Translated from English to Slovak - www.onlinedoctranslator.com

ISSN 1330-3651 (Tlačené vydanie),ISSN1848-6339 (online)
Prijaté: 19. apríla 2025; Akceptované: 20. novembra 2025

https://doi.org/10.17559/TV-20250419002609
Pôvodný vedecký článok

Vystavenie elektromagnetickému žiareniu z inteligentnej 4G prilby

Vladimir STANKOVIĆ*, Dejan JOVANOVIĆ, Anđela JEVTIĆ, Miomir RAOS, Dragana ŽIVALJEVIĆ

Abstrakt:Táto práca sa zaoberá vplyvom elektromagnetického žiarenia z inteligentnej 4G (mobilnej siete štvrtej generácie) prilby na tkanivá a orgány ľudskej hlavy. Výskum sa uskutočnil na frekvencii mobilnej siete 4G 2,6 GHz. Softvér použitý na vytvorenie 3D numerických modelov hlavy, prilby a 4G antény je založený na technike konečnej integrácie. Model hlavy pozostáva z homogénnych, izotropných domén zodpovedajúcich tkanivám a orgánom, označených elektromagnetickými vlastnosťami špecifickými pre priradenú frekvenciu žiarenia. Model prilby bol vytvorený na základe rozmerov reálnej vzorky a zodpovedajúcich špecifikácií materiálu, z ktorého bola vyrobená. Výsledky simulácie ukazujú zvýšené hodnoty intenzity elektrického poľa a SAR (špecifickej miery absorpcie) v tkanivách priamo pod 4G anténou inteligentnej prilby. Získané výsledky slúžia ako základ pre budúci výskum vplyvu elektromagnetického poľa z 4G prilieb na ľudské zdravie.

Kľúčové slová:biologické tkanivo; elektrické pole; prilba; numerické modely; špecifická absorpcia

1 ÚVOD

V poslednej dobe sa rôzne bezdrôtové zariadenia používajú denne vo všetkých aspektoch ľudského života. Keďže bezdrôtové zariadenia sú čoraz populárnejšie a široko dostupné, stále viac ľudí má na tele jedno alebo viac zariadení. To predstavuje výzvu pre výskumníkov, aby študovali spôsoby, akými sa tieto zariadenia používajú, ako aj výhody a nevýhody ich používania [1].

Vďaka svojej komplexnosti a širokej použiteľnosti sa bezdrôtové zariadenia, ako sú inteligentné hodinky, náramky, inteligentné slnečné okuliare, inteligentné šperky, elektronické oblečenie, kožné náplasti atď., používajú vo fitness a zdravotnej starostlivosti. Okrem zvýšenia kvality osobného života sa nositeľné bezdrôtové zariadenia používajú aj na poskytovanie rôznych služieb, ako je určovanie polohy a navigácia, bankovníctvo, monitorovanie fyzického a duševného zdravia, športová analytika atď. [2].

V [3] bol vyvinutý inteligentný systém varovania pred nebezpečenstvom, založený na prilbe, ktorá poskytuje vizuálne a hmatové varovania pracovníkom a operátorom v povrchových baniach.

Na zlepšenie pracovných procesov bola vyvinutá škála bezdrôtových komunikačných zariadení pre zamestnancov. V dôsledku toho, aby sa práca zamestnancov v špecifických odvetviach zefektívnila a sprehľadnila pri zachovaní všetkých bezpečnostných charakteristík, bolo umožnené prepojenie ochranných prilieb a bezdrôtových komunikačných systémov. Takzvaná „inteligentná prilba“ našla široké uplatnenie v energetickom sektore, na železniciach, v oceliarskom priemysle, v prístavoch, pri rôznych typoch inšpekcií, diaľkovej prevádzke, údržbe, záchrane, pomoci pri katastrofách, hasení požiarov, reakcii na núdzové situácie atď. [4, 5]. Inteligentné ochranné prilby zvyčajne poskytujú vysokú úroveň ochrany, čím zabraňujú pracovníkom pred nárazmi do hlavy, prepichnutím a inými zraneniami. Dokážu tiež zistiť, či ich pracovníci nosia, a vydať varovanie ako pripomienku.

Niektoré štúdie skúmali využitie inteligentných prilieb v priemysle, v aplikáciách prvých záchranárov a pri sledovaní zdravia [6]. V stavebníctve sa inteligentné prilby môžu používať na kontrolu zdravia a bezpečnosti prostredníctvom monitorovania pracovného prostredia alebo fyziologických signálov pracovníkov [7].

Pre záchranné tímy môže inteligentná prilba pomôcť pri odhaľovaní zranení, ako sú zlomeniny kostí [8].

Jedna štúdia [9] predstavila možnosť integrácie technológie umelej inteligencie s inteligentnými prilbami na zvýšenie bezpečnosti pracovníkov.

Inteligentné ochranné prilby zvyčajne obsahujú zabudované bezdrôtové komunikačné moduly, ktoré im umožňujú komunikáciu s inými zariadeniami, ako sú smartfóny alebo počítače, prostredníctvom mobilných sietí, Wi-Fi alebo Bluetooth [4]. Inteligentná prilba využíva novú generáciu vysokorýchlostných procesorov, integruje HD video a audio, bezdrôtovú komunikáciu 4G, 3G a Wi-Fi, určovanie polohy, ukladanie, alarmy, viacero senzorov a fyzickú ochranu. Dokáže uľahčiť audio a video hovory v reálnom čase, monitorovanie videa v reálnom čase a určovanie polohy pomocou GPS. Obr. 1 znázorňuje príklad inteligentnej 4G prilby a jednej z jej aplikácií.

Osoba s inteligentnou 4G prilbou môže iniciovať hovor jedným tlačidlom a komunikovať s dispečingom. Dispečer môže tiež kedykoľvek iniciovať hovor a súčasne zachytávať snímky zobrazené z viacerých inteligentných 4G prilieb [5, 10, 11]. Inteligentná prilba dokáže na bezdrôtovú komunikáciu využívať frekvencie z pásiem LTE-FDD, WCDMA, TD-SCDMA a GSM [4, 5, 12].

Napriek všetkým výhodám, ktoré ponúka 4G prilba, faktom zostáva, že jadrom komunikačného systému prilby je 4G anténa, ktorá vyžaruje elektromagnetické žiarenie v blízkosti hlavy nositeľa. Preto je zaujímavé analyzovať elektromagnetické žiarenie inteligentnej 4G prilby a vplyv žiarenia na jej nositeľov. Niektoré štúdie zvažovali rôzne konštrukčné riešenia antén pre prilby a elektromagnetické žiarenie pre jednoduché fantómové modely [13-17].

a) b)

Obrázok 1a) Inteligentná 4G prilba [3], b) Praktické využitie inteligentnej 4G prilby (majetok autora)

Numerické simulácie predstavujú vhodný nástroj na skúmanie rozloženia elektromagnetického poľa v ľudských tkanivách a orgánoch [18, 19]. Vplyv elektromagnetického poľa pochádzajúceho z antény 4G inteligentnej prilby na ľudskú hlavu je možné posúdiť pomocou hodnôt získaných pre elektrické pole a SAR (špecifická miera absorpcie).

V súlade s tým boli vyvinuté realistické 3D modely ľudskej hlavy a inteligentnej 4G prilby, ktoré poskytujú spoľahlivé výsledky pre hodnoty prenikajúceho elektromagnetického poľa pochádzajúceho z 4G antény inteligentnej prilby. Na numerickú simuláciu hodnôt elektrického poľa a SAR pri frekvencii 2,6 GHz bol použitý softvérový balík Computer Simulation Technology (CST) [20]. Vplyv elektromagnetického žiarenia závisí od zloženia, morfológie a rozmerov biologických tkanív a orgánov, preto musia byť opísané s primeranými elektromagnetickými vlastnosťami pre konkrétnu frekvenciu [19, 21]. Hodnoty prenikajúceho elektrického poľa a SAR budú porovnané s povolenými hodnotami z Nariadenia o limitoch expozície neionizujúcemu žiareniu, Úradný vestník Republiky Srbsko [22] a normy IEEE [23].

2 NUMERICKÁ METÓDA A MODELOVANIE

Na vykonanie výskumu bol navrhnutý 3D numerický model, ktorý reprezentuje ľudskú hlavu, prilbu a komunikačný systém. Presnosť výsledkov závisí od toho, ako presne sa modely zhodujú so zložením a rozmermi skutočnej prilby a komunikačného systému, ako aj s tkanivami a orgánmi ľudskej hlavy. Každý jednotlivý model musel prejsť niekoľkými fázami vrátane definovania tvaru, osadenia komponentov, správneho dimenzovania a umiestnenia v priestore. Záverečná fáza zahŕňala zostavenie jednotného 3D modelu, definovanie materiálov, ich reprezentáciu s vhodnými elektromagnetickými vlastnosťami a vytvorenie jednotnej siete.

Skenovaním ľudskej hlavy pomocou počítačovej tomografie bolo určené presné umiestnenie tkanív a orgánov. Pre presnú simuláciu procesu šírenia elektromagnetických vĺn musia byť správne definované okrajové podmienky na rozhraní medzi dvoma vrstvami [24]. V simulačnom procese bol použitý typ hexaedrickej siete.

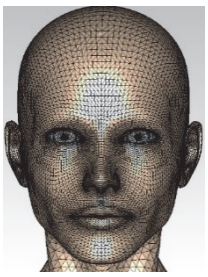
Jemná sieť môže viesť k vysokým požiadavkám na pamäť a predĺženiu času simulácie. Stanovenie kompromisu medzi výpočtovým časom a presnosťou riešenia sa dosahuje pomocou konvergenčných analýz, ktoré identifikujú minimálne rozlíšenie siete potrebné na dosiahnutie prijateľnej numerickej presnosti.

V predloženej štúdii výpočtový model obsahuje približne 46 miliónov sieťových prvkov. Na budenie antény mobilného telefónu, ktorá slúži ako zdroj vyžarovaných elektromagnetických (EM) vĺn, sa používa diskrétny port. Budiaci signál je časovo závislý a je reprezentovaný Gaussovo modulovaným sínusovým impulzom.

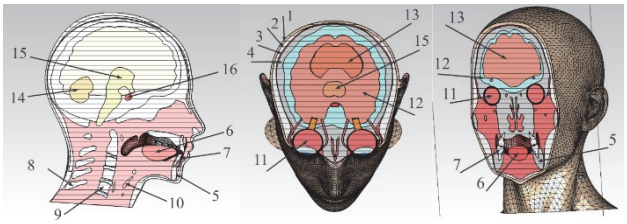
Simulácia komunikačného procesu inteligentnej 4G prilby, ako aj analýza intenzity elektrického poľa a SAR, bola vykonaná pomocou počítačového simulačného softvéru CST Studio Suite [20].

2.1 Numerický model ľudskej hlavy

Na účely analýzy rozloženia elektrického poľa a SAR z inteligentnej 4G prilby v ľudskej hlave bol vytvorený model dospelej ľudskej hlavy (obr. 2). Tvar, zloženie a rozmery numerického modelu zodpovedajú skutočným vlastnostiam priemernej dospelej ľudskej hlavy [25]. Prierez numerického modelu hlavy, vrátane viacerých tkanív a orgánov, je znázornený na obr. 3.



Obrázok 2Ľudská hlava



Obrázok 3 Prierezy ľudskej hlavy s príslušnými tkanivami a orgánmi: 1 - koža; 2 - tukové tkanivo; 3 - sval; 4 - lebka; 5 - čeľusť; 6 - jazyk; 7 - zuby; 8 - stavce; 9 - chrupavka; 10 - štítna žľaza; 11 - oči; 12 - mozgovomiechový mok; 13 - mozog; 14 - mozoček; 15 - mozgový kmeň; a 16 - hypofýza

Po návrhu 3D modelu hlavy bolo potrebné definovať vhodné elektromagnetické charakteristiky každého biologického tkaniva a orgánu [26]. Biologické tkanivá sú nehomogénne, nelineárne a disperzné a každé je definované zodpovedajúcimi elektromagnetickými veličinami (permitivita, permeabilita a vodivosť). Tieto parametre do značnej miery závisia od frekvencie, typu tkaniva a jeho obsahu vody. Okrem týchto veličín je pre platnú simuláciu potrebná aj hustota tkaniva pre každé tkanivo alebo orgán.

2.2 Numerický model prilby 4G

Prilby musia mať tvrdú vonkajšiu škrupinu, ktorá absorbuje nárazy a je umiestnená približne 2,5 cm nad hlavou [27]. Škrupina je vyrobená z termoplastov (polyetylén, polykarbonát a iné) a termosetových materiálov (sklolaminát a textil impregnované fenolom). Tieto materiály sa ukázali byť odolné, spoľahlivé a ľahké a zároveň poskytujú účinnú ochranu [28]. Inteligentná 4G prilba môže tiež obsahovať celý rad ďalších zariadení a komponentov, ako sú procesory, displeje, kamery, mikrofóny, pevné disky, napájacie batérie a komunikačné moduly [4, 12, 29]. Jedno technické riešenie inteligentnej prilby je znázornené na obr. 4.

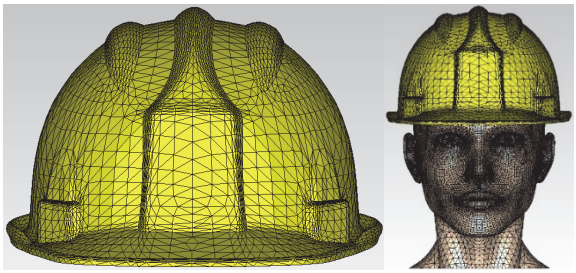
Inteligentná 4G prilba môže mať viacero antén používaných na rôzne účely. Môže obsahovať hlavnú anténu, anténu LTE diverzity, antény Wi-Fi a Bluetooth (BT), anténu GPS a takmer elektrickú anténu. Príklad...

Doska plošných spojov s komunikačnými anténami je znázornená na obr. 5.

Obrázok 4 Technické riešenie inteligentnej prilby [30]

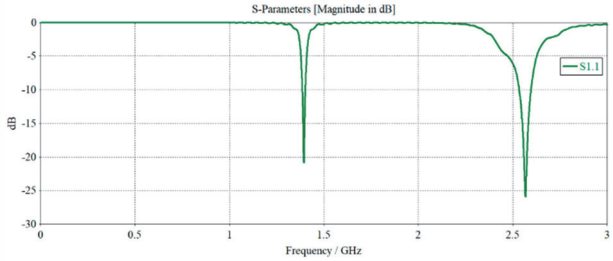
Obrázok 5 Doska plošných spojov s anténami [30]

3D numerický model prilby vytvorený pre tento výskum zodpovedá skutočným rozmerom a tvaru 4G prilby (obr. 6). Podobne aj elektromagnetické vlastnosti modelovej prilby zodpovedajú vlastnostiam skutočnej 4G prilby [31-33].



Obrázok 6 Numerický model prilby

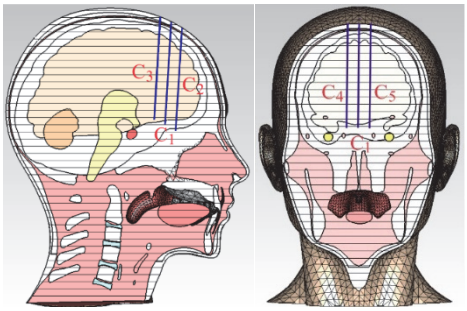
Inteligentná 4G prilba používa 4G anténu [34] s impedanciou 50 Ω a výkonom 1 W [35]. S-parametre antény sú znázornené na obr. 7.



Obrázok 7 Parameter odrazu 4G antény

3 VÝSLEDKY

Na základe polohy antény v modeli bolo vybraných niekoľko vertikálnych prierezov, v ktorých bola vykonaná analýza získaných hodnôt intenzity elektrického poľa a SAR. 1 gbol vykonaný. Pre každý prierez bol definovaný jeden smer (C), pozdĺž ktorého sú graficky znázornené intenzita elektrického poľa a SAR. Polohy smerov, pozdĺž ktorých bude prezentované vyhodnotenie získaných výsledkov, sú znázornené na obr. 8.

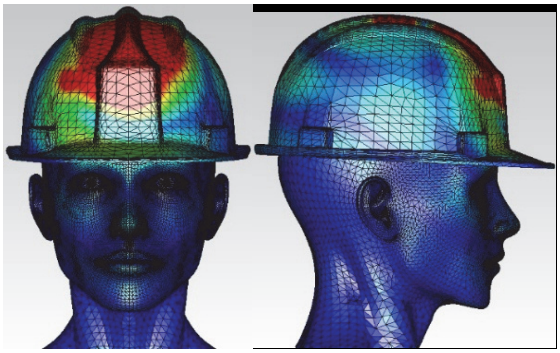


Obrázok 8 Polohy smerov C1, C.2, C.3, C.4a C5v rámci numerickej hlavy model

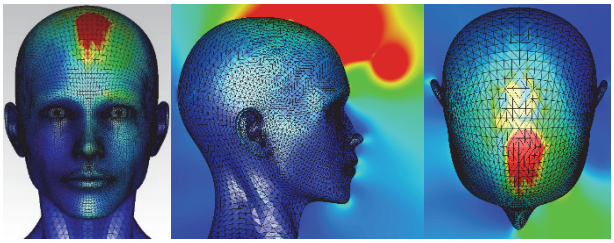
C.1Smer bol zvolený tak, aby bol kolmý na napájanie antény, zatiaľ čo ostatné smery boli nastavené v rovnakých vzdialenostiach vzhľadom na C1v rámci každého prierezu.

3.1 Analýza intenzity elektrického poľa

Obr. 9 a obr. 10 znázorňujú hodnoty intenzity elektrického poľa na povrchu modelov s prilbou a bez nej počas komunikácie cez sieť 4G. Oblasti na povrchu prilby a pokožky, znázornené červenou farbou na obr. 9, predstavujú oblasti s najvyššou expozíciou intenzite elektrického poľa.

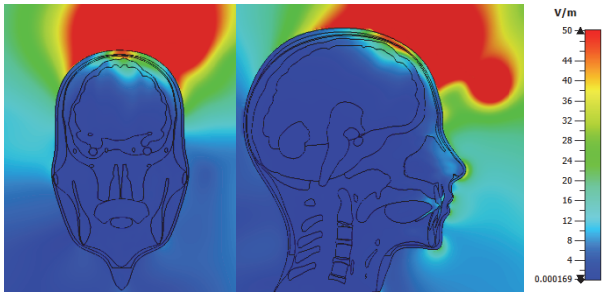


Obrázok 9 Rozloženie intenzity elektrického poľa na povrchu prilby

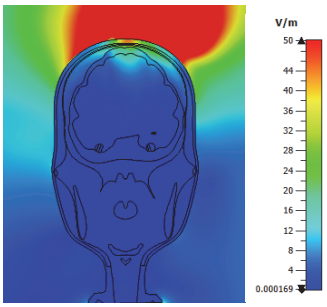


Obrázok 10 Rozloženie intenzity elektrického poľa na povrchu hlavy pod anténa

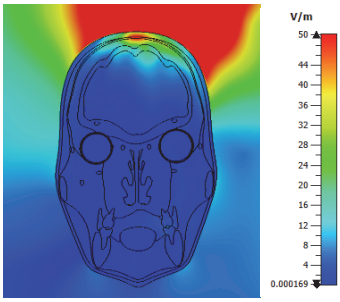
Obr. 11 až 13 znázorňujú intenzitu elektrického poľa vo vnútri modelu hlavy pre horizontálne prierezy, kde smery C1, C.2a C3sa nachádzajú, resp.



Obrázok 11 Intenzita elektrického poľa - rez so smerom C_1(dve rôzne roviny)

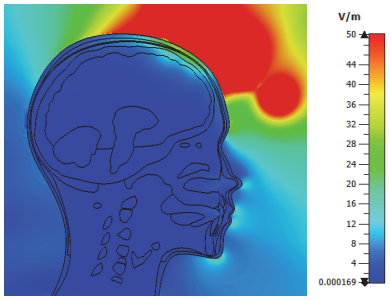


Obrázok 12 Intenzita elektrického poľa - rez so smerom C_2

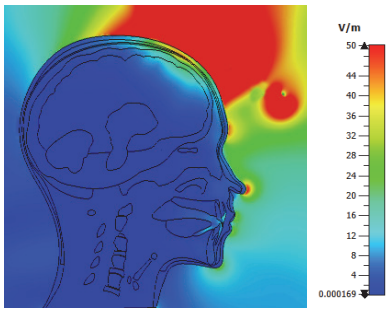


Obrázok 13 Intenzita elektrického poľa - rez so smerom C_3

Obr. 14 a obr. 15 znázorňujú rozloženie intenzity elektrického poľa vo vnútri modelu hlavy pre horizontálne prierezy, kde smery C_4a C.5klamať, resp.



Obrázok 14 Intenzita elektrického poľa - rez so smerom C_4

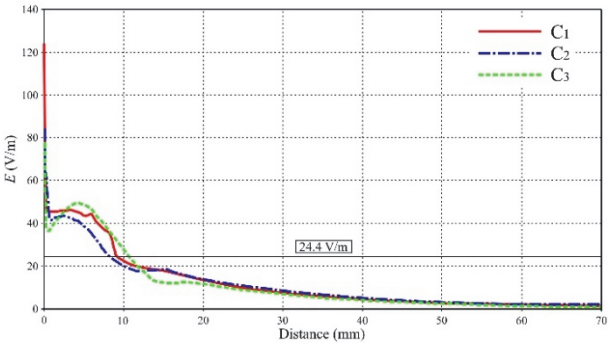


Obrázok 15 Intenzita elektrického poľa - rez so smerom C_5

Je dôležité poznamenať, že kvôli prehľadnosti výsledkov je horná hodnota intenzity elektrického poľa obmedzená na 50 V/m vo farebnej palete. Konkrétne, elektrické pole je skutočne najvyššie v blízkosti antény a je výrazne vyššie ako v modeli hlavy. Ak by sa vo farebnej palete použila skutočná maximálna hodnota poľa, zmeny hodnoty poľa v hlave by boli na obrázkoch takmer neviditeľné. Keďže zmeny v hlave sú pre analýzu najdôležitejšie, bolo potrebné upraviť grafické znázornenie rozloženia sledovaných veličín. To znamená, že hodnoty poľa v oblastiach zobrazených červenou farbou môžu prekročiť hornú hranicu farebnej palety.

Podľa nariadenia [22] je referenčný limit elektrického poľa pri frekvencii 2,6 GHz 24,4 V/m vo voľnom priestore bez prítomnosti človeka; čísla však ukazujú, že hodnoty v určitých častiach modelu hlavy tento limit prekračujú. Hodnoty intenzity elektrického poľa a hĺbka prenikania elektromagnetickej vlny sú skutočne najvyššie v oblasti blízko antény.

Obr. 16 a obr. 17 ukazujú, že intenzita elektrického poľa je závislá od vzdialenosti pre smery definované na obr. 8.



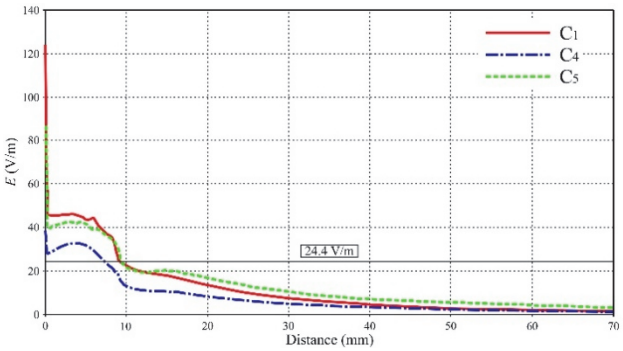
Obrázok 16 Zmena intenzity elektrického poľa so vzdialenosťou v smere C_1, C.2, a C.3

Závislosť intenzity elektrického poľa od vzdialenosti pozdĺž smeru C_1, C.2a C_3je znázornená na obr. 16. Spoločným znakom všetkých troch kriviek je, že intenzita elektrického poľa v povrchovej vrstve v modeli hlavy výrazne prekračuje referenčné limitné úrovne. Intenzita elektrického poľa pre smer C_1dosahuje svoju najvyššiu hodnotu 125 V/m pri vstupe do hlavy dospelého človeka a hodnota poľa klesá pod referenčný limit pri 9 mm od začiatku. Je zrejmé, že penetrácia poľa je pomerne značná a vysoké hodnoty prechádzajú cez viacero tkanív a orgánov. V tejto oblasti hlavy je hrúbka kože, tukového tkaniva a svalov veľmi malá, takže vysoké hodnoty intenzity elektrického poľa sú prítomné aj v lebke a mozgovomiechovom moku. Najvyššia hodnota je 32 V/m v mozgovomiechovom moku a 19 V/m v mozgu. Je potrebné poznamenať, že nariadenie špecifikuje hodnoty poľa vo voľnom priestore bez prítomnosti človeka a že tieto hodnoty v tele musia byť výrazne nižšie v dôsledku absorpcie tkanivami a orgánmi.

Najvyššia hodnota intenzity elektrického poľa pozdĺž smeru C_2je 85 V/m, s hodnotou 24 V/m v mozgovomiechovom moku a 16 V/m v mozgu. Zvýšené hodnoty nad referenčný limit sú prítomné až do vzdialenosti približne 8 mm. Pre smer C_3, hodnoty nad referenčným limitom sú prítomné až do vzdialenosti približne 11 mm, pričom najvyššia hodnota intenzity elektrického poľa je 78 V/m, zatiaľ čo najvyššie hodnoty v mozgu a mozgovomiechovom moku sú 19 V/m.

Obr. 17 znázorňuje graf zmeny intenzity elektrického poľa so vzdialenosťou v smere C_1, C.4a C_5Podobne ako pri analýze grafu na obr. 16, elektrické pole

hodnoty intenzity vo vrstvách v blízkosti antény pre dva smery - C_4a C.5- prekračujú referenčné limitné úrovne. Pre smer C_4, hodnota na vstupe do hlavy dospelého človeka je 88 V/m a klesá pod referenčnú hranicu 9 mm od začiatku. Najvyššia hodnota v mozgu je 20 V/m. Pozdĺž smeru C_5, najvyššia hodnota intenzity elektrického poľa je 37 V/m, 14 V/m v mozgovomiechovom moku a 12 V/m v mozgu. Hodnoty nad referenčným limitom sú prítomné až do výšky približne 8 mm.

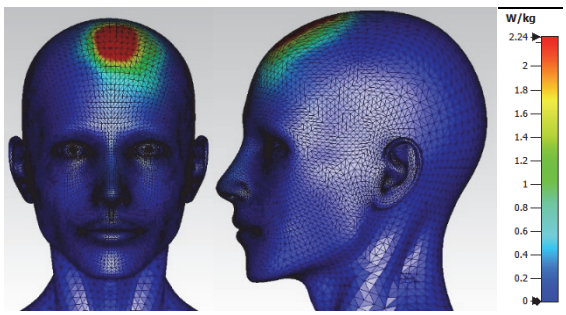


Obrázok 17 Zmena intenzity elektrického poľa so vzdialenosťou v smere C_1, C.4, a C.5

3.2 Analýza špecifickej miery absorpcie

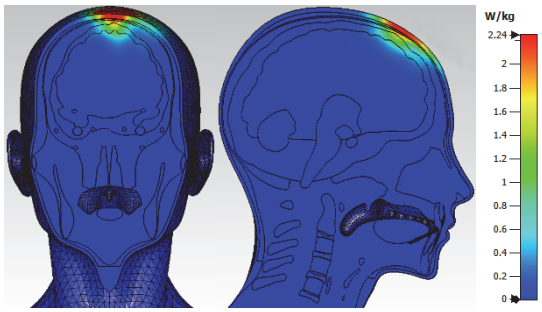
Ak sa šíriaca elektromagnetická vlna stretne s biologickým tkanivom, prenikne ním, čo mu umožní absorbovať časť jeho energie. Absorbovaná energia je presne to, čo sa používa na vysvetlenie vplyvu elektromagnetického žiarenia na biologickú hmotu. Na tento účel bola zavedená veličina nazývaná špecifická miera absorpcie. SAR je rýchlosť, akou je energia z elektromagnetickej vlny absorbovaná ľudským tkanivom na jednotku hmotnosti, a túto hodnotu možno uviesť ako priemernú hodnotu pre špecifickú hmotnosť tkaniva alebo celé telo. Oveľa praktickejšou veličinou je priemerná SAR, čo je pomer výkonu absorbovaného v tele k hmotnosti biologického tkaniva. Získa sa integráciou výrazu pre lokálnu SAR cez celý požadovaný objem. Výpočet priemernej SAR zvyčajne zahŕňa vzorku s hmotnosťou 1 g ($SAR_{1\,g}$) a 10 g vzorka ($SAR_{10\,g}$). Vzhľadom na tenké vrstvy v modeli so zvýšenými hodnotami pod anténou je pohodlnejšie analyzovať hodnoty $SAR_{1\,g}$, ako analýza konečného objemu pre $SAR_{10\,g}$zahŕňalo by viacero rôznych tkanív, čo by znemožnilo určiť skutočne absorbovanú energiu len pre jedno tkanivo (jednu vrstvu).

Obr. 18 znázorňuje priestorové rozloženie $SAR_{1\,g}$a jeho maximálna hodnota na povrchu modelu hlavy. Obrázky 19 až 23 znázorňujú $SAR_{1\,g}$rozloženie v rámci modelu hlavy pre rôzne prierezy.

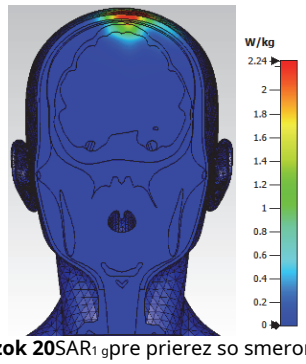


Obrázok 18$SAR_{1\,g}$na samom povrchu modelu

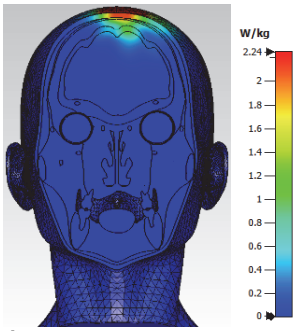
Z obrázku je zrejmé, že maximálna hodnota $SAR_{1\,g}$prekračuje základný limit 1,6 W/kg [23].



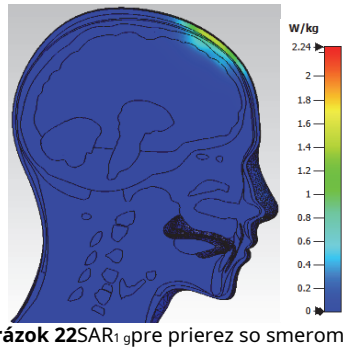
Obrázok 19$SAR_{1\,g}$pre prierez so smerom C_1(dve rôzne roviny)



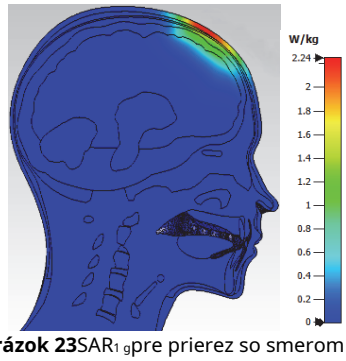
Obrázok 20$SAR_{1\,g}$pre prierez so smerom C_2



Obrázok 21$SAR_{1\,g}$pre prierez so smerom C_3

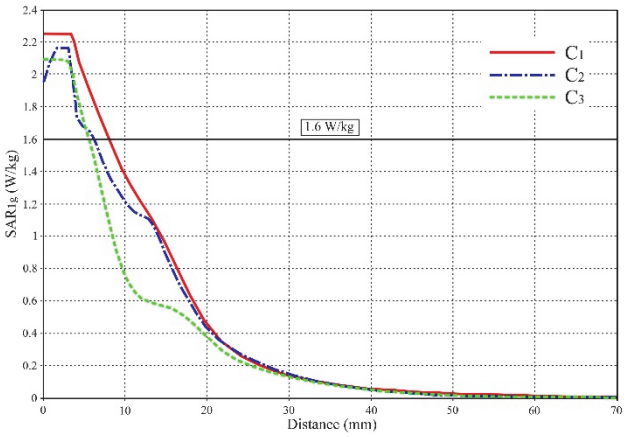


Obrázok 22$SAR_{1\,g}$pre prierez so smerom C_4

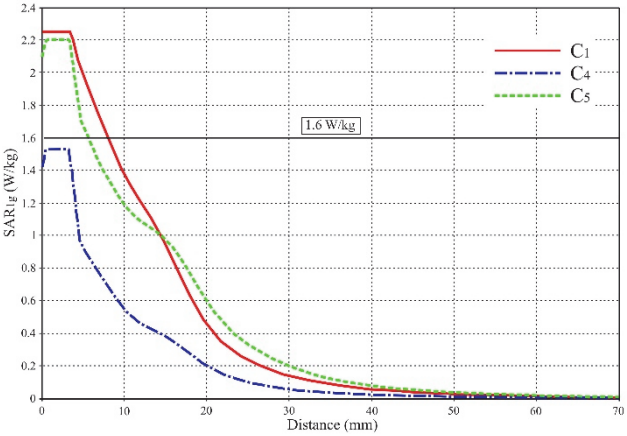


Obrázok 23$SAR_{1\,g}$pre prierez so smerom C_5

Z obrázkov je zrejmé, že základné limity sú prekročené v povrchových vrstvách, predovšetkým v koži, tukovom tkanive, svaloch a častiach lebky. Obr. 24 a obr. 25 znázorňujú zmenu $SAR_{1\,g}$hodnoty so vzdialenosťou pre rôzne prierezy pozdĺž smerov C_1, C_2, C_3, C_4a C_5.



Obrázok 24 Variácia $SAR_{1\,g}$so vzdialenosťou v smeroch C_1, C_2a C_3



Obrázok 25 Variácia $SAR_{1\,g}$so vzdialenosťou v smeroch C_1, C_4a C_5

Hodnoty pre $SAR_{1\,g}$pre každý smer prekročiť maximálnu povolenú hodnotu 1,6 W/kg (s výnimkou prípadu rozloženia pozdĺž smeru C_4). Pre smer C_1, maximálna hodnota $SAR_{1\,g}$je 2,3 W/kg. Hodnoty nad základným limitom sa vyskytujú až do vzdialenosti 8,5 mm vo viacerých tkanivách, od kože až po mozgovomiechový mok. V mozgovomiechovom moku je najvyššia hodnota 1,7 W/kg, zatiaľ čo v mozgu je to 1,2 W/kg.

Pre smer C_2, maximálna hodnota $SAR_{1\,g}$je 2,18 W/kg. Hodnoty nad základným limitom sú prítomné až do vzdialenosti 7 mm vo viacerých tkanivách, od kože až po lebku. Najvyššia hodnota v mozgovomiechovom moku je 1,6 W/kg, zatiaľ čo v mozgu je to 1,18 W/kg.

Pre smer C_3, maximálna hodnota $SAR_{1\,g}$je 2,1 W/kg. Hodnoty nad základným limitom sú prítomné až do vzdialenosti 6 mm, opäť vo viacerých tkanivách. Najvyššia hodnota v mozgovomiechovom moku je 1,1 W/kg, zatiaľ čo v mozgu je to 1 W/kg.

Pre smer C_4, maximálna hodnota $SAR_{1\,g}$je pod základným limitom a dosahuje 1,55 W/kg. Obr. 18 ukazuje, že vyššie hodnoty SAR sú výraznejšie na ľavej strane numerického modelu hlavy, ale smer C_4 je v priereze mimo tejto oblasti. V mozgu je $SAR_{1\,g}$je približne 0,4 W/kg.

Pre smer C_5, najvyššia hodnota je 2,2 W/kg. Vysoké hodnoty sú prítomné až do vzdialenosti 6 mm vo viacerých tkanivách. V mozgu je najvyššia hodnota $SAR_{1\,g}$je 0,9 W/kg.

Pre smer C_1, C_2a C_3, hodnoty $SAR_{1\,g}$ sa stanú rovnakými vo vzdialenosti 30 mm, zatiaľ čo od približne 50 mm sa stanú prakticky zanedbateľnými. Pre smery C_1, C_4a C_5, hodnoty $SAR_{1\,g}$sa stanú rovnakými pri hĺbke tesne nad 50 mm, kde sa tiež stanú takmer zanedbateľnými a blížia sa k nule. Pre všetky smery nad 70 mm sa tieto hodnoty takmer rovnajú nule, čo naznačuje, že v tejto hĺbke dochádza k takmer úplnej absorpcii elektromagnetickej energie.

4 ZÁVER

Táto práca prezentovala výsledky štúdie o účinkoch žiarenia vyžarovaného anténou 4G inteligentnej prilby v rámci numerického modelu, ktorý presne reprezentuje tkanivá a orgány ľudskej hlavy. Na tento účel boli analyzované dve veličiny: elektrické pole a SAR a získané hodnoty boli porovnané s referenčnými úrovňami a základnými limitmi. Anténa bola nastavená na prevádzku na frekvencii 2,6 GHz. Jedným zo spôsobov, ako zvýšiť bezpečnosť a efektivitu práce zamestnancov v konkrétnych odvetviach, je pripojenie ochranných prilieb k bezdrôtovým komunikačným systémom. Inteligentné ochranné prilby možno prakticky považovať za bezdrôtové zariadenia hands-free, ktoré dokážu komunikovať so smartfónmi a počítačmi prostredníctvom mobilných sietí. Keďže sa 4G prilba nosí na hlave, bolo logické predpokladať, že vzhľadom na blízkosť antény prilby bude hlava používateľa neustále vystavená elektromagnetickému poľu antény.

Pre numerickú simuláciu boli vytvorené vhodné 3D numerické modely hlavy dospelého človeka, prilby a 4G antény. Zároveň boli všetky biologické tkanivá a orgány reprezentované elektromagnetickými vlastnosťami, ktoré sú pre ne špecifické.

V dôsledku simulácie vyžarovania antény 4G prilby boli analyzované získané hodnoty elektrického poľa a SAR v rámci numerického modelu hlavy. Keďže anténa je umiestnená blízko hlavy, očakávalo sa, že hodnoty elektrického poľa aj SAR budú vysoké. Po analýze získaných hodnôt intenzity elektrického poľa sa dospelo k záveru, že referenčné hodnoty boli v určitých tkanivách a orgánoch prekročené viac ako päťkrát. Konkrétne, prekročenie referenčných hodnôt pre rôzne analyzované smery sa pohybovalo od 1,3 do viac ako 5-krát, pre hĺbku prenikania elektromagnetických vĺn od 8 mm do 11 mm, v závislosti od smeru. Pre smer priamo pod napájaním antény boli hodnoty vyššie ako referenčné hodnoty prítomné aj v mozgu.

Analýza distribúcie $SAR_{1\,g}$ukázali, že základné limity boli prekročené do určitej hĺbky. Tieto prekročenia sa pohybovali od 1,3 do 1,4-násobku v hĺbkach od 6 mm do 8,5 mm. Medzi oblasti s väčšou absorpciou elektromagnetickej energie patria svaly, tukové tkanivo, koža, lebka, mozgovomiechový mok a malá časť mozgu. Bolo tiež zrejmé, že v modeli hlavy existujú oblasti, kde sú hodnoty intenzity elektrického poľa aj SAR extrémne vysoké a niekoľkonásobne prekračujú referenčné limitné úrovne a základné limity. Osobitná pozornosť by sa mala venovať tkanivám a orgánom.

nachádzajúcich sa v týchto oblastiach, aby sa posúdili potenciálne škodlivé biologické účinky. Hodnoty prenikajúceho elektromagnetického poľa by boli oveľa vyššie, ak by škrupina prilby spočívala priamo na hlave používateľa, teda ak by medzi škrupinou prilby a hlavou nebola žiadna vložka.

Aj keď bola inteligentná prilba primárne navrhnutá ako silný spojenec zamestnancov, ktorý im má pomôcť v každodennej práci, zvýšiť ich bezpečnosť a umožniť včasnú reakciu v nebezpečných situáciách, nemožno prehliadať skutočnosť, že ide o aktívny zdroj elektromagnetického žiarenia umiestnený priamo nad ich hlavami. Vzhľadom na to, že určité časti tkanív a orgánov hláv zamestnancov sú vystavené elektromagnetickému poľu, je potrebné venovať osobitnú pozornosť potenciálne škodlivým biologickým účinkom na zamestnancov. Okrem toho je potrebné preskúmať vplyv poľa na včasné rozhodovanie a reakciu v určitých situáciách, najmä ak sú zamestnanci vystavení dodatočnému stresu alebo pracujú v náročných podmienkach.

Nové zistenia o vplyve elektromagnetického poľa na nositeľov inteligentných prilieb môžu významne prispieť k optimalizácii dizajnu inteligentných prilieb a systémov monitorovania expozície v reálnom čase.

Budúci výskum sa zameria na ďalšie frekvencie 4G, ako aj na frekvencie 5G mobilných komunikačných sietí. V konečnom dôsledku všetky poznatky vyplývajúce z tohto a budúcich štúdií môžu významne prispieť k zlepšeniu bezpečnosti práce a prijatiu primeraných bezpečnostných predpisov.

Poďakovania

Túto štúdiu podporilo Ministerstvo vedy, technologického rozvoja a inovácií Srbskej republiky v rámci zmluvy č. 451-03-137/2025-03/200148; Cieľ 17.

5 REFERENCÍ

[1] Mertz, L. (2016). Sú nositeľné zariadenia bezpečné?: Nosíme si inteligentné zariadenia všade so sebou – dokonca aj do postele – ale spíme s nepriateľom, alebo sú varovné príbehy prehnané?*IEEE Pulse*,*7*(1), 39 – 43. https://doi.org/10.1109/mpul.2015.2498477

[2] Kim, S., Sharif, YA a Nasim, I. (2024). Expozícia ľudského elektromagnetického poľa v nositeľných komunikačných systémoch: Prehľad.*e-Prime - Pokroky v elektrotechnike, elektronike a energetike*,*8*, 100508. https://doi.org/10.1016/j.prime.2024.100508

[3] Kim, Y. a Choi, Y. (2022). Inteligentný systém varovania pred priblížením na báze prilby na zlepšenie bezpečnosti práce na cestách pomocou obrazového snímača a umelej inteligencie. *Medzinárodný časopis pre environmentálny výskum a verejné zdravie, 19*(23), 16312.https://doi.org/10.3390/ijerph192316312

[4] Jepower. (2025).*4G inteligentná prilba s kamerou, živé vysielanie, pre stavebníctvo*.

[5] Ouxiang International Limited. (2025).*4G inteligentná kamera do prilby.*

[6] Choi, Y. a Kim, Y. (2021). Aplikácie inteligentnej prilby v aplikovaných vedách: Systematický prehľad.*Aplikované vedy*, *11*(11), 5039.https://doi.org/10.3390/app11115039

[7] Jayasree, V. a Kumari, MN (23. – 24. júla 2020).*Inteligentná prilba pre stavebných robotníkov založená na internete vecí*ICSSS, Chennai, India. https://doi.org/10.1109/icsss49621.2020.9202138

[8] Strasse, W. a. D., Campos, DP, Mendonça, CJA, Soni, JF, Mendes, J., & Nohama, P. (2022). Detekcia kosti lézie na pohotovosti pomocou lekárskej infračervenej termografie.*Biomedicínske inžinierstvo online*,*21*(1). https://doi.org/10.1186/s12938-022-01005-7

[9] Campero-Jurado, I., Márquez-Sánchez, S., Quintanar-Gómez, J., Rodríguez, S., & Corchado, J. (2020). Smart Helmet 5.0 pre priemyselný internet vecí využívajúci umelú inteligenciu.*Senzory*,*20*(21), 6241. https://doi.org/10.3390/s20216241

[10] JOVE Video Communication Limited. (2025).*Inteligentná prilba 4G*.

[11] Elefina. (2025).*Inteligentná bezpečnostná prilba so vstavanou HD kamerou, Wifi 4G GPS SOS polohovanie, živé video, sieťová kamera*.

[12] Beijing Equiinet Network Technology Co., Ltd. (2025). *Inteligentná 4G prilba EQ-M37*.

[13] Naobumi, M. a Hisashi, M. (2020). Návrh antény pre prilbu s využitím analýzy charakteristických módov.*Časopis Spoločnosti aplikovanej výpočtovej elektromagnetiky (ACES)*,*35*(2), 161 – 166.

[14] Michishita, N., Saita, Y., Morishita, H., Ameya, M., Hirose, M., & Kurokawa, S. (2020). Inverzná F anténa namontovaná na prilbe v pásme VHF.*Časopis pokročilej simulácie vo vede a technike*,*7*(2), 291 – 299. https://doi.org/10.15748/jasse.7.291

[15] Gallucci, S., Bonato, M., Chiaramello, E., Fiocchi, S., Tognola, G. a Parazzini, M. (2022). Posúdenie vystavenia ľudí nositeľným anténam: Vplyv polohy a interindividuálnej anatomickej variability.*Medzinárodný časopis pre environmentálny výskum a verejné zdravie*,*19* (10), 5877. https://doi.org/10.3390/ijerph19105877

[16] Nakao, T., Hung, NT, Nagatoshi, M. a Morishita, H. (2012). Základná štúdia o zakrivenej skladanej dipólovej anténe. *Zborník z medzinárodného sympózia IEEE o anténach a šírení signálu v roku 2012*, 1-2. https://doi.org/10.1109/APS.2012.6349370

[17] Wang, JJH (2006). Širokopásmové všesmerové antény pre prilbu.*Medzinárodné sympózium spoločnosti IEEE Antény a šírenie signálu 2006*, 2129-2132. https://doi.org/10.1109/APS.2006.1711004

[18] Lee, AK, Choi, HD, Lee, HS a Pack, JK (2002). Veľkosť ľudskej hlavy a charakteristiky SAR pre vystavenie slúchadlám. *Časopis ETRI*,*24*(2), 176 – 179. https://doi.org/10.4218/etrij.02.0202.0202

[19] Jovanović, BD, Stanković, BV, Cvetković, NN, Krstić, DD a Vuckovic, D. (2019). Vplyv ľudského veku na množstvo absorbovanej energie z mobilného telefónu. *COMPEL - Medzinárodný časopis pre výpočty a matematiku v elektrotechnike a elektronike*, *38*(5), 1465-1479.
https://doi.org/10.1108/COMPEL-12-2018-0511

[20] Štúdio mikrovlnných rúr CST. (2012).*Verzia 2012*.Technológia počítačovej simulácie.

[21] Mortazavi, SMJ, Paknahad, M., Khaleghi, I. a Eghlidospour, M. (2018). Vplyv rádiofrekvenčných elektromagnetických polí (RF-EMF) z mobilných telefónov na uvoľňovanie niklu z ortodontických konzol: Štúdia in vitro. *Medzinárodná ortodoncia*,*16*(3), 562 – 570. https://doi.org/10.1016/j.ortho.2018.06.013

[22] Úradný vestník RS. (2009).*Nariadenie o limitoch vystavenia neionizujúcemu žiareniu*.

[23] IEEE. (2006).*Norma IEEE pre úrovne bezpečnosti týkajúce sa vystavenia ľudí rádiofrekvenčným elektromagnetickým poliam, 3 kHz až 300 GHz*((C95.1-2005). https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2006.99501

[24] Yee, KS (1966). Numerické riešenie počiatočných okrajových úloh s použitím Maxwellových rovníc v izotropných prostrediach.*IEEE Transactions on Antény a šírenie, 14*, 302 – 307.https://doi.org/10.1109/TAP.1966.1138693

[25] Zygote Media Group, Inc. (2025).*Online vizualizér 3D anatómie ZygoteBody*. zygotebody.com

[26] Hasgall, PA, Di Gennaro, F., Baumgartner, C., Neufeld, E., Lloyd, B., Gosselin, MC, Payne, D., Klingenböck, A. a Kuster, N. (2022). Databáza IT'IS pre tepelné a elektromagnetické parametre biologických tkanív (verzia 4.1).https://doi.org/10.13099/VIP21000-04-1
[27] OSHA. (2023).*Osobné ochranné prostriedky*.
[28] Bullard. (2011).*Používateľská príručka pre priemyselnú ochranu hlavy*.
[29] Globálne zdroje. (nd).*Bezdrôtový video terminál na prilbu*.
[30] BesoVideo Co. Ltd. (26. januára 2021).*Druhy prilieb/ ochranných prilieb 4G/5G/WiFi/GPS kamier DVR, všetky VMS/Smart Eye*.
[31] Sabet, M. a Soleimani, H. (2014). Mechanické a elektrické vlastnosti polyetylénu s nízkou hustotou plneného uhlíkovými nanotrubicami.*Séria konferencií IOP: Materiálové vedy a inžinierstvo*,*64*, 012001. https://doi.org/10.1088/1757-899X/ 64/1/012001
[32] Profesionálne plasty. (nd).*Elektrické vlastnosti plastových materiálov*.
[33] Passador, FR, de Faria, PV, Backes, EH a kol. (2017). Tepelné, mechanické a elektromagnetické vlastnosti kompozitov LLDPE/PANI.*Bulletin o polyméroch*,*74*, 2701-2717. https:// doi.org/10.1007/s00289-016-1862-5
[34] Toro, J. a Choukiker, YK (2017). Návrh a analýza meandrovej PIFA antény so systémom MIMO pre mobilné vreckové zariadenie.*Zborník z medzinárodnej konferencie o trendoch v elektronike a informatike (ICEI) 2017*, 1061-1065.https://doi.org/10.1109/ICOEI.2017.8300872
[35] IEEE (2002),*C95.3-2002 - Odporúčaný postup IEEE pre merania a výpočty elektromagnetických polí rádiových frekvencií s ohľadom na vystavenie ľudí týmto poliam, 100 kHz – 300 GHz*. https://doi.org/10.1109/ IEEESTD.2002.94226

Kontaktné informácie:

Vladimír STANKOVIČ, PhD, docent
(korešpondujúci autor)
Univerzita v Niši, Fakulta bezpečnosti práce,
Čarnojevića 10a, 18000 Niš, Srbsko
E-mail: vladimir.stankovic@znrfak.ni.ac.rs

Dejan JOVANOVIĆ, PhD, odborný asistent
Univerzita v Niši, Elektrotechnická fakulta, A.
Medvedeva 14, 18000 Niš, Srbsko
E-mail: dejan.jovanovic@elfak.ni.ac.rs

Anđela JEVTIĆ, doktorand, Research Trainee
University of Niš, Fakulta bezpečnosti práce,
Čarnojevića 10a, 18000 Niš, Srbsko
E-mail: andjela.jevtic@znrfak.ni.ac.rs

Miomír RAOS, PhD, riadny profesor University of Niš, Fakulta bezpečnosti práce, Čarnojevića 10a, 18000 Niš, Srbsko
E-mail: miomir.raos@znrfak.ni.ac.rs

Dragana ŽIVALJEVIĆ, PhD, odborný asistent
Univerzita v Niši, Elektrotechnická fakulta, A.
Medvedeva 14, 18000 Niš, Srbsko
E-mail: dragana.zivaljevic@elfak.ni.ac.rs