

Pregledni rad

IZLOŽENOST LJUDI NEIONIZIRAJUĆIM ELEKTROMAGNETSKIM POLJIMA OD EKSTREMNO NISKIH DO MIKROVALNIH FREKVENCIJA

Dragan POLJAK

Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Splitu, Split, Hrvatska

Primljeno u srpnju 2010.

Prihvaćeno u kolovozu 2010.

U radu se razmatra izloženost čovjeka elektromagnetskim poljima od ekstremno niskih do mikrovalnih frekvencija. Ljudsko tijelo predstavljeno je realističnim računalnim modelima u smislu geometrije i električnih svojstava organa. Modeli na niskim frekvencijama temelje se na kvazistatičkim aproksimacijama, Laplaceovoj jednadžbi i numeričkome modeliranju primjenom metode rubnih elemenata. Modeli na visokim frekvencijama zasnovani su na cjelovitom elektromagnetskome modelu i odgovarajućoj Helmholtzovoj jednadžbi. U radu se razmatraju primjeri vezani za izloženost glave čovjeka elektrostatskom polju monitora, izloženost trudnice i fetusa poljima niskih frekvencija te izloženost oka mikrovalnim frekvencijama. Dobiveni rezultati upućuju na činjenicu da su pod nekim ekstremnim okolnostima mogući scenariji u okviru kojih karakteristični parametri polja prelaze granične vrijednosti propisane domaćom i međunarodnom legislativom. Primjerice, prilikom izloženosti trudne žene električnom polju dalekovoda, u fetusu se inducira višestruko veća gustoća struje od vrijednosti koja se inducira u mozgu trudnice. U radu su nadalje opisani mehanizmi interakcije elektromagnetskih polja s ljudskim tijelom. Nakon toga iznesene su dosadašnje spoznaje vezane za biološke učinke polja ekstremno niskih frekvencija i radio-frekvencija. Također su raspravljene zaštitne mjere vezane za međunarodne i domaće sigurnosne smjernice i granice izloženosti.

KLJUČNE RIJEČI: fetus, granice izloženosti, Helmholtzova jednadžba, Laplaceova jednadžba, računalni modeli, sigurnosne smjernice, trudnica, zaštita od zračenja

Postojanje umjetno stvorenih elektromagnetskih polja u ljudskom okolišu u neionizirajućem dijelu spektra od ekstremno niskih (reda veličine Hz) do ekstremno visokih frekvencija (do nekoliko stotina GHz) odavno su neodvojivi dio suvremenog društva uz koja se neminovno vežu brojne kontroverze i do danas neodgovorena pitanja koja se tiču potencijalnih štetnih efekata za ljude (1-10). U širokom spektru od 0 Hz do 300 GHz najvažnije je područje ekstremno niskih frekvencija (do 3 kHz) te područje mikrovalnih frekvencija. Dominantni učinak električnih i magnetskih polja niskih frekvencija su neuromišićne stimulacije, dok na visokim frekvencijama na kojima

valna duljina upadnog polja postaje komparabilna s dimenzijama ljudskog tijela ili pojedinih organa u tijelu, presudnu ulogu u biološkim učincima zbog efekta rezonancije imaju toplinski efekti.

Osnovni parametar za evaluaciju učinaka električnih i magnetskih polja niskih frekvencija je inducirana gustoća struje u tijelu čovjeka.

Na ekstremno niskim frekvencijama zanemaruju se Maxwellove pomaćne struje pa se električna i magnetska polja u pravilu razmatraju odvojeno. Čovjek tako može biti izložen djelovanju niskonaponskih sustava (kod kojih dominantno zračenje dolazi od magnetskog polja), ili pak djelovanju visokonapon-

skih sustava (kod kojih dominantno zračenje dolazi od električnog polja). Ove su činjenice vrlo bitne za izradu modela ljudskog tijela, jer su u slučaju izloženosti magnetskim poljima inducirane struje u ljudskom tijelu vrtložnog karaktera, dok su u slučaju izloženosti električnim poljima struje inducirane u tijelu aksijalne, tj. ne tvore zatvorene petlje, već završavaju na odgovarajućoj površinskoj gustoći naboja na površini tijela.

Ljudi su posebno osjetljivi na elektromagnetska polja visokih frekvencija jer tijelo apsorbira izračenu elektromagnetsku energiju i popratni toplinski učinak postaje dominantan.

Za razliku od analize na niskim frekvencijama, koja se temelji na proračunu induciranih gustoća struja u tijelu, na visokim frekvencijama je stupanj specifične apsorpcije ili specifična apsorbirana snaga (engl. *specific absorption rate*, krat. SAR) osnovni parametar za kvantificiranje toplinskih efekata zbog apsorbirane energije elektromagnetskog zračenja. Proračun SAR-a spada u područje teorijske dozimetrije koju se obično naziva dozimetrijom unutarnjeg polja (engl. *internal field dosimetry*). Analiza izloženosti ljudi poljima visokih frekvencija odnosi se na čitavo tijelo samo ako se čovjek nalazi dovoljno daleko od izvora zračenja, tj. u daljinskom polju, primjerice u zračenom polju bazne stanice. U ovom slučaju mogu se rabiti pojednostavnjeni modeli ljudskog tijela poput paralelepipeda ili cilindra. S druge strane, u situaciji kad se čovjek nalazi u bliskom polju izvora zračenja, primjerice u polju mobilnog telefona, analizira se dio tijela koji je neposredno izložen zračenju (glava, mozak, oko).

Mjere zaštite uglavnom se odnose na administrativne kontrole, medicinski nadzor te kao fundamentalni korak, smanjenje nivoa zračenja odnosno svođenje emisije polja na prihvatljive nivoe. Međunarodna i domaća regulativa za zaštitu od elektromagnetskih polja razmatra zasebno radnu populaciju te onu koja se u startu smatra vulnerabilnijom – opću populaciju (starci, djeca, bolesnici, trudnice).

U ovom radu prvo se razmatraju postupci elektromagnetske dozimetrije unutarnjeg polja, koji se svode na računalne simulacije gustoće struje, specifičnu gustoću apsorbirane snage i porast temperature u tijelu zbog izloženosti čovjeka vanjskim izvorima niskih, odnosno visokih frekvencija. Podaci o vanjskom polju dobivaju se primjenom teorijskih i/ili eksperimentalnih metoda dozimetrije upadnog polja koje u biti spadaju u područje klasične elektrokinematike i općenito nisu vezane za problematiku izloženosti ljudi elektromag-

netskim poljima. Stoga se u ovom radu problematika dozimetrije upadnog polja neće posebno razmatrati. Poznavanje vanjskog polja kojemu je čovjek izložen u smislu ulaznih parametara omogućava dozimetriju unutarnjeg polja, odnosno određivanje elektromagnetskih veličina induciranih u čovjeku.

U ovom radu izneseni su primjeri računalnih simulacija interakcije neionizirajućih polja i ljudi koji se odnose na izloženost elektrostatskom polju monitora, izloženost trudnice električnom polju dalekovoda i izloženost oka polju ravnog vala.

U nastavku rada izneseni su mehanizmi sprege elektromagnetskog polja na niskim i visokim frekvencijama i ljudskog tijela te, do danas ustanovljeni, pripadni biološki učinci. Konačno, u radu su obrađene i zaštitne smjernice dostupne u međunarodnoj i domaćoj legislativi.

ELEKTROMAGNETSKA DOZIMETRIJA

Osnovni koncepti međudjelovanja makroskopskih elektromagnetskih polja s materijalima postavljeni su još u devetnaestom stoljeću u obliku skupa Maxwellovih jednadžbi. S druge strane, primjena ovih temeljnih zakona elektromagnetizma na žive sustave iznimno je teška zadaća s obzirom na složenost i višestruke nivoe organizacije bioloških sustava.

Budući da eksperimentiranje na ljudima u režimu visokih doza ozračenosti ili dugotrajne izloženosti elektromagnetskim poljima nisu mogući, eksperimenti se provode jedino na fantomima i životinjama. Od teorijskih pak modela i sofisticiranih računalnih simulacija očekuje se da što vjernije interpretiraju i potvrde eksperiment, ali i omogućće razvoj ekstrapolacijskih postupaka i na taj način uspostave sigurnosne smjernice i granice ozračenosti za ljudska bića.

S obzirom na karakter analize, dozimetriju možemo podijeliti na teorijsku i eksperimentalnu, a s obzirom na frekvencijsko područje na niskofrekvencijsku i visokofrekvencijsku. Ovisno o tome određuju li se vanjska polja generirana nekim izvorom zračenja ili polja inducirana unutar ljudskog tijela, dozimetriju dijelimo na dozimetriju vanjskog, odnosno unutarnjeg polja.

Iznimna matematička kompleksnost ove problematike još prije nekoliko desetljeća u ranoj fazi razvoja digitalnih računala diktirala je primjenu kanonskih modela, tj. geometrija s visokim stupnjem simetrije poput cilindra, elipsoida, diskova i raznih sfernih konfiguracija. Ograničenja ovakvih, prepojednostav-

njenih modela uglavnom su vezana za nedovoljnu preciznost rezultata i relativno malen broj scenarija koji se mogu smatrati realističnima. Na današnjem stadiju razvoja računala uglavnom se rabe sofisticiranije numeričke metode analize interakcije ljudskog tijela s elektromagnetskim poljima u smislu proračuna induciranih gustoća struja i polja unutar ljudskog tijela. Za tretiranje realističnih, anatomski vjernih modela ljudskog tijela najviše se koriste metoda konačnih diferencija, metoda konačnih elemenata i metoda rubnih elemenata. Ove numeričke metode omogućavaju precizno modeliranje kako složene geometrije ljudskog tijela tako i heterogenost njegovih električnih svojstava.

Najzastupljenija metoda u ovim istraživanjima zasigurno je metoda konačnih diferencija u vremenskom području (engl. *Finite Difference Time Domain* - FDTD) (11-15) nešto manje se rabi metoda konačnih elemenata (engl. *Finite Element Method* - FEM) (16), a svoju promociju u bioelektromagnetizmu praktički tek doživljava metoda rubnih elemenata (engl. *Boundary Element Method* - BEM) (17-21).

Metoda rubnih elemenata dosta je sofisticiranija tehnika od široko rabljene metode konačnih diferencija, a s druge strane smatra se računalno ipak manje zahtjevnom nego što je to metoda konačnih elemenata, jer je nužno diskretizirati jedino granicu područja, odnosno potpodručja, ovisno o tome da li se radi o homogenom ili nehomogenom području proračuna.

U nastavku su dani računalni primjeri dozimetrije unutarnjeg polja, a kratak opis metode rubnih elemenata i metode konačnih elemenata dostupan je u odgovarajućim dodacima ovom radu.

Sasvim općenito gledano, inducirane struje i polja u ljudskom tijelu uzrokuju toplinske i netoplinke učinke. Kad je čovjek izložen poljima niskih frekvencija, toplinski su efekti zanemarivi, a mogući netoplinke efekti odnose se na stanični nivo. Poznavanje gustoće struje inducirane u tijelu temelj je za razumijevanje interakcije ljudskog tijela s poljima niskih frekvencija.

Gustoća struje unutar tijela može se inducirati zbog vanjskih električnih, odnosno magnetskih polja. Unutarnje gustoće struja zbog vanjskih električnih polja aksijalnog su karaktera, dok inducirane gustoće struja zbog vanjskoga magnetskog polja formiraju zatvorene petlje u tijelu.

Unutarnja gustoća struje J zbog vanjskoga narinutog električnog polja definirana je preko Ohmova zakona u njegovoj diferencijalnoj formi:

$$J = \sigma E \quad [1]$$

gdje je σ vodljivost tkiva, a E jakost odgovarajućeg električnog polja.

S druge strane, gustoća struje koja se inducira u ljudskom tijelu zbog vanjskoga narinutog magnetskog polja tvori zatvorene petlje i daje se odrediti primjenom relacije (8-9):

$$J = \sigma \pi r f B \quad [2]$$

gdje je B iznos magnetske indukcije okomite na tijelo, f je dana frekvencija, a r radijus kružne petlje.

Što se pak tiče visokofrekvencijskoga bioelektromagnetizma, ključno pitanje svodi se na određivanje iznosa apsorbirane elektromagnetske energije u tijelu i njezine distribucije unutar tijela.

Temeljna dozimetrijska veličina na visokim frekvencijama jest specifična gustoća apsorbirane snage ili stupanj specifične apsorpcije koji predstavlja po masi usrednjenu snagu disipiranu u biološkom tkivu (8):

$$SAR = \frac{dP}{dm} = \frac{d}{dm} \frac{dW}{dt} = C \frac{dT}{dt} \quad [3]$$

gdje je C specifični toplinski kapacitet tkiva, T je temperatura, a t je vrijeme.

Izraz [3] je definicija SAR-a koja proizlazi iz toplinskog učinka, odnosno posljedice zbog zračenja.

S druge strane, ako se promatra uzrok porasta temperature u obliku unutarnjeg električnog polja, SAR je u tkivu proporcionalan kvadratu unutarnjeg električnog polja (8):

$$SAR = \frac{dP}{dm} = \frac{dP}{\rho dV} = \frac{\sigma}{\rho} |E|^2 \quad [4]$$

gdje je E efektivna vrijednost električnog polja, ρ je gustoća tkiva, a σ je vodljivost tkiva.

Dakle, SAR je direktno proporcionalan unutarnjem polju pa se onda glavna zadaća dozimetrije na visokim frekvencijama svodi na određivanje raspodjele električnog polja unutar tijela.

Raspodjela SAR-a uglavnom se određuje primjenom računalnih modela ili se na neki način procjenjuje iz mjerenja u laboratorijima. Općenito, iznos SAR-a ovisi o parametrima upadnog polja, karakteristikama tijela te apsorpcijskim i refleksijskim svojstvima okoliša. U pravilu do induciranja maksimalnog SAR-a u čitavom tijelu dolazi ako je vanjsko električno polje paralelno s ljudskim tijelom.

Dakle, analiza izloženosti ljudi zračenju elektromagnetskim poljima od ekstremno niskih do mikrovalnih frekvencija implicira primjenu

realističnih modela uz implementaciju suvremenih numeričkih metoda.

Primjeri simulacija na računalu

U radu su dani primjeri računalnih simulacija izloženosti glave čovjeka elektrostatskom polju monitora, izloženosti trudnice električnom polju dalekovoda te je iznesena elektromagnetsko-toplinska dozimetrija oka za slučaj izloženosti čovjeka zračenju ravnog vala. Rezultati dobiveni u ovom radu u skladu su s rezultatima dobivenim različitim metodama i objavljenim u drugim publikacijama, primjerice (14, 16, 22).

Izloženost elektrostatskom polju videoterminala

Izloženost ljudi elektrostatskom polju monitora još nije dovoljno istražena niti potpunosti razjašnjena. Štoviše, ni pitanje graničnih vrijednosti izlaganja nije zadovoljavajuće riješeno.

Uz zanemarenje gustoće naboja u prostoru između glave čovjeka i monitora, matematički model trodimenzionalnog elektrostatskog polja između videojedinice i ljudske glave zasniva se na Laplaceovoj jednačini za skalarni električni potencijal φ (23):

$$\nabla^2 \varphi = 0 \quad [5]$$

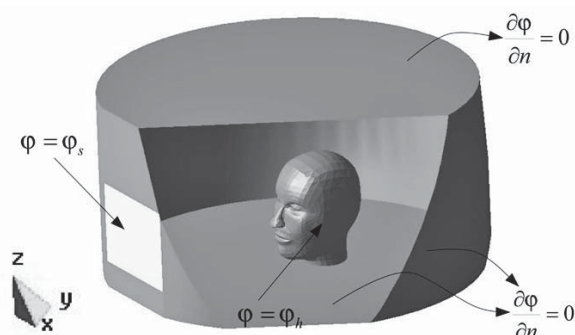
uz pridružene rubne uvjete:

$$\varphi = \varphi_s, \text{ na ekranu monitora,} \quad [6]$$

$$\varphi = \varphi_h, \text{ na glavi,} \quad [7]$$

$$\nabla\varphi \cdot n = 0, \text{ na bočnim granicama.} \quad [8]$$

Važno je napomenuti da se glava smatra ekvipotencijalnom površinom na potencijalu φ_h . Područje proračuna s pripadnim rubnim uvjetima prikazano je na slici 1.

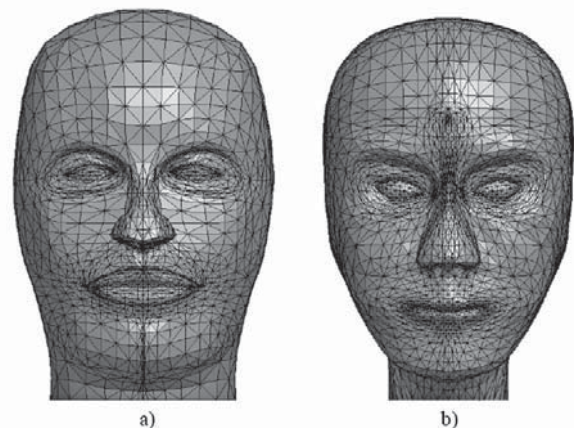


Slika 1 Trodimenzionalni model ljudske glave ispred monitora

Izložena formulacija uključuje parametre l_s , d_s , φ_s i φ_h , koji predstavljaju udaljenost između ekrana i nosa,

dijagonalu ekrana, elektrostatski potencijal ekrana i konačno potencijal glave. Vrijednosti parametara su: $l_s = 40$ cm, $d_s = 17$ in, $\varphi_s = 15$ kV i $\varphi_h = 0$ kV. Pretpostavka je da se radi o monitoru formata 4:3, s duljinom ekrana 34,3 cm i visinom 25,7 cm. Također, radijus područja proračuna prikazanog na slici 1 je oko 1 m, uz visinu od oko 0,6 m. Dimenzije glave su (21 cm x 16,5 cm) (23).

Vrijedi napomenuti da se pretpostavlja da su obrve na istom potencijalu kao i lice. Ostali parametri, poput temperature, vlage i vodljivosti ekrana ne uzimaju se u obzir u svrhu pojednostavljenja modela. Ipak, treba naglasiti da je vlažnost zraka vrlo važan faktor, a u ovim proračunima uzima se jako niska vrijednost, odnosno suhi zrak. Razmatraju se dvije tipične geometrije glave (žena europskog i azijskog podrijetla) u svrhu potpunije analize utjecaja geometrije lica, kako je prikazano na slici 2.



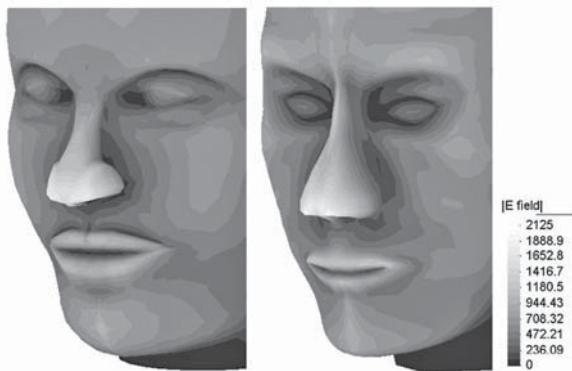
Slika 2 Mreža rubnih elemenata za različite modele glave a) europski tip glave - osoba 1, b) azijski tip glave - osoba 2

Dobiveni rezultati za jakost polja razlikuju se u ova dva slučaja, tj. maksimalna vrijednost polja na nosu osobe 1 iznosi 1760 V cm^{-1} , odnosno 176 kV m^{-1} i niža je od vrijednosti polja koja se inducira na nosu osobe 2, a iznosi 2125 V cm^{-1} , odnosno $212,5 \text{ kV m}^{-1}$. Ova razlika očito je uvjetovana razlikama u obliku lica, pogotovo u obliku nosa. Za ostatak površine lica ova razlika nije toliko značajna (slika 3).

Iz slike je također vidljivo da je jakost polja oko očiju relativno niska u odnosu na ostale dijelove lica te iznosi između 400 V cm^{-1} i 500 V cm^{-1} .

Izloženost trudnice električnom polju dalekovoda

Među ugroženim skupinama opće populacije od posebnog su interesa sasvim sigurno trudnice. Izloženost trudnice elektromagnetskim poljima nis-



Slika 3 Jakost električnog polja na licu osobe 1 i osobe 2

kih frekvencija otvoreno je polje istraživanja koje zahtijeva posebnu pozornost u svjetlu potencijalnih zdravstvenih implikacija za majku i fetus.

Numeričko modeliranje gotovo je jedini pristup za određivanje induciranih struja i polja unutar tijela trudne žene. S druge strane, postoje dva važna faktora koja znatno otežavaju dozimetriju unutar fetusa i trudne žene; prikupljanje podataka o električnim svojstvima fetusa i okolnih tkiva koji su u literaturi jako rijetki i vrlo raspršeni te činjenica da je iznimno teško, gotovo nemoguće skupiti *in vivo* mjerenja u okviru realističnih scenarija. Posebno otegotni aspekt pri ovakvoj analizi su izrazito složene i komplicirane promjene geometrije i fizikalnih svojstava tijela žene iz tjedna u tjedan za vrijeme perioda trudnoće. Štoviše, numeričko modeliranje ima u ovakvoj analizi krucijalno značenje.

U ovom radu prikazana je primjena metode rubnih elemenata u analizi izloženosti trudnice električnom polju visokonaponskih dalekovoda, odnosno provodi se procjena električnih polja i gustoća struja induciranih u fetusu za različite scenarije vodljivosti, razmatrajući pri tome i različit položaj fetusa unutar maternice.

Različite faze trudnoće relevantne za modeliranje odnose se na varijaciju geometrije trudnice i električnih svojstava tkiva za vrijeme trudnoće. Matematički model zasniva se na kvazistatičkoj aproksimaciji i pripadnoj Laplaceovoj jednažbi. Polazeći od jednažbe kontinuiteta u diferencijalnoj formi:

$$\nabla \vec{J} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad [9]$$

gdje predstavlja gustoću struje, a ρ volumnu gustoću naboja koji se dadu izraziti preko skalarnog potencijala φ , za slučaj vremenski harmonijskih ovisnosti veličina

od interesa, na ekstremno niskim frekvencijama, dobiva se Laplaceova jednažba oblika (19-21):

$$\nabla[(\sigma + j\omega\epsilon)\nabla\varphi] = 0 \quad [10]$$

gdje je $\omega = 2\pi f$ kružna frekvencija, σ predstavlja vodljivost, a ϵ odgovarajuću permitivnost sredine.

Nadalje, na ekstremno niskim frekvencijama dielektrična svojstva tijela mogu se zanemariti, odnosno svi se organi smatraju dobrim vodičima. Laplaceova jednažba [10] daje se riješiti uz poznavanje odgovarajućih uvjeta na granici područja i uvjeta na prijelazu između dvije električki različite sredine unutar tijela.

Uvjet za tangencijalne komponente električnog polja u okolini granice dviju sredina, ako se električna polja izraze preko potencijala, daje se napisati u obliku (19-21):

$$\vec{n} \times (\nabla\varphi_b - \nabla\varphi_a) = 0 \quad [11]$$

gdje \vec{n} označava jedinični vektor vanjske normale na površinu, dok veličine φ_a i φ_b predstavljaju potencijal u zraku, odnosno u ljudskom tijelu.

Uvjet na granici za normalnu komponentu inducirane gustoće struje tik uz granicu tijelo-zrak dan je relacijom (19-21):

$$\sigma_b \vec{n} \nabla\varphi_b = -j\omega\rho_s \quad [12]$$

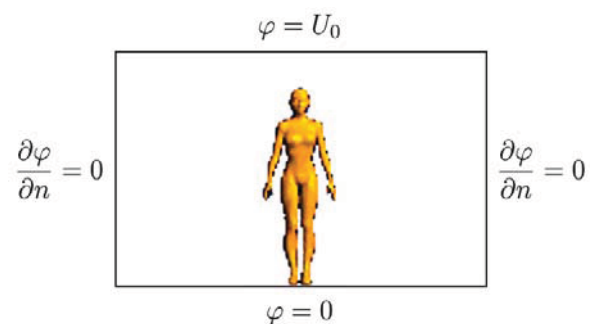
gdje je ρ_s površinska gustoća naboja, σ_b odgovarajuća vodljivost tkiva, a φ_b je skalarni potencijal na površini tijela.

Uvjet za normalnu komponentu gustoće električnog toka tik uz granicu zrak-tijelo, ako se gustoća električnog toka izrazi s pomoću skalarnog potencijala, oblika je (19-21):

$$\epsilon_0 \vec{n} \nabla\varphi_a = \rho_s \quad [13]$$

gdje je φ_a potencijal u zraku tik uz površinu tijela.

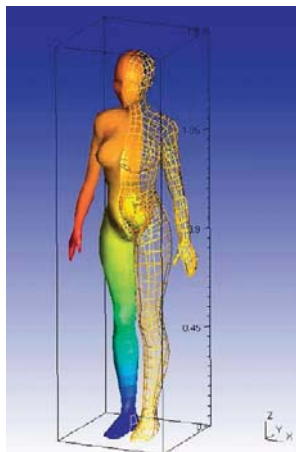
Područje proračuna s pripadnim rubnim uvjetima prikazano je na slici 4.



Slika 4 Trodimenzionalni model trudnice s pripadnim rubnim uvjetima

Tijelo je postavljeno između paralelnih elektroda u obliku kružnih ploča, u centru donje ploče koja je na nultom potencijalu, dok se gornja ploča nalazi na odgovarajućem potencijalu visokonaponske prijenosne linije.

Realistične modele ljudskog tijela, zasnovane na anatomskim karakteristikama tijela, autori su postupno razvijali kroz duži period (17-21, 23, 24). Model trudne žene prikazan je na slici 5 (21).

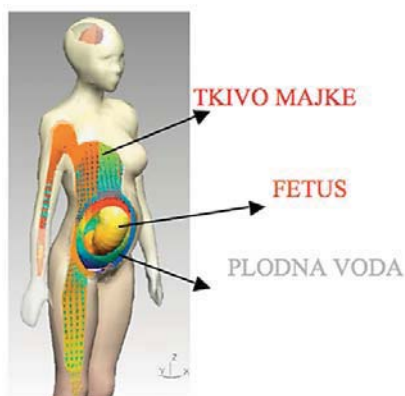


Slika 5 Anatomski zasnovani model trudne žene

U periodu razvoja embrija (od 3. do 8. tjedna trudnoće) izloženost embrija agensima poput vanjskih elektromagnetskih polja može biti uzrokom velikih kongenitalnih malformacija. Za vrijeme fetalnog perioda nastupaju rast, razvoj i sazrijevanje struktura koje su se već formirale u periodu embrija.

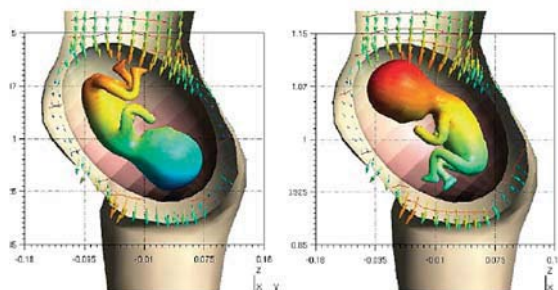
Model koji se razmatra u ovom radu odnosi se na četiri različite faze trudnoće koje vremenski odgovaraju 8., 13., 26. i 38. tjednu trudnoće.

S obzirom na električne karakteristike majčine utrobe i fetusa problem se razmatra podjelom na tri poddomene: tkivo maternice, amnionska tekućina i fetus (slika 6).



Slika 6 Potpodručja u modelu trudnice

Podaci o geometriji za model fetusa dobiveni su s pomoću CT snimaka u različitim stadijima trudnoće. Mogući položaji fetusa u utrobi majke prikazani su na slici 7.



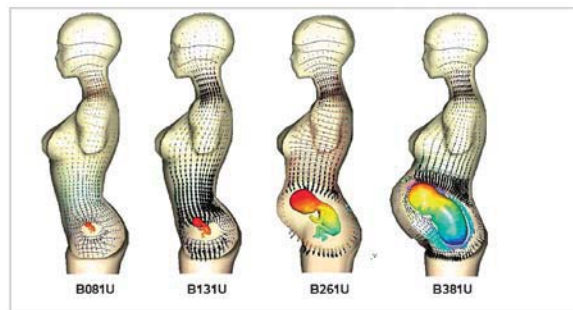
Slika 7 Položaj fetusa u majčinoj utrobi

U okviru numeričke implementacije fizikalnog modela pretpostavlja se da je tijelo trudnice dobro uzemljeno, odnosno postavljeno okomito na idealno vodljivu beskonačnu ravninu nultog potencijala što predstavlja scenarij najgorega mogućeg slučaja u otvorenom okolišu pri kojem se očekuju maksimalne struje inducirane u tijelu trudnice.

Pretpostavka je da je trudna žena izložena vertikalno polariziranom električnom polju tangencijalnom na tijelo.

U svrhu minimiziranja zahtjeva na memoriju računala rabi se teorija preslikavanja i simetrija problema (21). Jasno je vidljiv efekt uterusa koji zbog više vodljivosti u usporedbi s okolnim tkivom ima tendenciju koncentriranja linija polja.

Na slici 8 prikazane su raspodjele skalarnog potencijala i inducirane gustoće struje unutar tijela trudnice izložene vanjskom polju iznosa 10 kV m^{-1} u različitim periodima trudnoće (slika 8).



Slika 8 Raspodjela potencijala i gustoće struje: Lateralni pogled u 8., 13., 26. i 38. tjednu trudnoće

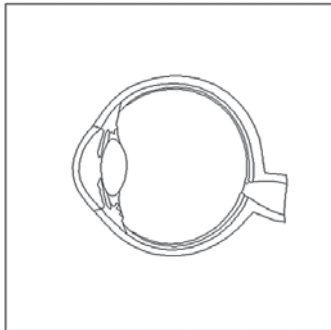
Uvidom u dobivene rezultate vidljivo je da se maksimalne vrijednosti gustoće struje javljaju u 8. tjednu trudnoće, a onda opadaju progresivno kako

se fetus razvija. Ovo opadanje dade se objasniti kao posljedica činjenice da vodljivost fetusa i amnijske tekućine opada sa starenjem, ali i tendencije fetusa da se kako raste postavi u karakterističan položaj – ekstremiteti povučeni prema centru prsa i glave okrenute prema prsima – tako da je njegova vanjska površina glađa, a površina poprečnog presjeka postaje dosta uniformnija.

Maksimalna vrijednost gustoće struje u fetusu inducira se za vrijeme 8. tjedna trudnoće te za vrijednost upadnog polja 10 kV m^{-1} iznosi oko $7,4 \text{ mA m}^{-2}$. Ova vrijednost prelazi ograničenja po ICNIRP-u (25) od 10 mA m^{-2} za profesionalnu, odnosno 2 mA m^{-2} za opću populaciju. S druge strane, inducirana struja u mozgu majke (inducirana struja u mozgu je relevantan parametar za temeljna ograničenja, prema ICNIRP-u) ne prelazi $0,5 \text{ mA m}^{-2}$.

Izloženost oka polju ravnog vala

Oko je posebno osjetljivo na izloženost poljima visokih frekvencija i na odgovarajući temperaturni porast jer je slabo prokrvljeno, odnosno nema dobru prirodnu termoregulaciju. Pojednostavnjeni model ljudskog oka prikazan je na slici 9.



Slika 9 Pojednostavnjeni model ljudskog oka

Elektromagnetsko polje unutar oka može se odrediti rješavanjem skupa parcijalnih diferencijalnih jednadžbi Helmholtzova tipa za električno i magnetsko polje (26):

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\omega\mu} \nabla \times \vec{E} \right) + (j\sigma - \omega\varepsilon) \vec{E} = 0 \quad [14]$$

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\sigma + j\omega\varepsilon} \nabla \times \vec{H} \right) + j\omega\mu \vec{H} = 0 \quad [15]$$

Ovaj oblik jednadžbi pogodan je za numeričko modeliranje kako rubnim tako i konačnim elementima.

Upadni elektromagnetski val definiran je relacijama:

$$\vec{E}_z^{inc} = \vec{e}_z E_0^{inc} e^{j\vec{k} \cdot \vec{r}} \quad [16]$$

$$\vec{H}_z^{inc} = \vec{e}_z H_0^{inc} e^{j\vec{k} \cdot \vec{r}} \quad [17]$$

Porast temperature u oku dade se izračunati rješavanjem Pennesove diferencijalne jednadžbe za prijenos topline u organskoj tvari.

Prostorno-vremenski ovisna jednadžba ravnoteže toplinske jednadžbe za prokrvljeno tkivo oblika je:

$$\nabla(\lambda \nabla T) + Q_b + Q_m + Q_{EM} = C_v \rho \frac{\partial T}{\partial t} \quad [18]$$

gdje λ predstavlja toplinsku vodljivost biološkog tkiva, Q_m je količina generirane topline u jedinici vremena po jedinici volumena kao posljedica metabolizma, a Q_{EM} količina generirane topline u jedinici vremena po jedinici volumena zbog apsorbirane elektromagnetske energije.

Ovaj član koji predstavlja gustoću vanjskih toplinskih izvora dade se izraziti relacijom:

$$Q_{EM} = \rho \cdot SAR \quad [19]$$

gdje je SAR definiran izrazom (4).

Volumna prokrvljenost tkiva može se izraziti relacijom:

$$Q_b = W_b C_{pb} (T_a - T) \quad [20]$$

gdje je T temperatura tkiva, T_a temperatura arterijske krvi, W_b [kg m⁻³] stupanj prožimanja tkiva krvlju po jedinici volumena, a C_{pb} [J °C kg⁻¹] specifični toplinski kapacitet krvi.

Stacionarna varijanta jednadžbe prijenosa topline u biološkom materijalu oblika je:

$$\nabla(\lambda \nabla T) + W_b C_{pb} (T_a - T) + Q_m + Q_{EM} = 0 \quad [21]$$

Jednadžbom [21] izražava se energijska ravnoteža između: prijenosa topline provođenjem, prijenosa topline krvotokom, količine generirane topline u jedinici vremena po jedinici volumena kao posljedice metabolizma te količine generirane topline u jedinici vremena po jedinici volumena zbog apsorbirane elektromagnetske energije.

Biotoplinska jednadžba [18], odnosno [21] dade se, za slučaj složene geometrije ljudskog tijela (ili dijela ljudskog tijela), riješiti numerički uz pripadni Neumannov rubni uvjet oblika [9], [14]-[15]:

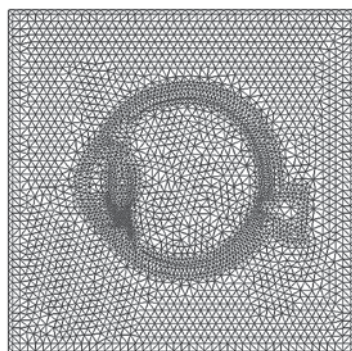
$$q_s = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = H (T_s - T_a) \quad [22]$$

pri čemu parametri H , T_s i T_a označavaju koeficijent konvekcije, temperaturu kože i temperaturu zraka.

Na slici 10 prikazana je mreža konačnih i rubnih elemenata upotrijebljena u okviru opisanoga hibridnog

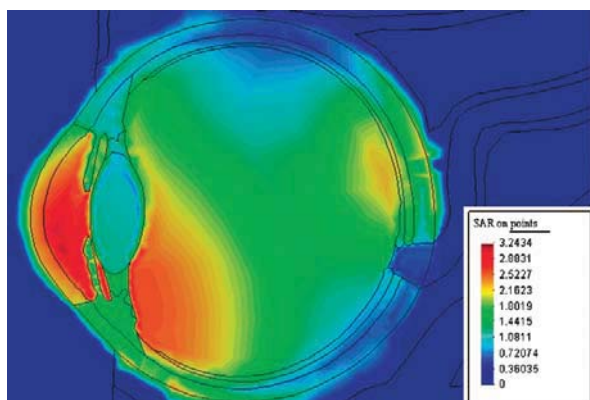
modela. Električni parametri raznih dijelova ljudskog oka dostupni su u (26).

Ovaj dvodimenzionalni model sadržava 3540 globalnih čvorova, 6898 trokutnih elemenata te 180 rubnih elemenata.



Slika 10 Mreža konačnih i rubnih elemenata

Raspodjela SAR-a unutar dvodimenzionalnog modela oka pri frekvenciji $f=1,05$ GHz i gustoći snage ravnog vala $P_d=5$ mW cm⁻², prikazana je na slici 11.



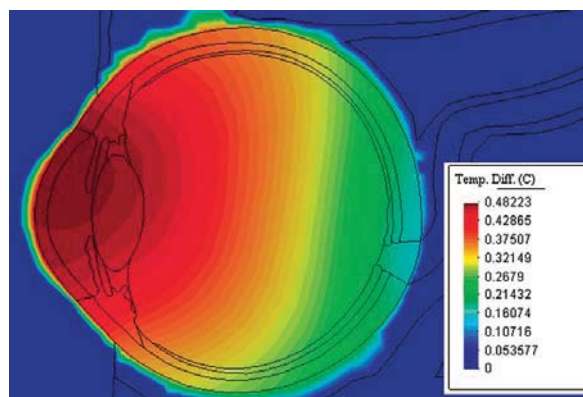
Slika 11 Raspodjela SAR-a unutar ljudskog oka za slučaj izloženosti ravnom valu TM polarizacije na frekvenciji $f=1,05$ GHz

Iz dobivenih rezultata uočljivo je da neke vrijednosti prelaze vrijednosti dopuštene međunarodnim (25, 27) i domaćim normama (28). Ovaj rezultat ipak treba uzeti s velikom rezervom kao početnu smjernicu vezanu za problematiku određivanja raspodjele SAR-a u oku, a tek razvoj trodimenzionalnog modela na kojemu se intenzivno radi može pružiti relevantnu i pouzdanu informaciju.

Na slici 12 prikazan je porast temperature u oku čovjeka zbog zračenja ravnim valom (TE polarizacija) na frekvenciji $f=0,85$ GHz i uz gustoću snage ravnog vala.

Pri tome je arterijska temperatura T_a pretpostavljena u iznosu od $T_a=37$ °C, koeficijent prijenosa topline

iznosi $h_c=20$ °C W m⁻², a temperatura okoline je sobna temperatura, odnosno $T_a=22$ °C. Ostali parametri koji se odnose na gustoće tkiva, toplinske vodljivosti i podatke o metabolizmu dostupni su u prije citiranom radu (26) (slika 12).



Slika 12 Porast temperature u oku čovjeka zbog zračenja ravnim valom (TE polarizacija) na frekvenciji $f=0,85$ GHz

Iz slike je vidljivo da za slučaj dvodimenzionalnog modela oka izračunani porast temperature iznosi nešto manje od 0,5 °C, što je iznad dopuštenih vrijednosti propisanih međunarodnim normama. Važno je istaknuti da je oko organ kod kojega postoji poseban rizik što se tiče izloženosti elektromagnetskom zračenju jer je slabo prokrvljeno i tako nema prirodnu termoregulaciju. U budućim radovima na ovom području očekuje se izrada još realističnijih modela u svrhu točnije procjene stvarnog porasta temperature u oku.

MEHANIZMI SPREGE

Interakcija elektromagnetskih polja s biološkim materijalima razmatra se primjenom mikroskopskih i makroskopskih modela. Budući da je razmatranje međudjelovanja na mikroskopskom nivou s nabojima u materijalu vrlo teško, ovaj se proces uobičajeno opisuje makroskopski preko sljedećih fenomena (8, 25): polarizacije vezanih naboja, orijentacije permanentnih električnih dipola, gibanja prostornog naboja.

U radiofrekvencijskom (RF) području organska se tvar ponaša poput otopina elektrolita koje sadržavaju polarne molekule, tj. RF polja međudjeluju sa živim organizmima putem kondukcije iona i rotacije polarnih molekula vode. Apsorbirana RF energija transformira se pri tome u kinetičku energiju molekula, što rezultira porastom temperature u ozračenom tkivu. Stoga

se zagrijavanje tkiva smatra dominantnim biološkim učinkom u području radiofrekvencija.

Općenito, postoje tri temeljna mehanizma sprege putem kojih vremenski promjenjiva elektromagnetska polja interagiraju s organskom tvari (25):

sprega s električnim poljima niskih frekvencija,
sprega s magnetskim poljima niskih frekvencija,
apsorpcija energije elektromagnetskog zračenja na visokim frekvencijama.

Sprega s električnim poljima niskih frekvencija

Međudjelovanje električnih polja niskih frekvencija s ljudskim bićima rezultira induciranjem električne struje, stvaranjem električnih dipola i reorientacijom već postojećih električnih dipola u tkivu. Intenzitet ovih efekata ovisi o jakosti električnog polja, električnim svojstvima danog tkiva, kao i o frekvenciji narinutog polja. Električno polje koje upada okomito na tijelo inducira površinski naboj na koži.

Sprega s magnetskim poljima niskih frekvencija

Magnetska polja u tijelu generiraju gustoće struja koje unutar ljudskog tijela teku u formi zatvorenih petlji. Iznosi induciranih polja i gustoća vrtložnih struja proporcionalni su radijusu petlje, vodljivosti tkiva te iznosu i brzini promjene magnetske indukcije. Staza i iznos struje inducirane u bilo kojem dijelu tijela ovisi o vodljivosti tkiva.

Apsorpcija energije elektromagnetskog zračenja

Izloženost ljudi elektromagnetskom zračenju na frekvencijama iznad 100 kHz može dovesti do značajne apsorpcije energije što uzrokuje porast temperature u tkivu. Raspodjela ove energije unutar tijela je nejednolika, a moguće ju je odrediti primjenom sofisticiranih dozimetrijskih proračuna i mjernih postupaka. Sa stajališta apsorpcije energije u ljudskom tijelu elektromagnetska polja visokih frekvencija mogu se podijeliti u četiri različita područja (25):

frekvencije od oko 100 kHz do ispod 20 MHz, pri kojima apsorpcija u trupu opada rapidno s frekvencijom, a značajna se apsorpcija događa u vratu i nogama,

frekvencije od oko 20 MHz do 300 MHz, na kojima može doći do relativno visoke apsorpcije u čitavom tijelu, a veće su vrijednosti moguće u nekim dijelovima tijela gdje su postignute rezonancije, primjerice u glavi,

frekvencije od oko 300 MHz do nekoliko GHz, pri kojima dolazi do nejednolikih apsorpcija lokalnog karaktera,

frekvencije iznad 10 GHz, kod kojih se apsorpcija energije primarno događa na koži.

Iznos apsorbirane energije ovisi o brojnim faktorima, uključujući dimenzije izloženog tijela. Ako ljudsko tijelo nije uzemljeno, za čovjeka prosječne visine rezonantna je frekvencija sa stajališta apsorpcije energije oko 70 MHz. Za više osobe rezonantna je frekvencija ponešto niža. S druge strane, za nešto niže odrasle osobe, djecu, bebe i osobe koje se nalaze u sjedećem položaju rezonantna frekvencija može iznositi oko 100 MHz. Općenito vrijedi da, ako je tijelo dobro uzemljeno, rezonantne frekvencije su otprilike dvostruko niže. Osim tijela kao cjeline i razni dijelovi tijela mogu se ponašati kao rezonatori. Tako rezonantna frekvencija glave odraslog čovjeka iznosi primjerice oko 400 MHz, dok je rezonantna frekvencija glave malene bebe oko 700 MHz.

Izloženost ljudi u području bliskog polja može rezultirati visokim vrijednostima lokalnog SAR-a u glavi i zglobovima. Lokalni SAR kao i SAR usrednjen po čitavom tijelu jako ovise o udaljenosti između izvora zračenja i tijela.

Na frekvencijama iznad 10 GHz dubina penetracije polja u tkiva je malena, pa SAR više nije pogodna mjera za određivanje apsorpcije energije u tijelu, već se kao prikladnija dozimetrijska veličina rabi gustoća snage upadnog vala.

BIOLOŠKI UČINCI

Biološkim učincima elektromagnetskih polja na ljude smatraju se bilo kakve detektabilne, reverzibilne ili nereverzibilne, fiziološke promjene u organizmu. Do eventualnih štetnih efekata za zdravlje dolazi u situacijama u kojima biološki efekti prelaze normalne granice koje ljudsko tijelo može kompenzirati svojim regulacijskim mehanizmima. Ovi štetni učinci za ljudsko zdravlje često su akumulacijskog karaktera i općenito ovise o vremenu i dozi ozračenosti. U nastavku ovog odjeljka posebno se obrađuju biološki učinci na ekstremno niskim i visokim frekvencijama.

Biološki učinci polja ekstremno niskih frekvencija

Prihvatljive granice izloženosti poljima ekstremno niskih frekvencija uglavnom se izražavaju preko

magnetskih polja. Sprega ljudskih bića i električnih polja nije istog karaktera, tj. opaža se da su električna polja inducirana unutar tijela općenito oko 10^7 puta manja od polja izvan tijela, a rijetko prelaze oko 10^{-4} vrijednosti vanjskih polja.

Pri ekstremno niskim frekvencijama biološki materijal smatra se dobro vodljivom sredinom u kojoj elektromagnetsko polje preko magnetske indukcije stimulira vrtložne struje na membranama stanica i fluidima. Ove struje teku u zatvorenim petljama koje leže u ravnini okomitoj na smjer magnetskog polja. Na ovim frekvencijama zagrijavanje tkiva je posve zanemarivog karaktera jer valna duljina narinutoga vanjskog polja iznosi više tisuća kilometara i nije komparabilna s dimenzijama tijela. S druge strane, ako je inducirana struja prevelika, postoji rizik od stimuliranja stanica električki podražljivog tkiva, tj. osjetilnih, živčanih i mišićnih stanica. Uz jače polje jači su i pripadni efekti. Ljudsko je tijelo sposobno kompenzirati slabe interakcije. Polja jačih intenziteta uzrokuju promjene koje u određenim okolnostima mogu dovesti do opasnosti za zdravlje. Iako do danas nije utvrđeno da li elektromagnetska polja niskih frekvencija mogu uzrokovati kancerogene bolesti, određena saznanja postoje. S tim u vezi, neki poznati efekti induciranih struja u tijelu zbog izloženosti poljima niskih frekvencija prikazani su na tablici 1 (8-10).

Jedan od razloga zbog kojih dosadašnja istraživanja nisu pružila jasne dokaze o postojanju štetnih efekata za zdravlje ako se radi o izloženosti poljima ekstremno niskih frekvencija svakako je nedostatak spone između eksperimentalnih podataka na ljudima i životinjama i odgovarajućih mehanizama međudjelovanja. Za epidemiološke pak studije, iz kojih također ne slijede jasni i čvrsti dokazi koji povezuju izloženost električnim ili magnetskim poljima sa zloćudnim bolestima, vežu se ozbiljna ograničenja koja proizlaze iz načina na

koji se ove studije obavljaju. Naime, neovisno o tome što postoje određeni dokazi koji upućuju na stanovite štetne efekte, nedostatak pouzdanih karakterizacija izvora elektromagnetskog onečišćenja, manjak pouzdanosti podataka o izloženosti, kao i ograničen broj slučajeva kod kojih se mogu istražiti nekakvi efekti, dosta otežava mogućnost jasne i nedvosmislene veze između ovih polja i zloćudnih bolesti.

Može se dakle utvrditi da su epidemiološke studije važne u uspostavljanju odgovarajućih hipoteza, ali nipošto nisu dovoljne za stvaranje relevantnih zaključaka. Drugim riječima, epidemiologija može samo opisati veze, ali ne može nikada dokazati vezu između uzroka i posljedica.

Neki od laboratorijskih dokaza koji proizlaze iz eksperimentalnih studija blago upućuju na uzročno-posljedičnu vezu između nivoa elektromagnetskih polja u okolišu i promjena u biološkim funkcijama živih organizama. Takve su poveznice, primjerice između polja ekstremno niskih frekvencija i raznih vrsta tumora, posebno leukemije u djece. Prema kategorizaciji Svjetske zdravstvene organizacije magnetska polja ekstremno niskih frekvencija klasificirana su kao moguće kancerogena (skupina 2B). S druge strane, nedostatak konzistentnih spoznaja koje bi proizašle iz ovih eksperimentalnih analiza slabi uvjerenje da su dotične biološke promjene u vezi s izloženosti poljima ekstremno niskih frekvencija. Uzimajući tako u obzir dosadašnje epidemiološke studije koje se tiču izlaganja poljima ekstremno niskih frekvencija, zaključak je ipak da ne postoje jasni i čvrsti dokazi koji bi povezali izloženost ljudi električnim i magnetskim poljima ekstremno niskih frekvencija sa zloćudnim bolestima. No moguće je potvrditi da, pod određenim uvjetima izloženosti poljima, stanoviti efekti postoje, premda ne nužno i štetni za zdravlje.

Tablica 1 Efekti inducirane gustoće struje u tijelu (8-10)

Gustoća struje / mA m^{-2}	Efekti
> 1000	Moguće su blage i teže disfunkcije srca, ove struje mogu stvarati akutnu opasnost za zdravlje.
100 do 1000	Moguće su promjene u iritaciji središnjeg živčanog sustava, tj. opažena je iritacija mišićnog tkiva u ovom rasponu gustoća struja.
10 do 100	Jasno su vidljivi efekti u obliku promjena u bjelančevinama i sintezi DNA, promjene u aktivnosti enzima te su mogući efekti i na živčanom sustavu.
1 do 10	Moguće su promjene u metabolizmu kalcija ili potiskivanju proizvodnje melatonina koji regulira ritam dan/noć. Pozadinske gustoće struja u srcu i mozgu leže upravo unutar ovog područja.
< 1	Nema poznatih efekata. Pozadinske gustoće struja u većini organa u tijelu ovog su reda veličine.

Biološki učinci polja radiofrekvencija

Međudjelovanje elektromagnetskih polja na radiofrekvencijama s ljudskim tijelom i pripadni biološki efekti mogu se razmatrati na raznim nivoima uključujući molekularni, podstanični, organski ili sistemski nivo, ili pak čitavo tijelo. Osnovni biološki efekt elektromagnetskih polja visokih frekvencija je zagrijavanje tkiva koje se daje kvantificirati na temelju analize odgovarajućega toplinskog odziva ljudskog tijela. S obzirom na to da živi sustavi mijenjaju svoje funkcije promjene temperature, do pojave štetnih efekata dolazi ako je ukupna elektromagnetska energija apsorbirana u ljudskom tijelu dovoljno velika da može izazvati nekontrolirani porast temperature u tijelu obarajući pritom unutarnje termoregulacijske mehanizme tijela.

Biološki učinci elektromagnetskog zračenja na visokim frekvencijama mogu se klasificirati kao (1):

Učinci visokog intenziteta (*toplinski učinci*) nastaju prilikom apsorpiranja elektromagnetske energije u mjeri dovoljnoj za porast temperature u uzorku tkiva za oko 0,1 °C.

Učinci srednjeg intenziteta (*A-toplinski učinci*) jesu oni kod kojih se apsorbira elektromagnetska energija dovoljna za detektabilno povećanje temperature u uzorku tkiva, ali izostaje značajniji porast temperature u tkivu zbog regulacijskih mehanizama kontrole temperature u tijelu.

Efekti niskog intenziteta (*netoplinski učinci*) jesu oni kod kojih apsorbirana količina energije u uzorku tkiva nije usporediva s energijom koja se oslobodi normalnim tjelesnim funkcijama.

Bitno je naglasiti da se radi o relativnim pojmovima i da nije moguće oštro definirati granicu između njih. Na temelju proračuna SAR-a za određene dijelove tijela, nivoi apsorpcije elektromagnetske energije mogu se kvalitativno podijeliti na niski nivo apsorpcije (+), srednji nivo apsorpcije (++) i visoki nivo apsorpcije (+++), kako je prikazano na tablici 2 (8-10, 25).

Stupanj do kojeg određeni dio tijela apsorbira toplinu zbog elektromagnetskog zračenja na visokim frekvencijama ovisi o cirkulaciji i toplinskoj vodljivosti dijela tijela. Kao što je vidljivo iz tablice 2, leća oka i čašica koljena najosjetljiviji su dijelovi tijela na prijenos topline. S druge strane, srce, pluća i koža relativno su neosjetljivi na prijenos topline zbog visoke razine prokrvljenosti.

Većina štetnih učinaka za ljudsko zdravlje zbog izloženosti visokofrekvencijskom zračenju u području između 1 MHz do 10 GHz povezuje se s porastom

temperature oko 1 °C. Ovakva povišenja temperature imaju očite štetne učinke na zdravlje ljudi (8). Toplinski štetni učinci nastupaju pri lokaliziranim temperaturama iznad 41,6 °C pri čemu dolazi do koagulacije proteina, povećane propusnosti membrane stanice ili do oslobađanja toksina u neposrednoj blizini tzv. vrućih točaka (engl. *hot spots*) (8, 9). Uz ove učinke mogući su i drugi fiziološki efekti uzrokovani lokalnim porastom temperature u organima poput srca ili mozga.

Tablica 2 Izloženost homogenom električnom polju visokih frekvencija (nemodulirani signal) (8-10)

Dio tijela	Nivo apsorpcije
Mozak	++
Očne leće	+++
Pluća	+
Srce	+
Koža	+
Unutarnji organi	+
Čašica koljena	+++
Metalni implantati	+++

Za razliku od učinaka visokog intenziteta postoji dosta kontroverzi povezanih s biološkim efektima što se tiče RF zračenja srednjeg i niskog intenziteta. Prva je dilema može li RF zračenje na tim nivoima uzrokovati štetan utjecaj čak i kada nema evidentnih toplinskih efekata. Drugo je pitanje mogu li efekti zbog RF zračenja nastupiti i kada tjelesna termoregulacija uspostavlja normalnu temperaturu usprkos deponiranju RF energije.

Nejednolika raspodjela apsorbirane RF snage nastupa prilikom izloženosti zračenju samo određenih dijelova tijela što rezultira nejednolikim zagrijavanjem, odnosno vrućim točkama. Ovakav scenarij javlja se primjerice pri uporabi mobilnog telefona.

Bitno je naglasiti da kod moduliranih polja, kao što je GSM zračenje, uz toplinske efekte može nastupiti i iritacija na staničnom nivou.

Budući da prisutnost antene mobilnog telefona u uskoj blizini glave korisnika rezultira nekoliko puta većim dozama zračenja izloženih dijelova nego što je slučaj s usrednjenim okolnim poljima, to uzrokuje bojazan da postoje rizici za zdravlje. Stoga, mnogi epidemiolozi kontinuirano rade na verifikaciji pretpostavke da izloženost RF poljima mobilnih telefona može uzrokovati moždani tumor ili druge bolesti.

Neovisno o tome, premda su neke studije pokazale rastući rizik od rijetkih nemalighnih tumora među korisnicima mobilnih telefona, još uvijek ne postoji

korelacija između rastućeg rizika i dužine vremena uporabe mobilnog telefona.

Neke studije (13) pokazuju da se stacionarno stanje (maksimalni temperaturni porast u glavi čovjeka) uspostavlja otprilike nakon oko 30 min izloženosti zračenju mobilnog telefona, dok 3 min izloženosti dovode do temperaturnog porasta većeg od 60 % vrijednosti u stacionarnom stanju. Vrijeme izloženosti od 6 min do 7 min daje temperaturni rast od oko 90 % vrijednosti u stacionarnom stanju. Ovi su rezultati u skladu s činjenicom da toplinska vremenska konstanta čovjeka iznosi nešto više od 6 min (25). Istraživanja su pokazala (14) da se vremenska toplinska konstanta različitih tkiva kreće između 6 min i 8 min. Određeni proračuni otkrivaju dublju penetraciju u mozak i 50 % veću gustoću apsorbirane snage kod 5-godišnjeg djeteta u odnosu na odraslu osobu dok neke studije ovaj scenarij odbacuju. Ova je problematika predmetom rasprave u brojnim publikacijama, primjerice (1-5). Trenutačno dozimetrija djece nije zadovoljavajuće razjašnjena uglavnom zbog nedostatka podataka o električko-toplinskim svojstvima tkiva.

Britanski *National Radiological Protection Board* (NRPB) savjetovao je roditeljima da djeci do 8 godina ne dopuste uporabu mobilnog telefona. Prema nekim istraživanjima temperaturni porast od 0,3 °C smatra se pragom pri kojemu hipotalamus inicira aktivnosti poput proširenja krvnih žila, povećanje protoka krvi, isparavanje znojenjem i slično.

Neki istraživači upozoravaju na utjecaj mobilnog telefona na mentalne procese (pozornost, kratkotrajna memorija, upravljanje informacijama ili vrijeme reakcije).

Brzina propagacije živčanih impulsa može se povećavati ili smanjivati zbog relativno malih porasta temperature: 0,3 °C do 0,6 °C. Postoje također indicije da pulsnomodulirano zračenje mobilnih telefona može modificirati EEG kod spavanja.

Jedan od negativnih efekata unutarnjih polja visokih frekvencija zasigurno je i povećanje propusnosti barijere koja u normalnim fiziološkim uvjetima priječi protok određenih supstancija u mozak putem krvi.

Dosad nitko zasigurno ne zna kakvi su dugoročni efekti zbog izloženosti RF zračenju i je li ono kumulativne prirode. S druge strane, kumulativni efekt je posebno važan kad se radi o zdravstvenim pitanjima. Dugoročna kumulativna izloženost produkt je vremena i prosjeka ozračenosti.

Istraživanja mogućih posljedica dugotrajnog izlaganja zračenju mobilnog telefona provedena su u okviru projekta INTERPHONE koji je vodila

Međunarodna agencija za istraživanje raka (IARC, *International Agency for Research on Cancer*) (1).

Epidemiološke studije u okviru projekta INTERPHONE upućuju na određenu povezanost između zloćudnih bolesti mozga i dugotrajne upotrebe mobilnih telefona (10 godina i više), pri čemu se spominje povećanje rizika od oko 40 %.

U novije vrijeme zahtijeva se minimiziranje izloženosti zračenju mobilnog telefona dok se ne dođe do definitivnih zaključaka koji mogu proizaći iz još sveobuhvatnijih studija, primjerice u radu Hardella i Sage (3). Isti autori navode faktor rizika od čak 2,9 u slučaju dugotrajne izloženosti mobilnom telefonu (više od 10 godina). U tom svjetlu čak se traži preispitivanje postojećih granica ozračenosti u smislu postavljanja rigoroznijih ograničenja, upravo s obzirom na činjenicu da nije isključen rizik od inicijacije malignih bolesti nakon uporabe mobilnog telefona tijekom 10 godina i više.

Vrijedi napomenuti da je za pouzdanost procjene rizika od zloćudnih bolesti u okviru epidemioloških studija na ljudima nuždan period promatranja od najmanje 15 do 20 godina.

Zaključno rečeno, RF biološki efekti impliciraju značajan rizik po zdravlje isključivo ako je doza primljenog zračenja zaista visoka. U većini slučajeva nivoi zračenja visokih frekvencija u okolišu, posebno što se tiče baznih stanica ispod su graničnih razina.

SIGURNOSNE SMJERNICE I GRANICE IZLOŽENOSTI

Sigurnosnim smjernicama za zaštitu ljudi od elektromagnetskog zračenja propisuju se dopuštene granice izloženosti karakterističnim veličinama elektromagnetskog polja.

Sigurnosne smjernice za izloženost ljudi elektromagnetskim poljima zasnivaju se na dokazanim učincima, temeljenim na teorijskim i eksperimentalnim istraživanjima te epidemiološkim studijama, a to su: stimulacija električno podražljivih stanica i zagrijavanje tkiva. Ovi se učinci daju relativno dobro opisati gustoćom struje J i specifičnom apsorbiranom snagom SAR. Međunarodno predložene mjere zaštite predstavljaju konsenzus u području zaštite ljudi od elektromagnetskog zračenja, zasnovan na znanstvenim istraživanjima. Zaštitna je granica nivo ispod kojeg se izloženost ljudi elektromagnetskim poljima ne smatra štetnom, premda ona po sebi nije jasna i oštra

granica između sigurnosti i rizika za zdravlje. U tom smislu, to je ograničenje više točka iznad koje rizik za zdravlje raste.

Jedan od temeljnih problema kod sigurnosnih smjernica jest pitanje njihove unifikacije i harmonizacije na međunarodnom nivou, s obzirom na to da smjernice dosta variraju jer su plod rada različitih normizacijskih tijela, zdravstvenih agencija i inih međunarodnih organizacija. Tako primjerice SAD, Kanada, Australija te neke europske i azijske zemlje imaju svoje sigurnosne smjernice. Velika količina različite legislative za ovu problematiku mahom je uzrokovana neujednačenošću načina na koji se određene mjere, odnosno granice izloženosti donose vezano za frekvenciju, vrijeme izloženosti, periodičnost izlaganju i druge faktore.

Najšire prihvaćene međunarodne sigurnosne smjernice objavilo je međunarodno udruženje *International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection* (ICNIRP) 1998. godine. Udruženje *Institute of Electrical and Electronic Engineers* (IEEE) 1999. godine svojim pravilnikom određuje granice takozvane maksimalne dopuštene izloženosti (engl. *maximal permissible exposure* - MPE) za iznose vremenski promjenljivih električnih i magnetskih polja u slobodnom prostoru te za odgovarajuće gustoće snage. Granice propisane pravilnikom IEEE prihvaćene su u SAD-u i u još nekoliko zemalja, dok je većina zemalja zapadne Europe prihvatila norme propisane normama ICNIRP-a.

Prema ICNIRP-u granične razine elektromagnetskog zračenja propisuju se na dva nivoa (1-5):

- temeljna ograničenja (engl. *basic restrictions*)
 - veličine međudjelovanja elektromagnetske energije s biološkim tkivom, izražene kao stupanj specifične apsorpcije SAR [W kg^{-1}] i gustoća struje J [A m^{-2}] inducirane u biološkom tkivu;
- referentne granične razine (engl. *reference levels*)
 - veličine koje opisuju upadno elektromagnetsko polje – jakost električnog polja E [V m^{-1}], jakost magnetskog polja H [A m^{-1}] i gustoća snage elektromagnetskog vala S [W m^{-2}].

Dakle, najveća dopuštena gustoća struje i SAR-a u tijelu su tzv. temeljna ograničenja međudjelovanja elektromagnetskog zračenja i tijela. To znači da štetni učinak u tijelu izravno ovisi o tim veličinama, a sve ostale veličine (referentne granične razine) izvode se iz njih primjenom matematičkog modeliranja ili ekstrapolacijom iz raspoloživih laboratorijskih podataka. Za osnovna ograničenja uzete su za faktor 10 umanjene vrijednosti na kojima je primijećen početak štetnog djelovanja elektromagnetskog polja na organizam. Nadalje, sve granične vrijednosti dijele populaciju na dvije skupine: profesionalnu i opću populaciju. Polazi se od toga da se ustanovljeni pragovi bioloških efekata odnose na zdrave ljude te da postoji dio populacije koji je osjetljiviji na elektromagnetsko zračenje (djeca, trudnice, starci, bolesnici, nedefinirani poremećaji). Kontrolirani uvjeti izlaganja, odnosno profesionalna izloženost elektromagnetskom zračenju definiraju se kao izlaganje elektromagnetskom zračenju koje se događa u okviru radnog okruženja, a ljudi su svjesni rizika i podvrgnuti redovitim zdravstvenim pregledima kojima prate svoje zdravstveno stanje. U tom smislu, za opću populaciju potrebno je da granice budu još niže, pa se zato osnovna ograničenja za opću populaciju smanjuju za sigurnosni faktor 5 (25).

Temeljno ograničenje na 50 Hz za gustoću struje iznosi 10 mA m^{-2} za profesionalnu izloženost, a za opću populaciju 2 mA m^{-2} . Temeljna ograničenja za SAR usrednjen po čitavom tijelu i lokalizirani SAR za frekvencijsko područje između 10 MHz i 10 GHz prikazana su na tablici 3.

Treba istaknuti da je prema ICNIRP-u osnovni zahtjev za zaštitu ljudi od zračenja vezan za zadovoljavanje temeljnih ograničenja. Ako su proračuni ili mjerenja temeljnih ograničenja znatno otežani ili čak onemogućeni, tada se mjere sigurnosti odnose na određivanje iznosa vanjskih polja i usporedba s referentnim graničnim razinama. Ako su referentne granične razine prekoračene, to nužno ne implicira da su prekoračena temeljna ograničenja, ali je u tom

Tablica 3 Temeljna ograničenja za SAR prema smjernicama ICNIRP-a (25)

Frekvencijsko područje: 10 MHz do 10 GHz	SAR usrednjen po čitavom tijelu / W kg^{-1}	Lokalizirani SAR (glava i trup) / W kg^{-1}	Lokalizirani SAR (udovi) / W kg^{-1}
Radnici	0,4	10	20
Opća populacija	0,08	2	4

slučaju nužno na neki način provesti dozimetriju unutarnjeg polja i provjeriti temeljna ograničenja. Treba naglasiti da ICNIRP-ova ograničenja imaju status preporuke, a zaštitne granične vrijednosti za određenu zemlju regulirane su nacionalnim i međunarodnim preporukama.

Čovjek je najosjetljiviji na području od 10 MHz do 400 MHz. Zato su u tom području granice najoštrije, odnosno dopuštene jakosti polja su najniže. Poznavanje jakosti polja u određenoj točki na nekoj frekvenciji nije dovoljno da bi se izvršila procjena štetnosti. Pri procjeni štetnosti važno je još koliko dugo je čovjek izložen polju; zrači li izvor kontinuirano ili impulsno modulirani val te s koliko izvora je čovjek ozračen i na kojim frekvencijama.

Utjecaj duljine izlaganja ovisi o biološkom efektu, odnosno mehanizmu međudjelovanja koji se promatra. Pretpostavka na kojoj se zasniva upotreba vremenskog usrednjenja glasi: «Organizam može izdržati kontinuiranu graničnu jakost polja bez štetnih učinaka.» Ako se jakost polja povisi, organizam se i dalje može štititi svojim obrambenim mehanizmima i adaptacijom, ako se izlaganje događa u vremenskom intervalu kraćem od vremenske konstante obrambenog mehanizma. Npr. ako je pretpostavljeni biološki učinak zagrijavanje tkiva, tada je obrambeni mehanizam vlastita termoregulacija organizma. Poznato je da tijelo ne može dulje od 6 min uspješno provoditi termoregulaciju nakon izlaganja polju jačem od granične vrijednosti. Zbog toga se izlaganje polju vremenski usrednjava na vremenski interval od 6 min.

Koncept prosječnog vremena izloženosti zasniva se na pretpostavci da je ljudsko tijelo sposobno kompenzirati efekte električnog polja ako je djelovanje polja vremenski ograničeno te na taj način izbjeći bilo kakve trajne štetne posljedice. Za izvore signala impulsnog oblika, osim vremenske srednje vrijednosti, potrebno je provjeriti i vršne vrijednosti impulsa (25).

U slučaju istodobne izloženosti zračenju polja različitih frekvencija potrebno je izvršiti sumiranje efekata na različitim frekvencijama. Vrijedi naglasiti da su električni podražaji relevantni za frekvencije do 10 MHz, a toplinski efekti su relevantni za frekvencije iznad 100 kHz, te se SAR i gustoća snage zbrajaju prema relacijama koje propisuje ICNIRP (25). Nadalje, za frekvencije između 10 GHz i 300 GHz, osim osnovnog ograničenja SAR-a, postoji i osnovno ograničenje gustoće snage.

Što se tiče toplinskih učinaka, primjena IEEE zaštitnih normi (27), kojima je prostorni vršni SAR usrednjen po 1 g tkiva ograničen na $1,6 \text{ W kg}^{-1}$,

rezultira maksimalnim temperaturnom porastom od $0,06 \text{ }^\circ\text{C}$ u mozgu, a primjena ICNIRP zaštitnih normi (25), kojima je SAR usrednjen po 10 g tkiva ograničen na 2 W kg^{-1} , rezultira maksimalnim porastom temperature u mozgu u iznosu od $0,11 \text{ }^\circ\text{C}$.

Ove granične vrijednosti imaju zaštitne faktore 17 za slučaj ANSI (American National Standards Institute)/IEEE ograničenja, odnosno 9 za slučaj ICNIRP granica izloženosti u usporedbi s porastom temperature od $1 \text{ }^\circ\text{C}$ pri kojoj su prilikom pokusa na životinjama ustanovljeni štetni toplinski učinci.

Hrvatske smjernice za zaštitu od elektromagnetskih polja

Prema definiciji iz Zakona o zaštiti od neionizirajućeg zračenja (29):

neionizirajuća zračenja jesu elektromagnetska polja i elektromagnetski valovi frekvencije niže od 300 GHz ili ultrazvuk frekvencije niže od 500 MHz, a koji u međudjelovanju s tvarima ne stvaraju ione;

izvor neionizirajućih zračenja jest svaki uređaj koji proizvodi jednu ili više vrsta neionizirajućih zračenja.

Mjere zaštite od neionizirajućih zračenja impliciraju da svako izlaganje tim zračenjima bude niže od graničnih razina utvrđenih Zakonom o zaštiti od neionizirajućeg zračenja i propisima donesenim na temelju tog Zakona. Zakon o zaštiti od neionizirajućeg zračenja predviđa donošenje provedbenog propisa (pravilnika).

U prosincu 2001. granične vrijednosti snaga zračenja radijskih postaja propisane su Pravilnikom o najvišim dopuštenim snagama zračenja radijskih postaja u gradovima i naseljima gradskog obilježja (30).

Trenutačno postoji nekoliko važećih pravilnika za zaštitu od neionizirajućeg zračenja: Pravilnik o zaštiti od elektromagnetskih polja (28), koji je prema Zakonu o zaštiti od neionizirajućeg zračenja donijelo Ministarstvo zdravstva Republike Hrvatske u prosincu 2003. godine, Pravilnik o ograničenjima jakosti elektromagnetskih polja za radijsku opremu i telekomunikacijsku terminalnu opremu (31), koji je na temelju Zakona o telekomunikacijama u prosincu 2004. godine donijelo Ministarstvo mora, turizma, prometa i razvitka te Pravilnik o minimalnim zdravstvenim i sigurnosnim zahtjevima koji se odnose na izloženost radnika rizicima koji potječu od elektromagnetskih polja koji je donijelo Ministarstvo zdravstva (32).

Vrijedi naglasiti da su granice izloženosti u navedenim pravilnicima dosta oštrije nego u većini međunarodnih normi.

Također, nužno je utvrditi da je u vrijeme pisanja konačne verzije ovog rada (prva verzija dovršena 1. srpnja 2010.) donesen u Republici Hrvatskoj novi Zakon o zaštiti od neionizirajućeg zračenja.

ZAKLJUČNA RAZMATRANJA

Prisutnost elektromagnetskih polja u okolišu i njihova potencijalna štetnost za ljudsko zdravlje kontroverzno su znanstveno, tehničko, ali i socijalno pitanje. Ključna točka u analizi mogućih rizika za zdravlje ljudi je dozimetrija unutarnjeg polja koja obuhvaća elektromagnetsko i toplinsko modeliranje ljudskog tijela. Realistični, anatomski zasnovani, modeli ljudskog tijela analiziraju se primjenom sofisticiranih suvremenih numeričkih metoda. Ulazne podatke za ovakvu analizu osigurava dozimetrija upadnog polja koja se temelji na proračunima i mjerenjima izvora elektromagnetskih polja na niskim i visokim frekvencijama.

U radu su opisani realistični modeli glave izložene polju monitora te trudnice izložene električnom polju dalekovoda, oba temeljena na odgovarajućim varijantama Laplaceove jednadžbe i njezinu rješavanju metodom rubnih elemenata i model oka izloženog zračenju ravnog vala koji se temelji na odgovarajućoj Helmholtzovoj jednadžbi i njezinu rješenju primjenom hibridne metode konačnih i rubnih elemenata.

Na temelju rezultata koje pruža unutarnja dozimetrija mogu se razmatrati biološki učinci koji se javljaju u situaciji kad izloženost elektromagnetskim poljima uzrokuje fiziološke promjene u biološkom sustavu koje su detektabilne mjerenjem ili proračunom. Ako je biološki učinak zbog izloženosti izvan normalnog raspona koji organizam može kompenzirati, nastupa opasnost za zdravlje čovjeka. Izloženost poljima niskih frekvencija uzrokuje induciranje gustoće struje u tkivu, dok je dominantni efekt zbog izloženosti poljima visokih frekvencija zagrijavanje tkiva, mijenjanje kemijskih reakcija ili induciranje električnih struja u tkivima i stanicama. Zračenje elektromagnetskih polja visokih frekvencija kvantificira se konceptom specifične gustoće apsorbirane snage, odnosno SAR-a.

Neka od eksperimentalnih saznanja blago podupiru vezu između nivoa polja ekstremno niskih frekvencija u okolišu s promjenama u biološkim funkcijama. Takve su poveznice, primjerice između polja

ekstremno niskih frekvencija i raznih vrsta tumora, posebno leukemije u djece. Prema kategorizaciji Svjetske zdravstvene organizacije magnetska polja ekstremno niskih frekvencija klasificirana su kao moguće kancerogena (skupina 2B).

Treba podvući da većina rezultata dobivenih u okviru novijih istraživanja upućuje na to da su nivoi polja u okolišu zbog izvora na ekstremno niskim frekvencijama (dalekovodi, transformatorske stanice) i visokih frekvencija (bazne stanice) u principu značajno niži od međunarodnih i domaćih ograničenja. Ipak, neki od rezultata dobivenih u određenim studijama pa i u ovom radu, doduše za slučaj izloženosti iznosima vanjskih polja blizu referentnih graničnih razina, prelaze dopuštene vrijednosti temeljnih ograničenja.

Primjerice, maksimalna vrijednost gustoće struje inducira se u fetusu tijekom 8. tjedna trudnoće. Pri tome gustoća struje koja se inducira u fetusu višestruko prelazi iznos gustoće struje u mozgu majke koja iznosi 0,5 mA m⁻². Time gustoća struje u fetusu prelazi po ICNIRP-u temeljna ograničenja i za opću pa i za profesionalnu populaciju, dok je gustoća struje u mozgu majke unutar ovih granica.

DODATAK A: Rješavanje Laplaceove jednadžbe metodom rubnih elemenata

Laplaceova jednadžba [5], odnosno [10] oblika

$$\nabla^2 \varphi = 0 \quad (A1)$$

riješena je primjenom metode rubnih elemenata uz dekompoziciju potpodručja (33). U ovom dodatku opisani su samo glavni koraci u rješavanju problema, dok se više detalja o ovoj varijanti metode rubnih elemenata može pronaći npr. u radovima (9) ili (33).

Primjenom poopćenog Gaussova integralnog teorema, a nakon određenih matematičkih manipulacija dobiva se Greenova integralna reprezentacija funkcije φ (33), a provođenje postupka diskretizacije granice na N_k elemenata rezultira sljedećim izrazom:

$$c_i \varphi_i + \sum_{j=1}^{N_k} \int_{\Gamma_{k,j}} \varphi \frac{\partial \varphi^*}{\partial n} d\Gamma = \sum_{j=1}^{N_k} \int_{\Gamma_{k,j}} \frac{\partial \varphi}{\partial n} \varphi^* d\Gamma \quad (A2)$$

gdje i sada predstavlja točku izvora, a $G_{k,j}$ se odnosi na j -ti rubni element W_k , $\partial \varphi^* / \partial n$ predstavlja derivaciju po normalu na granicu fundamentalnog rješenja, dok se φ_i odnosi na točke unutar područja. Nadalje, c je geometrijski ovisan član preko kojeg se uzima u obzir Cauchyev tip singulariteta, a φ^* je Greenova funkcija za trodimenzionalne probleme oblika:

$$\varphi^*(R) = \frac{1}{4\pi R} \quad (A3)$$

pri čemu je R udaljenost od točke izvora do točke promatranja.

Nakon određenih matematičkih manipulacija dobiva se sustav algebarskih jednadžbi za potpodručje u matricnoj formi (33):

$$[H]\{\varphi\} - [G]\left\{\frac{\partial\varphi}{\partial n}\right\} = 0 \quad (\text{A4})$$

gdje su opći članovi matrica i definirani izrazima:

$$H_{ij}^n = \int_{\Gamma_{k,j}} f_n \left(\frac{\partial\varphi^*}{\partial n} \right) d\Gamma \quad (\text{A5})$$

$$G_{ij}^n = \int_{\Gamma_{k,j}} f_n \varphi^* d\Gamma \quad (\text{A6})$$

pri čemu n označava kolokacijske čvorove unutar j -tog elementa.

Globalni sustav jednadžbi gradi se (asemblira) iz lokalnih sustava pojedinog potpodručja. Rješavanjem sustava jednadžbi (A4) dobivaju se nepoznate vrijednosti potencijala, odnosno njegove normalne derivacije na granici. U konačnici je primjenom integralne relacije (A2) moguće dobiti potencijal u proizvoljnoj točki područja.

DODATAK B: Modeliranje Helmholtzove jednadžbe primjenom hibridne metode rubnih i konačnih elemenata

Problem apsorpcije elektromagnetske energije u dvodimenzionalnom modelu oka riješen je primjenom hibridne metode rubnih i konačnih elemenata. Metoda konačnih elemenata iskorištena je za modeliranje područja proračuna (oka), dok je metoda rubnih elemenata upotrijebljena za modeliranje okolnog prostora. Objе su metode spregnute primjenom pogodnih rubnih uvjeta na danoj granici. Ovakav hibridni pristup koji implicira kombiniranje dviju numeričkih metoda uveden je uzimajući u obzir činjenicu da je metoda konačnih elemenata pogodna za modeliranje nehomogenog područja proračuna, dok je, s druge strane, metoda rubnih elemenata idealna za modeliranje problema s otvorenim granicama kod kojih se može izbjeći rješavanje integrala po području.

Metoda rubnih elemenata

Integralne jednadžbe po rubu područja za dinamička polja uobičajeno se izvode primjenom drugog Greenova teorema (33).

Dvodimenzionalni problem elektromagnetskog raspršenja daje se opisati jednadžbama:

$$E_z(\vec{r}) = E_z^{inc}(\vec{r}) + \oint_{\Gamma} \left[E_z \frac{\partial G(\vec{r}, \vec{r}')}{\partial n} - G(\vec{r}, \vec{r}') \frac{\partial E_z}{\partial n} \right] d\Gamma \quad (\text{B1})$$

$$H_z(\vec{r}) = H_z^{inc}(\vec{r}) + \oint_{\Gamma} \left[H_z \frac{\partial G(\vec{r}, \vec{r}')}{\partial n} - G(\vec{r}, \vec{r}') \frac{\partial H_z}{\partial n} \right] d\Gamma \quad (\text{B2})$$

gdje je Γ granica područja proračuna koja uključuje raspršivač i njegovo blisko polje.

Greenova funkcija za dvodimenzionalni slučaj je tada oblika (9, 33):

$$G(\vec{r}, \vec{r}') = \frac{j}{4} H_0^{(2)}(k|\vec{r} - \vec{r}'|) = \frac{j}{4} H_0^{(2)}(kR) \quad (\text{B3})$$

gdje je $H_0^{(2)}$ Hankelova funkcija nultog reda, a R udaljenost od točke izvora do točke promatranja.

Diskretiziranjem granice Γ na N izoparametarskih diskontinuiranih rubnih elemenata jednadžbe segmentata postaju:

$$\alpha_i H_{zi} + H_{zi}^{inc} + \sum_{j=1}^N \int_{\Gamma_j} \frac{\partial G}{\partial n} H_z d\Gamma = \sum_{j=1}^N \int_{\Gamma_j} \frac{\partial H_z}{\partial n} G d\Gamma \quad (\text{B4})$$

$$\alpha_i E_{zi} + E_{zi}^{inc} + \sum_{j=1}^N \int_{\Gamma_j} \frac{\partial G}{\partial n} E_z d\Gamma = \sum_{j=1}^N \int_{\Gamma_j} \frac{\partial E_z}{\partial n} G d\Gamma \quad (\text{B5})$$

gdje je konstanta α_i oblika:

$$\alpha_i = 1 - \frac{\theta}{2\pi} \quad (\text{B6})$$

i ovisi o tipu singulariteta (33).

U okviru ovog proračuna upotrijebljeni su diskontinuirani elementi u svrhu efikasnog tretiranja oštih rubova (9).

Metoda konačnih elemenata

Metoda konačnih elemenata rabi se za proračun temperaturnih polja jer je relativno jednostavna za implementaciju, pogodna za tretiranje nehomogenosti materijala a općenito je u inženjerstvu u posljednjih nekoliko desetljeća široko primjenjivana i dobro istražena što se tiče konvergencije i točnosti numeričkih rezultata.

Prilikom numeričkog modeliranja problema raspršenja metodom konačnih elemenata primijenjen je Galerkin-Bubnovljev postupak (33), koji implicira izbor istih testnih funkcija W_j te funkcija aproksimacije rješenja po konačnom elementu. U skladu s metodom težinskih odstupanja (9, 33) Helmholtzove jednadžbe

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\omega\mu} \nabla \times \vec{E} \right) + (j\sigma - \omega\epsilon) \vec{E} = 0 \quad (\text{B7})$$

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\sigma + j\omega\epsilon} \nabla \times \bar{H} \right) + j\omega\mu\bar{H} = 0 \quad (\text{B8})$$

množe se skupom težinskih funkcija nakon čega slijedi integracija po području proračuna Ω . Prema metodi težinskih odstupanja postavlja se uvjet iščezavanja integrala po području:

$$\int_{\Omega} \left[\nabla \times \left(\frac{1}{\omega\mu} \nabla \times \bar{E} \right) + (j\sigma - \omega\epsilon) \bar{E} \right] W_j d\Omega = 0 \quad (\text{B9})$$

$$\int_{\Omega} \left[\nabla \times \left(\frac{1}{\sigma + j\omega\epsilon} \nabla \times \bar{H} \right) + j\omega\mu\bar{H} \right] W_j d\Omega = 0 \quad (\text{B10})$$

Primjenom prvog Greenova identiteta uz neke matematičke postupke proizlazi:

$$\begin{aligned} \int_{\Omega_e} \left[\frac{1}{\omega\mu} \nabla E_z \cdot \nabla W_j + (j\sigma - \omega\epsilon) E_z W_j \right] d\Omega = \\ = \int_{\Gamma_e} \frac{1}{\omega\mu} W_j \frac{\partial E_z}{\partial n} d\Gamma \end{aligned} \quad (\text{B11})$$

$$\begin{aligned} \iint_{\Omega_e} \left[\frac{1}{\sigma + j\omega\epsilon} \nabla H_z \cdot \nabla W_j + j\omega\mu H_z W_j \right] d\Omega = \\ = \int_{\Gamma_e} \frac{1}{\sigma + j\omega\epsilon} W_j \frac{\partial H_z}{\partial n} d\Gamma \end{aligned} \quad (\text{B12})$$

Slijedi diskretizacija područja proračuna Ω na M izoparametarskim trokutim konačnim elemenatima, a električna i magnetska polja po trokutnom elementu mogu se aproksimirati izrazima:

$$E_z = \sum_{i=1}^3 W_i E_{zi} \quad (\text{B13})$$

$$H_z = \sum_{i=1}^3 W_i H_{zi} \quad (\text{B14})$$

gdje su W_i oblikovne funkcije po trokutnom elementu.

Nakon određenih matematičkih operacija slijedi (9, 33):

$$\sum_{i=1}^3 E_{zi} \iint_e \left[\frac{1}{\omega\mu} \nabla W_j \cdot \nabla W_i + (j\sigma - \omega\epsilon) W_j W_i \right] |J| d\xi_1 d\xi_2 \quad (\text{B15})$$

$$\sum_{i=1}^3 H_{zi} \iint_e \left[\frac{1}{\sigma + j\omega\epsilon} \nabla W_j \cdot \nabla W_i + j\omega\mu W_j W_i \right] |J| d\xi_1 d\xi_2 \quad (\text{B16})$$

gdje su ξ_1 i ξ_2 lokalne izoparametarske koordinate na trokutu, a $|J|$ je jakobian transformacija koordinata. Sprega ovih dviju metoda detaljno je objašnjena u (9).

Kako se područje proračuna tretira metodom konačnih elemenata, a vanjski prostor primjenom metode rubnih elemenata, ove dvije metode spregnute su implementacijom rubnih uvjeta za kontinuitet električnih i magnetskih polja na granici Γ , danih izrazima:

$$\bar{n} \times \bar{H}^{ext} = \bar{n} \times \bar{H}^{int} \quad (\text{B17})$$

$$\bar{n} \times \bar{E}^{ext} = \bar{n} \times \bar{E}^{int} \quad (\text{B18})$$

gdje se indeksi *ext* i *int* odnose na vanjski, odnosno unutarnji prostor.

DODATAK C Rješavanje stacionarne Pennesove jednadžbe primjenom metode konačnih elemenata

Primjenom metode težinskih odstupanja, odnosno množenjem jednadžbe

$$\nabla(\lambda \nabla T) + W_b C_{pb} (T_a - T) + Q_m + Q_{EM} = 0 \quad (\text{C1})$$

sa skupom težinskih funkcija W_j i integriranjem po području proračuna Ω dobiva se sljedeća integralna relacija:

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} \left[\nabla(k \nabla T) + W_b C_{pb} \cdot (T_a - T) + Q_m + \rho \cdot SAR \right] \cdot \\ \cdot W_j d\Omega = 0 \end{aligned} \quad (\text{C2})$$

gdje je W_j skup težinskih (testnih) funkcija.

Nadalje, uzimanjem u obzir Neumannova rubnog uvjeta:

$$q_s = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = H (T_s - T_a) \quad (\text{C3})$$

za granicu područja Γ proizlazi:

$$\begin{aligned} \iint_{\Omega} \left[\lambda \nabla T \cdot \nabla W_j + W_b C_{pb} \cdot T \cdot W_j \right] d\Omega + \int_{\Gamma} h_c T \cdot W_j d\Gamma = \\ = \iint_{\Omega} (W_b C_{pb} \cdot T_a + Q_m + \rho \cdot SAR) \cdot W_j d\Omega + \int_{\Gamma} h_c T_e \cdot W_j d\Gamma \end{aligned} \quad (\text{C4})$$

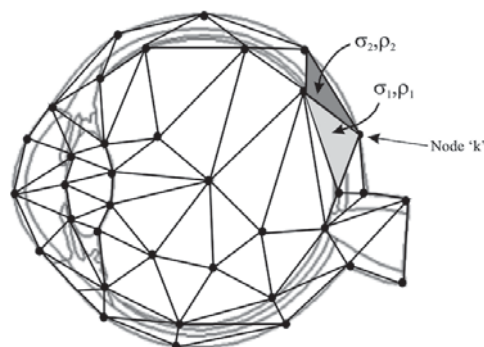
Jednadžba (C4) predstavlja integralnu formulaciju Pennesove diferencijalne biotoplinske jednadžbe (C1) pogodnu za implementaciju metodom konačnih elemenata.

Područje proračuna Ω diskretizira se na N trokutnih konačnih elemenata. Mreža konačnih elemenata trokutnog tipa za model oka prikazana je na slici C1.

Polje temperature na jednome trokutnom elementu dade se izraziti preko aproksimacijskih funkcija f_j :

$$T = \sum_{i=1}^{N_e} f_i T_i \quad (\text{C5})$$

gdje je N_e broj čvorova na elementu.



Slika C.1 Mreža konačnih elemenata ljudskog oka

Primjenom Galerkin-Bubnovljeve procedure biraju se iste težinske funkcije kao i aproksimacijske funkcije, tj. $W_j = f_j$, a uz standardni postupak diskretizacije jednadžbe (C4) metodom konačnih elemenata slijedi lokalna matična jednadžba [9]:

$$[K]\{T\} = \{M\} + \{P\} \quad (C6)$$

gdje je [K] matrica konačnog elementa:

$$K_{ji} = \int_{\Omega_e} \nabla f_j (\lambda \nabla f_i) d\Omega_e + \int_{\Omega_e} W_b C_{pb} f_j f_i d\Omega_e \quad (C7)$$

a {M} označava vektor tokova:

$$M_j = \int_{\Gamma_e} \lambda \frac{\partial T}{\partial n} f_j d\Omega_e \quad (C8)$$

dok se {P} odnosi na vektor izvora:

$$P_{ji} = \int_{\Omega_e} (W_b C_{pb} T_a + Q_m + Q_{EM}) f_j d\Omega_e \quad (C9)$$

Asembliranjem svih matrica konačnih elemenata formira se globalna matrica sustava, kao što se asembliranjem vektora tokova i izvora formiraju odgovarajući globalni vektori.

LITERATURA

- Lin JC. Malignant brain tumors from cellular mobile telephone radiation. *IEEE Antennas Propag Mag* 2007;49:212-4.
- Hirata A, Fujiwara O, Nagaoka T, Watanabe S. Estimation of whole body average SAR in human models due to plane wave exposure at resonance frequency. *IEEE Trans Electromagn Compat* 2010;52:41-8.
- Hardell L, Sage C. Biological effects from electromagnetic field exposure and public exposure standards. *Biomed Pharmacother* 2008;62:104-9.
- Hardell L, Carlberg M. Meta-analysis of long-term mobile phone use and the association with brain tumors. *Int J Oncol* 2008;32:1097-103.
- Lin JC. Interaction of wireless communication fields with blood-brain barrier of laboratory animals. *Radio Sci Bull* 2005;315:33-8.
- Aniborn A, Feychting M, Lonn S. Mobile phones and tumor risk: interpretation of recent results. *Radio Sci Bull* 2005;314:30-3.
- Barnes FS, Greenebaum B. *Handbook of Biological Effects of Electromagnetic Fields*. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press; 2007.
- Habash RWY. *Electromagnetic Fields and Radiation*. New York (NY): Marcel Dekker; 2002.
- Poljak D. *Izloženost ljudi neionizacijskom zračenju*. Zagreb: Kigen; 2006.
- Poljak D. *Human Exposure to Electromagnetic Fields*. Southampton-Boston: WIT Press; 2003.
- Gandhi OP, Chen JY. Numerical dosimetry at power line frequencies using anatomically based models. *Bioelectromagnetics* 1992;1(Suppl):43-60.
- Gandhi OP. Some numerical methods for dosimetry: extremely low frequencies to microwave frequencies. *Radio Sci* 1995;30:161-77.
- Gandhi OP, Lazzi G, Furse CM. Electromagnetic absorption in the human head and neck for mobile telephones at 835 and 1900 MHz. *IEEE Trans Microw Theory Tech* 1997;44:1865-73.
- Wang J, Fujiwara O. Dosimetry in the human head for portable telephones. U: Stone WR, editor. *The review of radio science 1992-2002*. New York (NY): Wiley-Interscience; 2002. str. 51-63.
- Hirrata A, Shizoava T. Correlation of maximum temperature increase and peak SAR in the human head due to handset antennas. *IEEE Trans Microw Theory Tech* 2003;51:1834-41.
- Chiba A, Isaka K, Yokoi Y, Nagata M, Kitagav M, Matsuo T. Application of finite element method to analysis of induced current densities inside human model exposed to 60Hz electric field. *IEEE Trans Power Apparatus Syst* 1984;103:1895-901.
- Poljak D, Rashed Y. The boundary element modelling of the human body exposed to the ELF electromagnetic fields. *Eng Anal Bound Elem* 2002;26:871-5.
- Poljak D, Peratta A, Brebbia CA. The boundary element electromagnetic-thermal analysis of human exposure to base station antennas radiation. *Eng Anal Bound Elem* 2004;28:763-70.
- Poljak D, Peratta A, Brebbia CA. A 3D BEM modelling of human exposure to extremely low frequency (ELF) electric fields. U: Kasab A, Brebbia CA, Poljak D, urednici: *Boundary Elements XXVII: Incorporating Electrical Engineering and Electromagnetics*. Southampton-Boston: WIT Press; 2005. str. 441-51.
- Gonzalez C, Peratta A, Poljak D. Boundary element modeling of the realistic human body exposed to extremely low frequency (ELF) electric fields: computat geometrical aspects. *IEEE Trans Electromagn Compat* 2007;49:153-62.
- Perrata C, Perrata A, Poljak D. BEM modeling of high voltage ELF electric field applied to a 3D pregnant woman model. *J Commun Software Syst* 2010;6:31-8.
- Nielsen NF, Michelsen J, Michalsen JA, Schneider T. Numerical calculation of electrostatic field surrounding a human head in visual display environments. *J Electrost* 1996;36:209-23.
- Čavka D, Poljak D, Peratta A, Brebbia CA. Boundary element model of the human head exposed to an electrostatic field

- generated by Video Display Units. U: Skerget L, Brebbia CA, urednici. *Boundary Elements and Other Mesh Reduction Methods XXX*. Southampton-Boston: WIT Press; 2008. str. 115-24.
24. Poljak D, Tham CY, Roje V, Zemunik T. Parasitic cylindrical antenna representation of the human body exposed to the low frequency (LF) electromagnetic radiation. U: Millennium Conference on Antennas & Propagation; 9.-14. travnja 2000. Davos, Švicarska.
 25. International Commission on Non-ionizing Radiation Protection (ICNIRP). Guidelines for limiting exposure to time-varying, electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300GHz). *Health Phys* 1998;74:494-522.
 26. Dodig H, Peratta A, Poljak D. Analysis method for the heating of the human eye exposed to high frequency electromagnetic fields. *J Commun Software Syst* 2007;3:3-10.
 27. American National Standards Institute (ANSI). Safety levels with respect to human exposure to radio frequency electromagnetic fields, 3kHz to 300GHz. ANSI/IEEE C.95.1-1992.
 28. Pravilnik o zaštiti od elektromagnetskih polja. Narodne novine 204/2003.
 29. Zakon o zaštiti od neionizirajućeg zračenja. Narodne novine 105/1999.
 30. Pravilnik o najvišim dopuštenim snagama zračenja radijskih postaja u gradovima i naseljima gradskog obilježja. Narodne novine 111/2001.
 31. Pravilnik o ograničenjima jakosti elektromagnetskih polja za radijsku opremu i telekomunikacijsku terminalnu opremu. Narodne novine 60/2004.
 32. Pravilnik o minimalnim zdravstvenim i sigurnosnim zahtjevima koji se odnose na izloženost radnika rizicima koji potječu od elektromagnetskih polja. Narodne novine 38/2008.
 33. Poljak D. *Advanced Modeling in Computational Electromagnetic Compatibility*. New York (NY): Wiley; 2007.

Summary

EXPOSURE TO NON-IONISING ELECTROMAGNETIC FIELDS FROM EXTREMELY LOW TO MICROWAVE FREQUENCIES

This article describes a simulation method to assess human exposure to electromagnetic fields (EMF) from extremely low to microwave frequencies. Human body is represented by realistic computational models taking into account the geometry and electrical properties of organs. Low frequency models are based on quasistatic approximations, Laplace equation, and related numerical modelling via the boundary element method. High frequency models are based on the full wave model and the corresponding Helmholtz equation. The article gives examples of computational models for the human head exposed to a video display unit, for a pregnant woman and foetus exposed to low frequency fields, and for the human eye exposed to microwave frequencies. In extreme scenarios, external and internal field levels exceed national and international thresholds. For example, pregnant woman exposure to power line electric field causes several times higher values of current density in the foetus than the internal current density in the female brain. The article also discusses the interaction between EMF and human body and presents new findings on biological effects of extremely low and high frequency EMF. It concludes with a discussion about protection measures required by international and national safety guidelines and exposure limits.

KEY WORDS: *computational models, EMF, exposure limits, foetus, Helmholtz equation, Laplace equation, pregnant woman, radiation protection, safety guidelines*

CORRESPONDING AUTHOR:

Dragan Poljak
Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje
Sveučilište u Splitu, Zavod za elektroniku
Ruđera Boškovića bb, 21000 Split
E-mail: dpoljak@fesb.hr