, USA.
- [56] ICNIRP, "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, electromagnetic fields (up to 300GHz) – ICNIRP guidelines," *Health Phys.*, vol. 74, no. 4, pp. 494-522, 1998.
- [57] Council Recommendation 1999/519/EC on the limitation of exposure of the general public to electromagnetic fields (0 Hz to 300 GHz), dostupno na [http://ec.europa.eu/health/sites/health/files/electromagnetic\\_fields/docs/emf\\_rec519\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/health/sites/health/files/electromagnetic_fields/docs/emf_rec519_en.pdf)
- [58] R. Stam, "Comparison of international policies on electromagnetic fields (power frequency and radiofrequency fields)," Laboratory for Radiation Research, National Institute for Public Health and the Environment, May 2011, Netherlands.
- [59] ANSI/IEEE C95.1-1992, "IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz," <http://standards.ieee.org/findstds/standard/C95.1-1991.html>
- [60] Directive 2004/40/EC of the European Parliament and of the Council of 29 April 2004, dostupno na <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32004L0040&qid=1468500773606&from=en>.
- [61] Pravilnik o granicama izlaganja nejonizujućim zračenjima, *Službeni glasnik RS*, br. 104/09, decembar 2009.
- [62] L. Hardell, M. Carlberg, K. H. Mild, "Epidemiological evidence for an association between use of wireless phones and tumor diseases," *Pathophysiology*, 2009.
- [63] L. Hardell, a Hallquist, K. H. Mild, M. Carlberg, a Pålsson, and a Lilja, "Cellular and cordless telephones and the risk for brain tumours.," *Eur. J. Cancer Prev.*, vol. 11, no. 4, pp. 377–386, 2002.
- [64] L. Hardell, M. Carlberg, and K. H. Mild, "Case-control study of the association between the use of cellular and cordless telephones and malignant brain tumors diagnosed during 2000-2003," *Environ. Res.*, vol. 100, no. 2, pp. 232–241, 2006.
- [65] L. Hardell, Excerpt from Bioinitiative Report, 2007.
- [66] L. Hardell, M. Carlberg, F. Söderqvist, and K. H. Mild, "Meta-analysis of long-term mobile phone use and the association with brain tumours," *Int. J. Oncol.*, vol. 32, no. 5, pp. 1097–1103, 2008.
- [67] L. Hardell and M. Carlberg, "Mobile phones, cordless phones and the risk for brain tumours," *Int. J. Oncol.*, vol. 35, no. 1, pp. 5–17, 2009.



- [68] L. Hardell, M. Carlberg, and K. H. Mild, "Pooled analysis of case-control studies on malignant brain tumours and the use of mobile and cordless phones including living and deceased subjects," *Int. J. Oncol.*, vol. 38, no. 5, pp. 1465–1474, 2011.
- [69] D. Aydin, M. Feychting, J. Schuz, T. Tynes, T. V Andersen, L. S. Schmidt, A. H. Poulsen, C. Johansen, M. Prochazka, B. Lannering, L. Klæboe, T. Eggen, D. Jenni, M. Grotzer, N. Von der Weid, C. E. Kuehni, and M. Roosli, "Mobile phone use and brain tumors in children and adolescents: a multicenter case-control study," *J. Natl. Cancer Inst.*, vol. 103, no. 16, pp. 1264–1276, 2011.
- [70] E. Cardis, "Brain tumour risk in relation to mobile telephone use: Results of the INTERPHONE international case-control study," *Int. J. Epidemiol.*, vol. 39, no. 3, pp. 675–694, 2010.
- [71] S. Sadetzki, A. Chetrit, A. Jarus-Hakak, E. Cardis, Y. Deutch, S. Duvdevani, A. Zultan, I. Novikov, L. Freedman, and M. Wolf, "Cellular Phone Use and Risk of Benign and Malignant Parotid Gland Tumors-A Nationwide Case-Control Study," *Am. J. Epidemiol.*, vol. 167, no. 4, pp. 457–467, 2008.
- [72] S. Lönn, A. Ahlbom, H. C. Christensen, C. Johansen, J. Schüz, S. Edström, G. Henriksson, J. Lundgren, J. Wennerberg, and M. Feychting, "Mobile phone use and risk of parotid gland tumor," *Am. J. Epidemiol.*, vol. 164, no. 7, pp. 637–643, 2006.
- [73] V. G. Khurana, C. Teo, M. Kundi, L. Hardell, and M. Carlberg, "Cell phones and brain tumors: a review including the long-term epidemiologic data," *Surg. Neurol.*, vol. 72, no. 3, pp. 205–214, 2009.
- [74] D. W. Kaufman, T. E. Anderson, and S. Issaragrisil, "Risk factors for leukemia in Thailand," *Ann. Hematol.*, vol. 88, no. 11, pp. 1079–1088, 2009.
- [75] R. Cooke, S. Laing, and A. J. Swerdlow, "A case-control study of risk of leukaemia in relation to mobile phone use.," *Br. J. Cancer*, pp. 1–7, 2010.
- [76] I. Fejes, Z. Závaczki, J. Szöllosi, S. Koloszár, J. Daru, L. Kovács, and a Pál, "Is there a relationship between cell phone use and semen quality?," *Arch. Androl.*, vol. 51, no. 5, pp. 385–393, 2005.
- [77] A. Wdowiak, L. Wdowiak, and H. Wiktor, "Evaluation of the effect of using mobile phones on male fertility.," *Ann. Agric. Environ. Med.*, vol. 14, no. 1, pp. 169–172, 2007.
- [78] G. N. De Iuliis, R. J. Newey, B. V. King, and R. J. Aitken, "Mobile phone radiation induces reactive oxygen species production and DNA damage in human spermatozoa in vitro," *PLoS One*, vol. 4, no. 7, 2009.
- [79] A. Agarwal, N. R. Desai, K. Makker, A. Varghese, R. Mouradi, E. Sabanegh, and R. Sharma, "Effects of radiofrequency electromagnetic waves (RF-EMW) from cellular phones on human ejaculated semen: an in vitro pilot study," *Fertil. Steril.*, vol. 92, no. 4, pp. 1318–1325, 2009.
- [80] C. Avendano, A. Mata, C. A. Sanchez-Sarmiento, G. F. Doncel, "Use of laptop computers connected to internet through Wi-Fi decreases human sperm motility and increases sperm DNA fragmentation," *Fertil Steril*, vol. 97, no. 1, pp. 39–45, 2012.
- [81] I. Fejes, Z. Závaczki, J. Szöllosi, S. Koloszár, J. Daru, L. Kovács, and a Pál, "Is there a relationship between cell phone use and semen quality?," *Arch. Androl.*, vol. 51, no. 5, pp. 385–393, 2005.
- [82] European Union. Risk Evaluation of Potential Environmental Hazards From Low Frequency Electromagnetic Field Exposure Using Sensitive in vitro Methods. (REFLEX) 2004; ISIS Report. Confirmed: Mobile Phones Break DNA & Scramble Genomes. 01/17/05. [207](http://www.i-</a></p></div><div data-bbox=)

- sis.org.uk/CMPBDASG.php; Adlkofer, F. Present state of research on genotoxic effects of mobile phone radiation. 2010.
- [83] Y. Zhu, F. Gao, X. Yang, H. Shen, W. Liu, "The effect of microwave emission from mobile phones on neuron survival in rat central nervous system," *Prog. Electromagn. Res.*, vol. 82, pp. 287–98, 2008.
- [84] N. Falzone, C. Huyser, D. R. Franken, and D. Leszczynski, "Mobile phone radiation does not induce pro-apoptosis effects in human spermatozoa," *Radiat. Res.*, vol. 174, no. 2, pp. 169–176, 2010.
- [85] S. N. Narayanan, R. S. Kumar, B. K. Potu, S. Nayak, P. G. Bhat, and M. Mailankot, "Effect of radio-frequency electromagnetic radiations (RF-EMR) on passive avoidance behaviour and hippocampal morphology in Wistar rats," *Ups. J. Med. Sci.*, vol. 115, no. December 2009, pp. 91–96, 2010.
- [86] S. N. Narayanan, R. S. Kumar, B. K. Potu, S. Nayak, and M. Mailankot, "Spatial memory performance of Wistar rats exposed to mobile phone.," *Clin. (São Paulo, Brazil)*, vol. 64, no. 3, pp. 231–4, 2009.
- [87] R. Maier, S. E. Greter, and H. Maier, "Effects of pulsed electromagnetic fields on cognitive processes - A pilot study on pulsed field interference with cognitive regeneration," *Acta Neurol. Scand.*, vol. 110, no. 1, pp. 46–52, 2004.
- [88] R. I. Luria, I. Eliyahu, R. Hareuveny, M. Margaliot, and N. Meiran, "Cognitive effects of radiation emitted by cellular phones: The influence of exposure side and time," *Bioelectromagnetics*, vol. 30, no. 3, pp. 198–204, 2009.
- [89] J. Schüz, G. Waldemar, J. H. Olsen, and C. Johansen, "Risks for central nervous system diseases among mobile phone subscribers: A Danish retrospective cohort study," *PLoS One*, vol. 4, no. 2, 2009.
- [90] T. S. Aldad, G. Gan, X.-B. Gao, and H. S. Taylor, "Fetal radiofrequency radiation exposure from 800-1900 mhz-rated cellular telephones affects neurodevelopment and behavior in mice.," *Sci. Rep.*, vol. 2, p. 312, 2012.
- [91] Y.-H. Byun, M. Ha, H.-J. Kwon, Y.-C. Hong, J.-H. Leem, J. Sakong, S. Y. Kim, C. G. Lee, D. Kang, H.-D. Choi, and N. Kim, "Mobile phone use, blood lead levels, and attention deficit hyperactivity symptoms in children: a longitudinal study.," *PLoS One*, vol. 8, no. 3, p. e59742, 2013.
- [92] A. K. Przybylski, K. Murayama, C. R. Dehaan, and V. Gladwell, "Motivational, emotional, and behavioral correlates of fear of missing out," *Comput. Human Behav.*, vol. 29, no. 4, pp. 1841–1848, 2013.
- [93] M. Sudan, L. Kheifets, O. Arah, J. Olsen, and L. Zeltzer, "Prenatal and Postnatal Cell Phone Exposures and Headaches in Children," *Open Pediatr. Med. Journal*, vol. 6, no. 2012, pp. 46–52, 2012.
- [94] S. Thomas, S. Heinrich, R. Von Kries, and K. Radon, "Exposure to radio-frequency electromagnetic fields and behavioural problems in Bavarian children and adolescents," *Eur. J. Epidemiol.*, vol. 25, no. 2, pp. 135–141, 2010.
- [95] V. LaBode, "Text messaging: One step forward for phone companies, one leap backward for adolescence," *Int. J. Adolesc. Med. Health*, vol. 23, no. 1, pp. 65–71, 2011.
- [96] S. Thomée, A. Härenstam, and M. Hagberg, "Mobile phone use and stress, sleep disturbances, and symptoms of depression among young adults--a prospective cohort study.," *BMC Public Health*, vol. 11, no. 1, p. 66, 2011.

- [97] C.-F. Yen, T.-C. Tang, J.-Y. Yen, H.-C. Lin, C.-F. Huang, S.-C. Liu, and C.-H. Ko, "Symptoms of problematic cellular phone use, functional impairment and its association with depression among adolescents in Southern Taiwan.," *J. Adolesc.*, vol. 32, no. 4, pp. 863–873, 2009.
- [98] B. Hocking and R. Westerman, "Neurological abnormalities associated with CDMA exposure," *Occup. Med. (Chic. Ill.)*, vol. 51, no. 6, pp. 410–413, 2001.
- [99] B. Hocking and R. Westerman, "Neurological changes induced by a mobile phone," *Occup. Med. (Chic. Ill.)*, vol. 52, no. 7, pp. 413–415, 2002.
- [100] B. Hocking and R. Westerman, "Neurological effects of radiofrequency radiation," *Occup. Med. (Chic. Ill.)*, vol. 53, no. 2, pp. 123–127, 2003.
- [101] E. Odaci, O. Bas, and S. Kaplan, "Effects of prenatal exposure to a 900 MHz electromagnetic field on the dentate gyrus of rats: A stereological and histopathological study," in *Brain Research*, 2008, vol. 1238, pp. 224–229.
- [102] A. Y. Rezk, K. Abdulqawi, R. M. Mustafa, T. M. Abo El-Azm, and H. Al-Inany, "Fetal and neonatal responses following maternal exposure to mobile phones," *Saudi Med. J.*, vol. 29, no. 2, pp. 218–223, 2008.
- [103] T. S. Aldad, G. Gan, X.-B. Gao, and H. S. Taylor, "Fetal radiofrequency radiation exposure from 800-1900 mhz-rated cellular telephones affects neurodevelopment and behavior in mice.," *Sci. Rep.*, vol. 2, p. 312, 2012.
- [104] J. A. Elder, "Ocular effects of radiofrequency energy," *Bioelectromagnetics*, Suppl 6, pp. 148-61, 2003.
- [105] Y. Yu and K. Yao, "Non-thermal cellular effects of lowpower microwave radiation on the lens and lens epithelial cells.," *J. Int. Med. Res.*, vol. 38, no. 3, pp. 729–736, 2015.
- [106] E. Bormusov, U. P. Andley, N. Sharon, L. Schächter, A. Lahav, and A. Dovrat, "Non-thermal electromagnetic radiation damage to lens epithelium," *Open Ophthalmol. J.*, vol. 2, pp. 102–106, 2008.
- [107] F. Deepinder, K. Makker, and A. Agarwal, "Cell phones and male infertility: dissecting the relationship," *Reprod. Biomed. Online*, vol. 15, no. 3, pp. 266–270, 2007.
- [108] 3ds Max, dostupno na <http://www.autodesk.com/products/3ds-max/free-trial>.
- [109] CST Studio Suite 2012, dostupno na <https://www.cst.com/Products/CSTMWS>.
- [110] C. Mattiussi, "A Reference Discretization Strategy for the Numerical Solution of Physical Field Problems," *Advances in Imaging and Electron Physics*, vol. 121, pp. 143-279, 2002.
- [111] M. Clemens and T. Weiland, "Discrete Electromagnetism With The Finite Integration Technique," *Progress In Electromagnetics Research*, PIER 32, 65–87, 2001.
- [112] B. Krietenstein, P. Thoma, R. Schuhmann, and T. Weiland, "The perfect boundary approximation technique facing the big challenge of high precision computation," Proceedings of the 19th LINAC Conference, Chicago, August 1998.
- [113] A. Bossavit, and L. Kettunen, "Yee-like schemes on a tetrahedral mesh, with diagonal lumping," *International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*, vol. 12, no. 1/2, 129–142, 1999.
- [114] R. Schuhmann, and T. Weiland, "Conservation of discrete energy and related laws in the finite integration technique," *Progress In Electromagnetics Research*, PIER 32, 301–316, 2001.

- [115] M. Clemens, and T. Weiland, "Transient eddy current calculation with the FI-method," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 35, 1163–1166, May 1999.
- [116] I. Munteanu, T. Weiland, *RF & Microwave Simulation with the Finite Integration Technique – From Component to System Design*, Scientific Computing in Electrical Engineering, Mathematics in Industry, vol. 11, part III, 247-260, 2007.
- [117] E. Tonti, "Finite Formulation of the Electromagnetic Field," *Progress in Electromagnetics Research (PIER)*, vol. 32, pp. 1-44, 2001.
- [118] I. Munteanu, F. Hirtenfelder, "Convergence of the Finite Integration Technique on Various Mesh Types," *GeMiC*, 2005.
- [119] R. Schuhmann, T. Weiland, "The Nonorthogonal Finite Integration Technique Applied to 2D- and 3D-Eigenvalue Problems," *IEEE Transactions On Magnetics*, vol. 36, no. 4, July 2000.
- [120] K. L. Wong, "Introduction and Overview," In: K. L. Wong, Ed., *Planar Antennas for Wireless Communications*, John Willy and Sons, Hoboken, p.1, 2003.
- [121] C. R. Fernández, M. Bonadiman, A. A. A. de Salles, "FDTD simulations and measurements for cell phone with planar antennas," *Annales des Télécommunications*, vol. 59, no. 9/10, pp. 1012-1030, 2004.
- [122] PIFA Planar Inverted-F Antena, dostupno na <http://www.antenna-theory.com/>.
- [123] C95.3-2002 - IEEE Recommended Practice for Measurements and Computations of Radio Frequency Electromagnetic Fields With Respect to Human Exposure to Such Fields, 100kHz-300GHz, <http://standards.ieee.org/findstds/standard/C95.3-2002.html>
- [124] Dielektrične osobine tkiva, dostupno na <http://www.itis.ethz.ch/itis-for-health/tissue-properties/database/dielectric-properties/>.
- [125] A. C. Guyton, J. E. Hall, *Medical Physiology*, Saunders, Philadelphia, PA, 1996 (ch. 73).
- [126] E. R. Adair, B. W. Adams, and G. M. Akel, "Minimal changes in hypothalamic temperature accompany microwave-induced alteration of thermoregulatory behavior," *Bioelectromagnetics*, vol. 5, no. 1, pp. 13–30, 1984.
- [127] A. Hirata, K. Shirai, and O. Fujiwara, "On averaging mass of SAR correlating with temperature elevation due to a dipole antenna," *Prog. Electromagn. Res.*, vol. 84, pp. 221–237, 2008.
- [128] P. Bernardi, M. Cavagnaro, S. Pisa, and E. Piuze, "Power absorption and temperature elevations induced in the human head by a dual-band monopole-helix antenna phone," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 49, no. 12, pp. 2539–2546, 2001.
- [129] M. Fujimoto, A. Hirata, J. Wang, O. Fujiwara, T. Shiozawa, "FDTD-derived correlation of maximum temperature increase and peak SAR in child and adult head models due to dipole antenna," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 48, no. 1, pp. 240–247, 2006.
- [130] G. Carluccio, S. Oh, C. M. Collins, "Ultra-Fast Calculation of SAR-induced Temperature Increase," *Proc. Intl. Soc. Mag. Reson. Med.* Vol. 19, pp. 3844, 2011.
- [131] A. Hirata, K. Shirai, and O. Fujiwara, "On averaging mass of SAR correlating with temperature elevation due to a dipole antenna," *Prog. Electromagn. Res.*, vol. 84, pp. 221–237, 2008.
- [132] P. Bernardi, M. Cavagnaro, S. Pisa, and E. Piuze, "Power absorption and temperature elevations induced in the human head by a dual-band monopole-helix antenna phone," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 49, no. 12, pp. 2539–2546, 2001.

- [133] M. Fujimoto, A. Hirata, J. Wang, O. Fujiwara, T. Shiozawa, "FDTD-derived correlation of maximum temperature increase and peak SAR in child and adult head models due to dipole antenna," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 48, no. 1, pp. 240–247, 2006.
- [134] A. Ibrahiem, C. Dale, W. Tabbara, J. Wiart, analysis of the temperature increase linked to the power induced by rf source, *Progress In Electromagnetics Research, PIER 52 (2005) 23–46*.
- [135] A. I. Sabbah, N. I. Dib, and M. A. Al-Nimr, "Evaluation of specific absorption rate and temperature elevation in a multi-layered human head model exposed to radio frequency radiation using the finite-difference time domain method," *IET Microwaves Antennas Propag.*, vol. 5, no. 9, pp. 1073–1080, 2011.
- [136] Dimenzije oka, dostupno na <http://oci.rs/ljudsko-oko>.
- [137] A. Hirata, S. Watanabe, O. Fujiwara, M. Kojima, K. Sasaki, and T. Shiozawa, "Temperature elevation in the eye of anatomically based human head models for plane-wave exposures.," *Phys. Med. Biol.*, vol. 52, no. 21, pp. 6389–99, 2007.
- [138] G. Schmid and R. Uberbacher, "Age dependence of dielectric properties of bovine brain and ocular tissues in the frequency range of 400 MHz to 18 GHz," *Phys Med Biol*, vol. 50, no. 19, pp. 4711–4720, 2005.
- [139] Claudio R. Fernández, Giovanni Bulla, A. C. Pedra and Alvaro. A. A. de Salles, "Comparison of Electromagnetic Absorption Characteristics in the Head of Adult and a Children for 1800 MHz Mobile Phones", *Microwave and Optoelectronics, SBMO/IEEE MTT-S International Conference, 25-25 July 2005*, pp. 523–528, Brasilia.
- [140] M. Ibrani, L. Ahma, E. Hamiti, and J. Haxhibeqiri, "Derivation of Electromagnetic Properties of Child Biological Tissues at Radio Frequencies", *Progress In Electromagnetics Research Letters*, Vol. 25, pp. 87-100, 2011.
- [141] Fantom za merenje SAR, dostupno na [http://www.nearfield.org/wp-content/uploads/2006/08/web\\_indexsar01.jpg](http://www.nearfield.org/wp-content/uploads/2006/08/web_indexsar01.jpg).
- [142] W. G. Whittow, C. J. Panagamuwa, R. M. Edwards, S. Bashir, and J. C. Vardaxoglou, "Changes in specific absorption rate in the head due to metallic gap loops and a simulated mobile phone source in a study of the effects of jewellery," *Loughborough Antennas and Propagation Conference, LAPC, 2008*, pp. 197–200.
- [143] Elektromagnetne karakteristike materijala, dostupno na [http://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d\\_429.html](http://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d_429.html).

## BIOGRAFIJA AUTORA

Vladimir Stanković je rođen 22.03.1978. god. u Nišu gde je završio osnovnu i srednju školu. Diplomirao je 2005. god. na Elektronskom fakultetu u Nišu sa prosečnom ocenom 8.09 i ocenom 10 na diplomskom ispitu, i time stekao zvanje diplomiranog inženjera elektrotehnike za telekomunikacije.

Student je doktorskih akademskih studija na Elektronskom fakultetu u Nišu, na studijskom programu Elektrotehnika i računarstvo modul Telekomunikacije. Uspešno je položio sve ispite na doktorskim akademskim studijama sa prosečnom ocenom 10.

Od 2008. god. radi na Fakultetu zaštite na radu u Nišu, a od 2010. god. kao asistent pri katedri za Energetske procese i zaštitu. Trenutno je angažovan na izvođenju računskih i laboratorijskih vežbi iz nekoliko nastavnih predmeta.

Objavio je 24 naučna rada, od toga 2 rada u međunarodnim časopisima sa IMPACT faktorom. Koautor je 2 udžbenika, “Elektromagnetni talasi i zračenje” i “Stacionarno električno polje i jednosmerna struja”. Takođe, koautor je zbirke zadataka pod nazivom “Zbirka zadataka iz elektrostatike i jednosmernih struja” i priručnika “Priručnik za bezbedan rad iz oblasti elektrotehnike i elektroenergetike na opremi sistema mobilne telefonije”.

## IZJAVA O AUTORSTVU

Izjavljujem da je doktorska disertacija, pod naslovom

**Analiza prodrlog elektromagnetskog polja mobilnog telefona korišćenjem  
numeričkog modela dečije glave za različite mikrotalasne podopsege**

koja je odbranjena na Elektronskom fakultetu Univerziteta u Nišu:

- rezultat sopstvenog istraživačkog rada;
- da ovu disertaciju, ni u celini, niti u delovima, nisam prijavljivao na drugim fakultetima, niti univerzitetima;
- da nisam povredio autorska prava, niti zloupotrebio intelektualnu svojinu drugih lica.

Dozvoljavam da se objave moji lični podaci, koji su u vezi sa autorstvom i dobijanjem akademskog zvanja doktora nauka, kao što su ime i prezime, godina i mesto rođenja i datum odbrane rada, i to u katalogu Biblioteke, Digitalnom repozitorijumu Univerziteta u Nišu, kao i u publikacijama Univerziteta u Nišu.

U Nišu, 11.10.2017.

Potpis autora disertacije:



(Vladimir B. Stanković)

**IZJAVA O ISTOVETNOSTI ELEKTRONSKOG I ŠTAMPANOG OBLIKA  
DOKTORSKE DISERTACIJE**

Naslov disertacije: **Analiza prodrlog elektromagnetskog polja mobilnog telefona korišćenjem numeričkog modela dečije glave za različite mikrotalasne podopsege**

Izjavljujem da je elektronski oblik moje doktorske disertacije, koju sam predao za unošenje u **Digitalni repozitorijum Univerziteta u Nišu**, istovetan štampanom obliku.

U Nišu, 11.10.2017.

Potpis autora disertacije:



---

(Vladimir B. Stanković)



## IZJAVA O KORIŠĆENJU

Ovlašćujem Univerzitetsku biblioteku „Nikola Tesla“ da u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Nišu unese moju doktorsku disertaciju, pod naslovom:

**Analiza prodrlog elektromagnetskog polja mobilnog telefona korišćenjem  
numeričkog modela dečije glave za različite mikrotalasne podopsege**

Disertaciju sa svim priložima predao sam u elektronskom obliku, pogodnom za trajno arhiviranje.

Moju doktorsku disertaciju, unetu u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Nišu, mogu koristiti svi koji poštuju odredbe sadržane u odabranom tipu licence Kreativne zajednice (Creative Commons), za koju sam se odlučio.

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

U Nišu, 11.10.2017.

Potpis autora disertacije:



(Vladimir B. Stanković)