

## **MODELOVANJE PRODRLIH ELEKTROMAGNETNIH POLJA OD TELEKOMUNIKACIONIH SISTEMA I NJIHOV UTICAJ NA BIOLOŠKE SISTEME**

Vera Marković<sup>1</sup>, Dejan Krstić<sup>2</sup>, Darko Zigar<sup>2</sup>, Dejan Petković<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Elektronski fakultet u Nišu

<sup>2</sup>Fakultet zaštite na radu u Nišu

**Sadržaj:** *U radu su prikazana najznačajnije metode numeričkog modelovanja komponenata elektromagnetnog polja koje potiče od telekomunikacionih sistema kao što je sistem mobilne telefonije, njihovo prodiranje u biološke subjekte, izračunavanje komponenata polja, energije i SARa u njima, kao i jedan novi pristup u proučavanju biološkog uticaja i dejstva na čoveka.*

**Ključne reči:** *modelovanje, EM polje, numeričke metode, mobilne komunikacije*

### **1. Uvod**

Kod analitičkih metoda definisanje problema teorije elektromagnetnih (EM) polja postavljanjem Maxwellovih jednačina u diferencijalnom ili integralnom obliku, dovodi do zahteva pronalazjenja rešenja što je često matematički veoma zahtevno. Uglavnom je za rešavanje elektromagnetnih jednačina neophodno korišćenje: redova, razdvajanja promenljivih, Legendreovih polinoma, Besselovih funkcija, komfornih preslikavanja, Schwarz-Christoffelovih transformacija, Laplaceovih transformacija i drugih matematičkih metoda. Kao rezultat najčešće se ne dobijaju izrazi u zatvorenom obliku, pa se, uz niz drastičnih uprošćenja u geometriji izvora, struja ili raspodele naelektrisanja, do numeričkih rezultata dolazilo nizom daljih aproksimacija. Kako savremene tehnologije traže brza i numerički precizna rešenja, rešavanje mnogih problema teorije elektromagnetnih polja vrši se korišćenjem numeričkih metoda.

Računarska elektromagnetika kod koje se primenjuju numeričke metode postaje sve neophodnija i zajedno sa dostupnim sofisticiranim softverskim paketima rešava probleme EM polja za mnogo kraće vreme nego klasični metodi elektromagnetike. Kao rezultat, elektromagnetni uređaji mogu biti prikazani u realnim oblicima, a ne kao uprošćeni objekti, čime se rešavaju mnogi problemi u projektovanju i analizi u savremenim tehnologijama. Ovo omogućava rešavanje problema određivanja elektromagnetnih polja za proizvoljne geometrije, proizvoljnih izvora sa različitim karakteristikama materijalne sredine, čime klasične metode gube utakmicu u ektivnosti rezultata koje daju.

## 2. Numeričke metode rešavanja EM problema

Proračun komponenti elektromagnetnog polja u ljudskom telu kao nehomogenoj sredini je složen elektromagnetni problem. Prvi proračuni polja su koristili analitičke metode dok je telo čoveka predstavljano (aproksimirano) pomoću homogenih objekata oblika sfere, cilindra, elipsoida i paralelepipeda. Modelovanje tela tako da se ono sastoji od više objekata (glava, trup, ruke, noge), različitih oblika, usložnjavalo je rešavanje Maxwellovih jednačina. Rešavanje problema postaje još složenije kada treba modelirati unutrašnje organe, tako da je gotovo nemoguće doći do rešenja analitičkim metodama. Na sreću, razvitak digitalnih računara, kao i povećanje njihove snage (brzina, tačnost, memorijski resursi) omogućili su korišćenje jednostavnih numeričkih aproksimacionih šema, za rešavanje velikog broja kompleksnih jednačina.

Numerička izračunavanja u elektromagnetici su kombinacija matematičkih metoda i teorije polja. Pre rešavanja problema bitno je uspostaviti korektan matematički model problema odnosno njegovih delova. *Maxwellove* jednačine i odgovarajući granični uslovi su neophodni osnov za modelovanje praktičnih elektromagnetnih problema. *Greenova* teorema i metod ekvivalentnih izvora su osnovni alat za numeričke tehnike. Korišćenjem *Stokesove* teoreme i teoreme *Gaus-Ostrogradskyog Maxwellove* jednačine mogu biti transformisane iz diferencijalnog oblika u integralni oblik i obrnuto.

Pri numeričkom rešavanju bitno je da je fizičko stanje izraženo korektno kroz matematički model korišćenjem diferencijalnih jednačina, integralnih jednačina ili uz pomoć varijacionih izraza; da je oblast koju predstavlja diskretizacioni model, definisana skupom algebarskih jednačina; da računarski program, odnosno softverski paket, može da izvrši izračunavanje na osnovu matematičkog modela u zadatom domenu.

Zbog toga je neophodno je transformisati operatorske jednačine (diferencijalne ili integralne) u matrične jednačine. U slučaju da se kreće od diferencijalnih jednačina, govori se o pristupu preko teorije polja, tj. metod zapreminskih domena (*domain method*), dok ako se kreće od integralnih jednačina, govori se o tehnikama raspodele izvora ili graničnim metodima (*boundary method*).

Metode za realno numeričko modelovanje neprekidne sredine mogu se podeliti na: integralne metode, diferencijalne metode i varijacione metode [1]. Da bi se izračunale vrednosti polja od pojedinih izvora, kao i da bi se izvršilo modelovanje izvora i sagledali efekti izvora, neophodno je ovladati efikasnim numeričkim alatima. To su numeričke metode koje omogućavaju efikasan i dostupan simulacioni model čiji rezultati simulacije se mogu prikazati na odgovarajući način.

Metode zasnovane na zapreminskim domenima zahtevaju diskretizaciju zapremine neophodne za numeričko izračunavanje (*computational domain*), koja uključuje diskretizaciju fizičkih objekata (izvora, fizičkih objekata u prostoru i bioloških subjekata) kao i diskretizaciju slobodnog prostora u kome se prostire elektromagnetni talas. Na primer, svaki deo ljudskog tela, koji se smatra homogenim, potrebno je modelirati kao objekat koji ima odgovarajuće elektromagnetne osobine. Veći broj takvih elementarnih zapremine (objekata) dovodi do realnijeg modela. Diskretizacija se obavlja u smislu da se diskretne jednačine izvode transformacijom iz *Maxswellovih* jednačina kontinualnog prostora uz korišćenje mreže kojom se vrši diskretizacija prostora. Na osnovu načina diskretizacije prostora metode se mogu razvrstati na: metode koje su zasnovane na konačnim razlikama (*finite differences –FD*), metode koje su zasnovane na

konačnim zapreminama (*finite volumes – FV*), metode koje su zasnovane na konačnim elementima (*finite elements- FE*) i ćelijske metode (Cell Methods – CM) [2].

Neophodno je ograničiti prostor u kome se vrši izračunavanje. Na granicama tog prostora, kao i na graničnim površinama između različitih delova tog prostora, moraju biti zadovoljeni granični uslovi. Unutar domena u kojima se vrši izračunavanje, može biti definisan i port, kako bi se izvršilo povezivanje veličina teorije električnih kola i parametara refleksije. Celokupan 3D prostor se diskretizuje deljenjem na jedinične ćelije sa električno homogenim materijalom. Oblik jedinične ćelije može biti jednostavna kocka ili složeni tetraedar. Tetraedar se sastoji od četiri jednakostranična trougla i njime se može dobiti bolja aproksimacija zakrivljenih struktura. Unutar jedinične ćelije veličine polja se definišu i izračunavaju numeričkim postupkom. U zavisnosti od metode, veličine koje se izračunavaju mogu biti električno polje, magnetno polje ili elektromagnetni potencijali.

Suprotno, metodi zasnovani na površinskoj integraciji segmentiziraju samo fizičke objekte (izvore) u skladu sa njihovom geometrijskom strukturom i izračunavaju izvore elektromagnetnog polja na tim površinama.

Numeričke metode se mogu klasifikovati i na metode u frekvencijskom domenu i metode u vremenskom domenu. U frekvencijskom domenu rešenje se dobija posebno izračunavanjem za svaku pojedinačnu frekvenciju uglavnom za više izvora. U vremenskom domenu izračunava se vremenski odziv strukture, uglavnom za jedan izvor, korak po korak dok se ne dođe do stabilnog stanja. Iz vremenskog odziva se dobija frekvencijski odziv primenom *Fourierove* transformacije. Jedna od bitnih razlika je da u vremenskom domenu odziv zavisi od pobude, tj. u zavisnosti od vrste pobude (kao, na primer, step funkcija, *Diracova* delta funkcija, itd.) zavisioće prelazno stanje i konačni odziv, dok u frekvencijskom domenu prelazna funkcija stanja ne zavisi od pobude.

### 3. Pregled i podela numeričkih metoda

Može se izvršiti grupisanje metoda na diferencijalne, integralne i ostale (mešovite). Diferencijalne metode su: Metod konačnih razlika - Finite Difference Method (FDM), Metod konačnih razlika u vremenskom domenu – Finite Difference Time Domain Method (FDTD) i Metod konačnih elemenata – Finite Element Method (FEM) .

Integralne metode su: Metod simulacije naelektrisanja – Charge Simulation Method (CSM), Metod simulacije površinskih naelektrisanja – Surface Charge Simulation Method (SCSM), Metod integralnih jednačina graničnih uslova – Boundary Integral Equation Method (BIEM), Metod momenata – Method of Moments (MoM) , Tehnika konačnih integrala – Finite Inegration Tehnique (FIT), Mrežne metode - Multiple Multiple Metod (MMP) i Generalized Multiple Technique (GMT).

U ostale metode mogu se svrstati: Metod vodova - Transmission Line Method (TLM), Metod graničnih uslova - Boundary Elements Method (BEM), Metod konačnih razlika za električni skalar potencijal – Scalar Potential Finite Difference (SPFD), 3D metod impedansi - Three dimensional Impedance Metod (IM).

Metode na kojima su zasnovani komercijalni softverski paketi koji se koriste pri modelovanju su najčešće: Finite Difference Time Domain Method (FDTD), Method of Moments (MoM), Finite Elements Method (FEM), Three-dimensional Impedance Method (IM), Scalar-Potential-Finite-Difference (SPFD) metod, itd.

Od softverskih paketa za simulaciju zasnovanih na FDTD metodi možemo pomenuti: XFDTD – Remcom, EMPIRE- IMST, SEMCAD X i FIDELITY. Primeri softverskih paketa za simulaciju zasnovanih na FEM metodi su: OPERA 3D-Vector Fields, HFSS i Multiphysics. Softverski paketi za simulaciju zasnovani na FIT metodi su: CST MICROWAVE SUITE i MAFIA 4.1. Od softverskih paketa za simulaciju zasnovanim na ostalim numeričkim metodima pomenućemo: MEFiSTo-3D Pro, Micro-Stripes, QuickWave-3Da, EMC2000-VF.

#### 4. Matematički modeli čoveka

Matematički model čoveka koji bi opisao prodrta EM polja je veoma složen. Numerički modeli fizičkih tela se mogu podeliti na teorijske modele (fantome) i voxel (*volumetric pixel*) modele. Ovako formirani numerički modeli se koriste za teorijske proračune i računarske simulacije. U teorijskim analizama koriste se fantomi jednostavnih oblika zbog problema sa postavljanjem analitičkog oblika rešenja. Ove vrste modela se zovu teorijski fantomi.

Najjednostavnije je telo čoveka aproksimirati osno-simetričnim obrtnim telima kao što su sfera ili rotacioni izduženi elipsoid (slika 1). Ovakvi modeli kao najjednostavniji mogu se sa ograničenom tačnošću koristiti u zoni zračenja. Izračunate vrednosti na osnovu ovih modela su gruba aproksimacija stvarnih vrednosti intenziteta polja u ljudskom telu, jer se telo sastoji iz niza organa koji imaju različite elektromagnetne karakteristike.

Za izračunavanje polja u telu kada se izvor i telo nalaze veoma blizu jedan drugog, kao pri korišćenju mobilnog telefona, neophodno je postaviti preciznije blokovske modele čoveka. Metod momenata (MoM) i metod konačnih elemenata (FEM) mogu se upotrebiti sa blokovskim modelom čoveka (slika 1), [4,5].

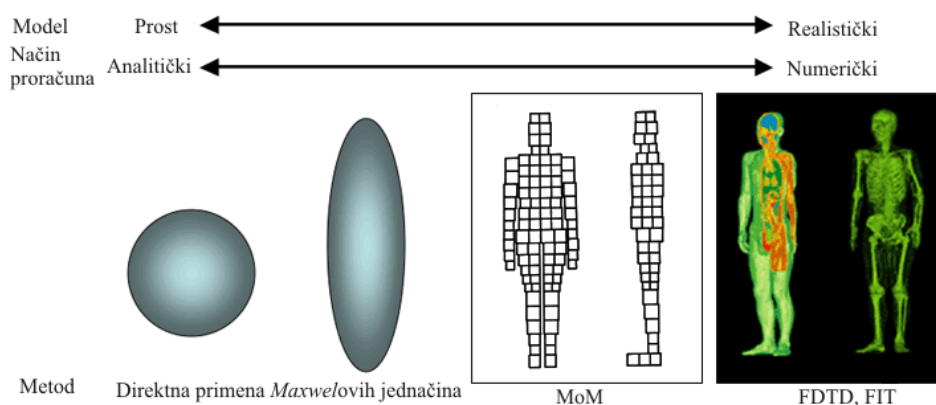
Za povećanje tačnosti ovako dobijenih rezultata kada se antene kao izvori polja nalaze u blizini tela (bliska zona), neophodno je korišćenje realističnih fantoma, koji su sačinjeni od više blokova, kako bi se realnije modelovao oblik tela. Smanjivanje veličine blokova i modeliranje anatomske preciznije strukture tela dovelo je do voxel modela. Voxel (*volumetric pixel*) je element zapremine trodimenzionalnog prostora koji je podeljen mrežom. Zapravo, ono što predstavlja pixel u 2D bitmapiranoj slici to je voxel u 3D prostoru i dobar je za predstavljanje nehomogenih sredina. Voxel modeli su numerički modeli kojima je telo izdeljeno na male elementarne zapremine – vovele, koji mogu imati različite oblike, i svaki element ima svoje EM karakteristike,  $\epsilon, \mu, \sigma$ .

Prvi anatomske korektni voxel modeli nastali su kao rezultat projekta VHP (*Visible Human Project*) [6], čiji je cilj bio kreiranje kompletnog računarskog, anatomske detaljnog trodimenzionalnog modela muškog i ženskog ljudskog tela. Dugoročni cilj je bio baza podataka o strukturi ljudskog tela koja bi bila dostupna naučnoj javnosti.

U skorije vreme napredak u tehnologiji medicinskog prikazivanja, kao što su MRI, X-zračenje, CT i veliko povećanje moći računara, su omogućili i olakšali razvijanje trodimenzionalnih modela kako glave, tako i čitavog tela čoveka.

Modeli ljudske glave se obično koriste za izračunavanje u EM dozimetriji [7,8]. U ovim radovima je izračunat SAR (*specific absorption rate*) unutar modela dečje glave. Formiranje modela glave deteta prostim smanjivanjem glave odrasle osobe nije najbolje rešenje jer se unutrašnja struktura modela dečje glave može značajno razlikovati od glave

odraslog, što u procesu simulacije može da dovede do grešaka pri izračunavanju elektromagnetnih polja u modelu glave deteta [9]. Suština razvijanja numeričkih *voxel* modela je u tome da istraživači iz različitih oblasti dobiju precizne modele koje mogu koristiti za simulaciju pojava u svojim oblastima istraživanja.



Slika 1 – Modeli čoveka i način proračuna polja unutar modela [5]

## 5. Modeliranje i simulacija apsorpcije zračenja mobilnog telefona u glavi čoveka

Proračun i analiza *SAR* dobijenog simulacijom korišćenjem numeričkih metoda unutar anatomskog modela glave značajni su iz više razloga i to: omogućeno je testiranje za svaki model mobilnog telefona na *SAR* vrednosti u skladu za propisima i standardima iz ove oblasti [10,11], dobijeni su pouzdani i precizni podaci što je i eksperimentalno dokazano, [12, 13, 14, 15, 16], dobijena prostorna raspodela za *SAR* za 1g je od interesa u sagledavanju netermičkih i ostalih bioloških efekata [17].

Metod koji se danas najčešće upotrebljava u numeričkoj simulaciji elektromagnetnih problema u oblasti dozimetrije na biološkim subjektima je FDTD [18, 19]. Primena metoda na model glave je u okviru standardne procedure primene metode. Ova tehnika zahteva diskretizaciju prostora, postavljanje korektnog modela glave, dodeljujući svakom elementu modela odgovarajuće elektromagnetske osobine, što nije jednostavan proces [7, 20, 21, 15].

Za dobijanje numeričkih rezultata izračunavanja apsorpcije EM zračenja mobilnog telefona u glavi čoveka neophodno je definisati:

- model izvora (mobilnog telefona) sa karakteristikama zračenja antena, slika 2,
- model glave čoveka sa realnim karakteristikama tkiva i pod uslovima realne upotrebe, slika **Error! Bookmark not defined.**,
- model prostiranja talasa u poluprovodnoj sredini, tj. izbor numeričke simulacione metode (FDM, MoM, FDTD, FIT,...).

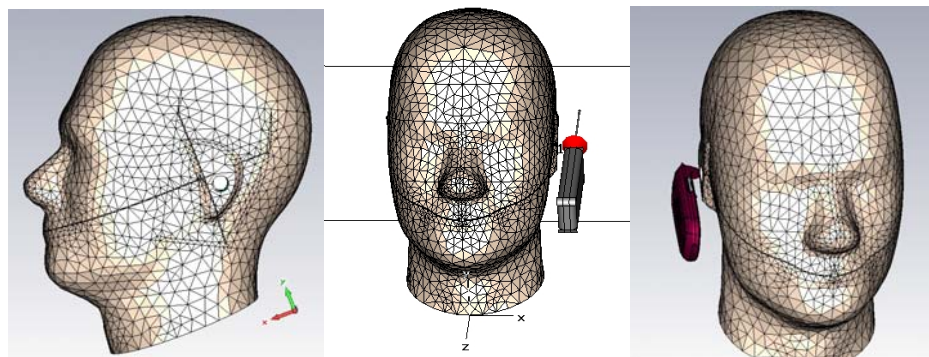
U radu [4] korišćenjem numeričkih metoda vršena je simulacija dejstva mobilnih telefona u oblasti glave, a kao izvori su korišćena tri tipa mobilnih telefona koji se najčešće nalaze u prameni (slika 2): sa kućištem od monobloka i klasičnim četvrt-

talasnim dipolom koji je smešten na vrhu aparata mobilnog telefona (TM1), sa kućištem koje se preklapa i PIF antenom (TM2) i sa kućištem od monobloka i PIF antenom (TM3).

Numerički model ljudske glave se bazira na anatomskim dimenzijama glave čoveka i podacima na osnovu slika glave koji su dobijeni postupkom magnetne rezonance (MR). Za proračun apsorbovane elektromagnetne energije u glavi čoveka formirana su dva modela glave: bez ušnog kanala (GM1) i sa ušnim kanalom (GM2). Oba su zasnovana na anatomskom modelu glave koji se sastoji od sledećih slojeva: koža, masno tkivo, mišićno tkivo, koštano tkivo i moždano tkivo [4].



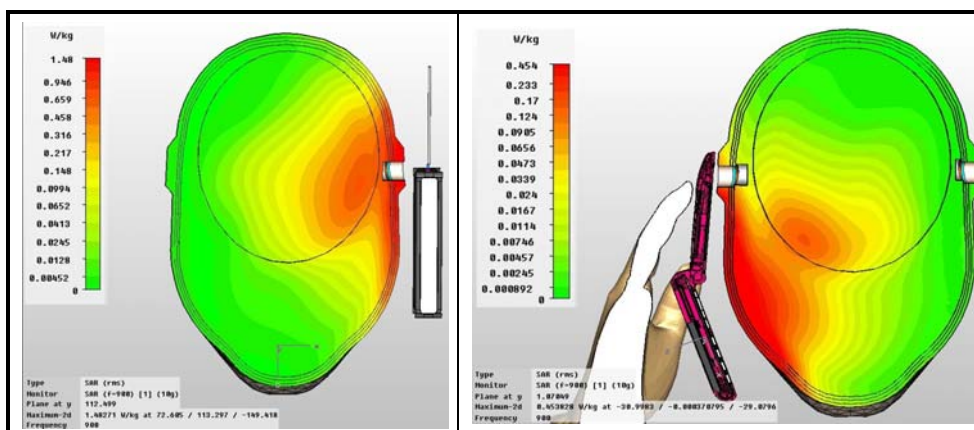
Slika 2 – a) Monoblok mobilnog telefona, b) Ugrađena PIF antena u monoblok, c) Mobilni telefon sa preklopom d) ugrađena PIF antena u deo telefona sa preklopom [4]



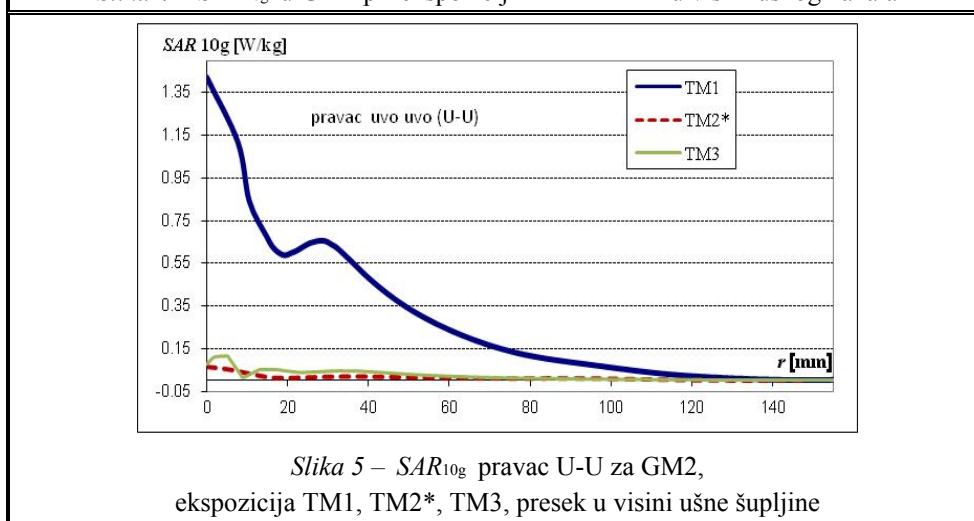
Slika 3 –Modeli glave sa izvorima u relanim položajima pri upotrebi [4]

Dimenzije paralelepipeda opisanog oko modela su 256x166x260 mm (slika 3). Koža, masno i mišićno tkivo su modelirani kao slojevi koji naležu jedan na drugi, sa debljinama od po 2 mm. Mozak je modeliran kao rotacioni elipsoid dimenzija 174x145x170. Model 2 (GM2) sadrži ušni kanal dužine 25 mm i prečnika 7 mm, dok su ostali parametri isti kao i u modelu 1 (GM1). Primenom FIT tehnike [22,23] i korišćenjem softverskog paketa CST -Studio Suite, formiran je numerički model za proračunavanje komponenti elektromagnetnog polja. Kao izvor je korišćen model mobilnog telefona karakteristika:  $P = 0.5W$ ,  $Z = 50\Omega$  i  $f = 900MHz$ , sa  $\lambda/4$  monopol antenom. Dobijeni su rezultati za jačinu električnog polja  $E$ , jačinu magnetnog

polja  $H$ , gustinu indukovane struje  $J$ , zapreminsku gustinu energije lokalizovane u električnom polju  $w_e$ , zapreminsku gustinu energije lokalizovane u magnetnom polju  $w_m$ , jačinu *Pointingovog* vektora, gustinu apsorbovane snage i  $SAR$  normalizovan na 1g i 10 g telesne mase. Na slici 4 je prikazana raspodela  $SAR_{10g}$  u anatomski savršenijem modelu glave (GM2) pri ekspoziciji oba modela telefona.



Slika 4 -  $SAR_{10g}$  u GM2 pri ekspoziciji TM1 i TM2\* u visini ušnog kanala

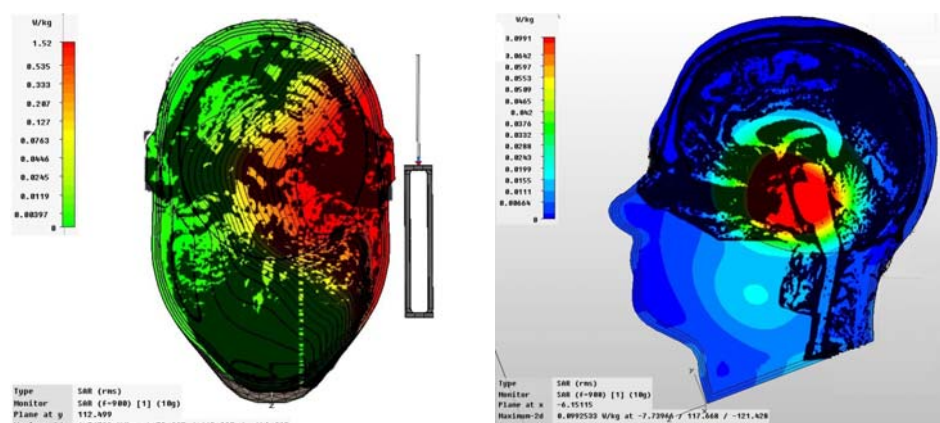


Slika 5 –  $SAR_{10g}$  pravac U-U za GM2, ekspozicija TM1, TM2\*, TM3, presek u visini ušne šupljine

Upoređenje vrednosti  $SAR$  je na grafiku na slici 5 ukazuje na manje apsorbovane vrednosti polja i energije pri korišćenju telefona sa PIF antenom koje ima veće usmerenje u pravcu od glave. Međutim, kod izvodjenja zaključaka treba voditi računa o položaju antene bazne stanice sa kojom korisnik (aparatus mobilnog telefona) komunicira, kao i o mogućnosti adaptivnog pojačanja izlazne snage mobilnog telefona.

Moguće biološke efekte zračenja treba tražiti povezivanjem maksimalnih vrednosti za lokalni  $SAR$  ( $SAR_{10g}$  i  $SAR_{1g}$ ) sa položajem centara u mozgu. To se može učiniti povezivanjem prikazanih grafika za  $SAR$  i slika MRI. Ovakvom lokalizacijom se mogu analizirati, na primer, vrednosti za  $SAR$  u pinealnoj žlezdi koja je vrlo osetljiva na EM zračenja i ima izuzetnu biološku ulogu.

Na slici **Error! Bookmark not defined.** je prikazano grafičko povezivanje izračunatog  $SAR$  i MRI slika glave, i ovakav oblik je ono što može biti dostupno lekarima kao dobar alat za analizu. Na ovaj način se postiže nova dimenzija u multidisciplinarnosti istraživanja biološkog uticaja elektromagnetnog zračenja reda GHz na biološka tkiva.



Slika 6 –  $SAR_{10g}$  sa realnom strukturom mozga generisanom MR, za TM1 u GM2, dva različita poprečna preseka

Simulacija prodrlog elektromagnetnog polja korišćenjem numeričkih tehnika predstavlja samo jedan aspekt obimnih istraživanja koja se sprovode poslednjih godina u cilju procene bioloških efekata EM zračenja koje potiče od bežičnih komunikacionih sistema i procene rizika po ljudsko zdravlje. Epidemiološka, in vivo i in vitro istraživanja treba da daju dodatne odgovore na pitanja u vezi efekata do kojih dovodi izlaganje visokofrekventnim EM poljima. Primera radi, eksperimentalna biomedicinska istraživanja na opitnim životinjama, obavljena na Medicinskom fakultetu u Nišu pri sličnim uslovima ekspozicije kao u opisanim primerima analize prodrlog EM polja numerickim tehnikama pokazala su da je izlaganje zračenju mobilnih telefona dovelo do promena u tkivu mozga, poremećaja metaboličkog statusa, promena u ponašanju itd., [5, 26].

## 6. Zaključak

Numeričke metode uspešno se mogu primeniti na složene probleme analize EM polja u ljudskom telu, koje predstavlja veoma nehomogenu sredinu. Modelovanje i simulacija prodrlog EM polja u području glave čoveka posebno su od interesa, s obzirom na blizinu izvora zračenja kada su u pitanju mobilni telefoni. Pri tome, od velikog



značaja je sačiniti model glave sa realnim karakteristikama tkiva i pod uslovima realne upotrebe mobilnog aparata, kao i odabrati pogodnu numeričku simulacionu metodu.

U radu su kao ilustrativni primer prikazani rezultati simulacije kada su kao izvori korišćeni različiti tipovi mobilnih telefona, a primenjena je FIT numerička tehnika. Modeli su bazirani na anatomskim dimenzijama glave čoveka i realističnom predstavljanju tkiva, a ujedno su korišćeni i podaci na osnovu slika glave dobijenih postupkom magnetne rezonance.

Rezultati primene numeričkih metoda za modelovanje prodrlih EM polja omogućavaju procenu mogućih bioloških efekata imajući u vidu položaj važnih centara u organizmu, a posebno u glavi čoveka. Ove metode su deo interdisciplinarnih istraživanja usmerenih ka proceni rizika od zračenja savremenih bežičnih komunikacionih sistema, a posebno mobilnih telefona, po ljudsko zdravlje.

## Literatura

- [1] B. Hartmut, „Computation of Electromagnetic Fields using Integral Methods,“ *International PhD-seminar Computation of Electromagnetic Fields*, Budva / Serbia & Montenegro, 23-28 September 2004.
- [2] L. Ragma, „Numerical Methods for Bio-electromagnetic Computation: A General Perspective,“ *Proceedings of SPIT-IEEE Colloquium and International Conference*, Mumbai, India, vol2, N94.
- [3] F. Gustrau, D. Manteuffel, *EM Modeling of Antennas and RF Components for Wireless Communication systems*. Springer, 2006.
- [4] Dejan Krstić, Uticaj elektromagnetnih zračenja reda GHz na biološko tkivo, doktorska disertacija, Fakultet zaštite na radu u Nišu, april 2010
- [5] D. Krstić, D. Petković, V. Stanković, S. Ilić, V. Marković, S. Aleksić, „Proračun elektromagnetnih polja industrijskih učestanosti prodrlih u ljudsko telo – prilog izradi nacionalnih standarda iz oblasti EMC,“ *Zbornik radova – ELECTRA IV*, pp. 324-329, Tara, 11-15. septembar 2006.
- [6] U.S. National Library of Medicine, National Institute of Health, „The Visible Human Project,“ [http://www.nlm.nih.gov/research/visible/visible\\_human.html](http://www.nlm.nih.gov/research/visible/visible_human.html), July 2005.
- [7] M. Okoniewski, M. A. Stuchly, „A Study of the Handset Antenna and Human Body Interaction,“ *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 44, No. 10, pp. 1865-1873, 1996.
- [8] V. Hombach, et al, „The Dependence of EM Energy Absorption Upon Human Head Modeling at 900 MHz,“ *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 44, No. 10, pp. 1865-1873, 1996.
- [9] Wiart, et al, „Children Head RF Exposure Analysis,“ *Proc. Joint Meeting of Bioelectromagnetics Society and the European Bioelectromagnetics Association*, (CD-ROM), Dublin, Ireland, June 19-24, 2005, 12-8, pp. 146-147.
- [10] CENELEC, „Consideration for Evaluation of Human Exposure to Electromagnetic Fields (EMF's) from Mobile Telecommunication Equipment (MTE) in the Frequency Range 30 MHz-6 GHz,“ *CENELEC Standard ES 59005*. Oct. 1998.
- [11] IEEE, „Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio frequency Electromagnetic fields,“ *IEEE Standard C 95*. 1-1991, 1999
- [12] M. Jensen, Y. Rahmat-Samii, „EM interaction of handset antennas and a human in personal communications,“
- [13] O. Gandhi, J. Chen, D. Wu, „Electromagnetic absorption in the human head for mobile telephones at 835 and 1900 MHz. „, in *Proc. Int. EMC Symp.* Rome, Italy, pp. 1-5, Sept. 1994.

- [14] P. Demers, D. Thomas, K. Rosenblatt, L. Jimenez, A. McTiernan, H. Stalsberg, A. Stemhagen, W. Thompson, M. Curnen, W. Satariano, Occupational exposure to electromagnetic fields and breast cancer in men. *Am J Epidemiol*; 134(4):340-7, 1991.
- [15] A. Watanabe, M. Taki, T. Nojima, O. Fujiwara, „Characteristics of the SAR distributions in a head exposed to electromagnetic field radiated by a hand-held portable radio,“ *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* vol. 44, pp. 1874-1883, Oct. 1996.
- [16] A. Schiavoni, G. Richiardi, P. Bielli, „SAR evaluation into an anatomically based model of the human head generated by different types of cellular phones,“ in *EMC'96*, Rome, Italy, pp. 182-187, Sept. 1996.
- [17] C. Kuster, Q. Balzano, C. Lin, Eds, „Mobile Communication Safety,“ ser. *Telecommunications Technology and Applications*. London, U. K. : Chapman & Hall, 1996
- [18] K. Kunz, R. Luebbers. *The Finite Difference Time Domain Method for Electromagnetic*. Boca Raton, FL: CRC Press, 1993.
- [19] A. Taflov, „Computational Electrodynamics - The Finite Difference Time Domain Method. Norwood, MA: Artech House, 1995.
- [20] O. Gandhi, G. Lazzi, C. Furse, „Electromagnetic absorption in the human head and neck for mobile telephones at 835 and 1900 Mhz,“ *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 44, pp. 1884-1897, Oct. 1996.
- [21] O. Gandhi, G. Lazzi, G. Tinniswood, G. Yu, „Comparison of numerical and experimental methods for determination of SAR and radiation patterns of hand-held wireless telephones“ *Bioelectromagnetics*. vol. 20, pp. 93-101, 1999
- [22] T. Weiland, „A discretization method for the solution of Maxwell's equations for six-component fields,“ *Electronics and Communication (AEC)*, vol. 31, p. 116, 1977.
- [23] A. Bayliss, E. Turkel, „Radiation boundary conditions for wave-like equations,“ *Comm. Pure Appl. Math*, vol. 33, pp. 707-725, 1980.
- [24] A. Balmori, Possible Effects of Electromagnetic Fields from Phone Masts on a Population of White Stork (*Ciconia ciconia*), *Electromagnetic Biology and Medicine*, 24: 109–119, 2005.
- [25] D. Krstić, D. Zigar, D. Petković, „Modeliranje apsorpcije zračenja mobilnog telefona u glavi čoveka,“ *Biološki efekti veštačkih elektromagnetnih polja - Prvi simpozijum sa međunarodnim učesćem*, No 21. 1, str 5, Novi Sad, 29-30. 05. 2009.
- [26] D. Sokolović, „Melatonin kao modulator efekata mikrotalasnog zračenja na metabolizam arginina i poliamina,“ *Doctoral dissertations*, Nis, 2008.

**Zahvalnica:** Rad je podržan od strane Ministarstva prosvete i nauke Republike Srbije u okviru projekta III43012.

**Abstract:** *Most important methods for numerical modeling of EM fields are presented in this paper. The focus is on modeling of EM fields of wireless communication systems, particularly of mobile telephony, which affect the human body. The simulation of EM field distribution within the head under the exposition of mobile phones of different kind, is presented and discussed.*

**Keywords:** *modeling, EM field, numerical methods, mobile communications*

## **MODELING OF PENETRATED EM FIELDS OF COMMUNICATION SYSTEMS AND THEIR BIOLOGICAL EFFECTS**

Vera Marković, Dejan Krstić, Darko Zigar, Dejan Petković