

PRIJAVA TEME DOKTORSKOG RADA

Ime i prezime studenta:	Ante Kapetanović
Matični broj studenta:	953-2019
Ime i prezime mentora:	Dragan Poljak
Poslijediplomski doktorski studij:	Elektrotehnika i informacijska tehnologija
Znanstveno polje/grana:*	Elektrotehnika/elektronika
Predloženi naslov doktorskog rada (hrvatski):	Napredna metoda usrednjavanja dozimetrijskih veličina na površini zakrivljenih dijelova tijela
Predloženi naslov doktorskog rada (engleski):	Advanced Method for Assessment of Averaged Dosimetric Quantities on Surface of Non-Planar Body Parts
Jezik pisanja doktorskog rada:	engleski

Izjavljujem da sam položio/la sve propisane ispite, kvalifikacijski doktorski ispit te da imam objavljen minimalno jedan znanstveni rad u zborniku radova znanstvenog skupa iz područja teme doktorata s međunarodnom recenzijom, a što je uvjet za prijavu teme doktorskog rada. Predloženi prijedlog teme doktorskog rada pripremio/la sam u skladu s Naputkom.

Izjavljujem s punom odgovornošću da postupak stjecanja akademskog stupnja doktora znanosti nisam pokrenuo/la ni u jednoj drugoj ustanovi.

U Splitu, _____

_____ *vlastoručni potpis doktoranda*

Privitak:

- 1. Prijedlog teme doktorskog rada*
- 2. Kratak životopis pristupnika*
- 3. Popis i preslik objavljenih znanstvenih radova pristupnika iz područja predložene teme doktorskog rada*
- 4. Popis svih objavljenih radova pristupnika iz područja predložene teme doktorskog rada*
- 5. Potvrda mentora da su objavljeni radovi pristupnika iz područja istraživanja doktorskog rada*
- 6. Potvrda o sudjelovanju pristupnika u znanstveno-istraživačkim projektima*
- 7. Prijepis ocjena s poslijediplomskog studija*
- 8. Preslik zapisnika o kvalifikacijskom doktorskom ispitu*
. Prema potrebi može se dodatno navesti i značajan doprinos u drugom znanstvenom polju/grani.

PRIJEDLOG TEME DOKTORSKOG RADA

Naslov doktorskog rada

Napredna metoda usrednjavanja dozimetrijskih veličina na površini zakrivljenih dijelova tijela

(eng. *Advanced Method for Assessment of Averaged Dosimetric Quantities on Surface of Non-Planar Body Parts*)

1. Motivacija

Proliferacija podatkovno intenzivnih osobnih, bežičnih komunikacijskih uređaja dovela je do potrebe za proširenjem frekvencijskog spektra preko područja visokih mikro u područje milimetarskih valova [1]. Pобоljšanja komunikacijskih performansi ostvarena su povećanim kapacitetom kanala i smanjenom mrežnom latencijom zahvaljujući razvoju pete generacije (5G) standarda za širokopojasne mobilne mreže [2]. Ključne značajke 5G standarda su agregacija nositelja, MIMO (eng. *multiple input multiple output*) tehnologija, formiranje snopa (eng. *beamforming*), itd., uz već spomenuto proširenje frekvencijskog spektra [3]. Upravo potonje budi sve veći interes ali i zabrinutost opće populacije za potencijalne negativne biološke učinke uzrokovane izloženosti poljima na visokim radio frekvencijama [4].

Općenito, elektromagnetsko (EM) zračenje nastaje zbog periodičnih izmjena električnog i/ili magnetskog polja u prostoru (tzv. valna teorija). Broj sinkroniziranih oscilacija komponenti EM polja u jedinici vremena definira frekvenciju koja je obrnuto proporcionalna veličina valnoj duljini. EM spektar je raspon valnih duljina EM valova i pripadne im energije. EM zračenje radio-frekvencijskog spektra (3-300 GHz), karakteristično za mobilne komunikacije trenutnog i nadolazećih mrežnih standarda, klasificira se kao neionizirajuće jer energija pojedinog fotona (kvant EM energije u tzv. korpuskularnoj teoriji) biva nekoliko redova veličine niža od razine potrebne za ionizaciju bioloških molekula (> 10 eV) [5]. Dakle, u ovom slučaju, EM energija nije dovoljna za raskid ionskih, vodikovih ili van der Waalsovih veza između molekula unutar stanica [6]. Međutim, interakcija apsorbiranih EM valova unutar tkiva za posljedicu ima prijenos kinetičke energije na slobodne polarne molekule uzrokujući njihovo intenzivnije "vibriranje". Ovakav tip molekularne agitacije popraćen je povećanjem temperature promatranog okolnog tkiva unutar kojeg se polarne molekule nalaze. Također, valja napomenuti da postoje i dokazi o netoplinskim učincima karakterističnim za vrlo niske frekvencije polja (< 100 MHz) koji se manifestiraju kroz promjene u aktivnosti staničnih membrana i neselektivnih kanala, transmembranskih potencijala i staničnog ciklusa [7]. Kako u radio-frekvencijskom spektru, za razliku od područja niskih frekvencija, ove pojave potencijalno mogu biti opisane samo unutar okvira termodinamike, nisu uvrštene u temeljna načela djelovanja neionizirajućeg EM zračenja na tkivo [8] te posljedično nisu uključena u razmatranje u ovom prijedlogu.

Većina potrošačke elektronike spada u radio-frekvencijski dio EM spektra temeljeći se na uslugama komunikacije i bežičnog prijenosa informacija, a odnedavno u većem opsegu, i na bežičnom prijenosu energije [9]. Kako bi se ostvario visoki stupanj zaštite od potencijalnih štetnih učinaka na zdravlje, razna međunarodna tijela periodično postavljaju ograničenja izloženosti koja ovise o

frekvenciji i scenariju izloženosti za kratkoročna i dugotrajna, kontinuirana i diskontinuirana radio-frekvencijska EM polja. ICNIRP (eng. *International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection*) i IEEE/ICES (eng. *Institute of Electrical and Electronics Engineers/International Committee on Electromagnetic Safety*), organizacije od značaja za EU, propisuju smjernice [10], odnosno standarde [11], kako za radnike u ograničenom okruženju tako i za opću populaciju. Ograničenja su izvedena temeljeći se na relevantnoj znanstvenoj literaturi koja se odnosi na učinke izloženosti EM polja u području radio-frekvencija na biološke sustave i tkiva a klasificirani su kao potencijalno štetna. Granica temperaturnog porasta od 1 °C kao rezultat izloženosti u daljinskom polju definirana je kao usrednjena vrijednost uzimajući u obzir volumen čitavog tijela. Iako nije dokazano da temperaturni porast iznad 1 °C predstavlja štetni učinak na zdravlje pojedinca, definiran je kao gornja granica jer aktivira termoregulacijske reakcije unutar tijela [12]. U slučaju lokalne izloženosti, temperaturni porast je ograničen na 2 odnosno 5 °C, ovisno o normotemperaturi izloženog tkiva. Postavljanje ovih vrijednosti je temeljeno na eksperimentalnim studijama na ljudima [13] s obzirom na činjenicu da do kožnih oštećenja i deformacija može doći pri temperaturi od 41-43 °C [14] pri čemu se vjerojatnost i ozbiljnost oštećenja povećavaju s produljenjem perioda izloženosti [10]. Na ove granice, konzervativno identificirane kao prag štetnih učinaka na zdravlje, se potom primjenjuju redukcijski faktori koji dodatno uzimaju u obzir varijabilnost značajki pojedinaca kao i varijacije u postavkama izloženosti, okolišu, itd. Tako izvedene vrijednosti su definirane kao temeljna ograničenja i odnose se na fizikalne dozimetrijske EM veličine, vršne ili prosječne u vremenu i prostoru, u dobroj korelaciji s temperaturnim porastom. Kako bi se olakšala procjena izloženosti u situacijama u kojima je dozimetrijska analiza neprikladna, izvedene su referentne razine pod najgorim mogućim uvjetima izloženosti kako bi se postigao visok stupanj konzervativnosti i tako osigurao praktičniji način dokazivanja usklađenosti sa smjernicama odnosno standardima [15]. Države i lokalne zajednice potom samostalno propisuju mjere zaštite temeljeći se na preporukama odabranih internacionalnih smjernica i standarda. U RH je trenutno na snazi Pravilnik o zaštiti od elektromagnetskih polja Ministarstva zdravstva iz 2014. godine [16] s izmjenama i dopunama iz 2019. godine [17].

IEEE standard i ICNIRP smjernice za ograničavanje izloženosti EM poljima do 300 GHz su ažurirani redom 2019. i 2020. ponajprije kako bi pomirili međusobna odstupanja i eliminirali nedosljednosti pri prijelaznoj frekvenciji za temeljna ograničenja [18]. Naime, s obzirom na dubinu prodiranja EM valova, temeljna ograničenja na nižim frekvencijama su volumno usrednjena i definirana kao specifična razina apsorpcije (eng. *specific absorption rate*, SAR) – brzina kojom ljudsko tijelo apsorbira energiju po jedinici mase, definirana kao snaga apsorbirana u masi tkiva (obično 10 g). S druge strane, na višim frekvencijama, oko 90% ukupne snage se apsorbira unutar prvih nekoliko mm izloženog tkiva (8 mm na 6 GHz i 0.81 mm na 30 GHz [19]). Zbog toga je najznačajnija tehnička promjena uvođenje gustoće apsorbirane/epitelne snage (eng. *absorbed power density*, APD), kao temeljnog ograničenja lokalizirane izloženosti iznad 6 GHz u stacionarnom stanju. Studije bazirane na toplinskom modeliranju [20] i analitičke studije [21] sugeriraju da u rasponu od 6 do 30 GHz, izloženost na kvadratnom prosječnom području od 4 cm², koje odgovara površini prednje strane volumena u obliku kocke od 10 g za usrednjavanje SAR-a, dobro korelira s lokalnim maksimalnim porastom temperature (Pearsonov koeficijent korelacije > 0.7 [22]). Odgovarajuće referentne razine su također redefinirane u smislu gustoće upadne snage (eng. *incident power density*, IPD) usrednjene na istoj površini kao i APD ali uz pretpostavku slobodnog prostora kao praktičan način prikazivanja

usklađenosti s propisanim ograničenjima. Kako bi se u obzir uzeo koncentrirani obris na izloženoj koži zbog formacije uskog snopa iznad 30 GHz, usrednjavanje APD-a i IPD-a se dodatno provodi na $1 \times 1 \text{ cm}^2$ uz primjenu relaksacije ograničenja za 2 puta [21].

U ažuriranim ICNIRP smjernicama [10] i IEEE standardu [11], usvojene su dvije definicije APD-a, obje izvedene iz Poyntingovog teorema. Prva definicija APD-a predstavljena je kao gustoća transmitirane snage (eng. *transmitted power density*, TPD) usrednjena na kontrolnoj površini tkiva [23]. TPD je u svakoj točki kontrolne površine definiran kao linijski integral produkta SAR-a i gustoće izloženog tkiva do dubine iznad one u kojoj je većina EM snage apsorbirana ($> 86\%$) [24]. U drugoj definiciji, APD se određuje kao usrednjeni tok gustoće snage (realni dio vremenski usrednjenog Poyntingovog vektora) na kontrolnoj površini. Prema teoremu o divergenciji, definicije APD-a su ekvivalentne ako je površina koja okružuje izloženi volumen tkiva zatvorena uz uvjet nepostojanja aktivnih izvora unutar ovog volumena. Matematički, definicija IPD-a je identična definiciji APD-a preko Poyntingovog vektora uz razliku što se u slučaju IPD-a u obzir uzimaju uvjeti slobodnog prostora – upadno polje umjesto polja apsorbiranog na površini. Iako je valjanost APD-a i IPD-a utvrđena kroz računalne i eksperimentalne studije [25], još uvijek postoje dvosmislenosti u pogledu matematičkog opisa i fizičke interpretacije, računalnih tehnika usrednjavanja, korištenih modela ljudskog tijela i pripadnih dielektričnih parametara korištenih prilikom EM dozimetrijske analize. Veliki problem je i procjena APD-a i IPD-a na zakrivljenim dijelovima tijela s polumjerom zakrivljenosti usporedivim s valnom duljinom upadnog EM polja. U ovim situacijama ravna kontrolna ploha za usrednjavanje predstavlja grubu aproksimaciju i potencijalno dovodi do podcjenjivanja ekstrahiranih dozimetrijskih veličina [26].

Točnost dielektričnih svojstava ljudskog tkiva bitna je za procjenu jakosti induciranog polja. Međutim, pri visokim frekvencijama, veću ulogu igra varijabilnost dimenzija i morfologija izloženog tkiva [27]. Naime, debljina kože je iznimno bitan faktor za izloženost milimetarskim frekvencijama jer direktno određuje količinu slobodnih polarnih molekula koje indirektno utječu na apsorpciju polja. Od iznimnog značaja za dozimetrijsku analizu je i sami oblik izloženog tkiva koji se u većini literature aproksimira ravnom plohom korištenjem jednoslojnih [28, 29, 30] ili višeslojnih [4, 31, 27, 32, 33, 34] modela. Ovakav pristup, prihvaćen i u ICNIRP smjernicama i IEEE standardu, može dovesti do grubih pogreški u situacijama izloženosti dijelova tijela izražene zakrivljenosti i drugim nepravilnostima u morfološkim obilježjima (za ilustraciju, izloženost prsta ili uha prilikom telefonskog razgovora). Glavna motivacija ove doktorske disertacije temeljito je istraživanje utjecaja geometrijskih značajki tkiva složene površinske morfologije na vrijednost ekstrahiranih vrijednosti APD-a i IPD-a iznad 6 GHz. Valja naglasiti da korištenje numeričkih tehnika temeljenih na konačnim diferencijama povlači i potrebu korištenja vokseliziranih modela ljudskog tijela. Ovakvi modeli učestalo dovode do aproksimacijskih pogrešaka i čine dozimetrijsku analizu manje preciznom. Korištenje numeričkih tehnika baziranih na konačnim i rubnim elementima (ili analitičkih tehnika, kada je to moguće) osigurava eliminaciju numeričkih greški i šumova ali zahtjeva kompleksne metode za ekstrakciju površinski usrednjenih vrijednosti. Stoga, druga motivacija je razvoj numeričkog integratora za prostorno usrednjavanje toka snage bez obzira na ishodišnu numeričku/analitičku tehniku korištenu prilikom proračuna EM polja. Konačno, automatsko otkrivanje područja tzv. vruće točke (eng. *hot-spot*) izložene površine tkiva proizvoljne geometrije je također od iznimnog značaja s

obzirom na male dimenzije antena korištenih u neposrednoj blizini ljudskog tijela i potencijalno heterogene raspodjele EM polja na površini anatomske modele.

2. Pregled dosadašnjih istraživanja

Otkako je u prvoj polovici 20. stoljeća puštena u rad i počela s emitiranjem prva komercijalna radijska postaja, u javnosti postoji interes za procjenu izloženosti ljudi radio-frekvencijama [35]. Ozbiljni napor u znanstvenom istraživanju interakcije EM valova u radio-frekvencijskom spektru i ljudskog tkiva pokrenuti su tijekom 20-ih godina prošlog stoljeća s obzirom na proširenu medicinsku primjenu dijatermije – metode terapijskog zagrijavanja tkiva [36].

Početkom 50-ih godina prošlog stoljeća, Ministarstvo obrane SAD-a pustilo je u rad veći broj radijskih odašiljača radi testiranja naprednog korištenja bežičnih komunikacija i radarskih sustava u vojne svrhe. Kako je većina odašiljača radila u režimu maksimalne izlazne snage u neposrednoj blizini osoblja, postavlja se pitanje mogućih štetnih učinaka na zdravlje. Kao odgovor, pokrenut je tzv. *Tri-Service Program* (1956-1960.) koji je za glavni cilj imao konačnu znanstvenu potkrijepljenu potvrdu utjecaja EM polja na ljudski organizam [37].

Iako su istraživanja u ovom području tijekom 70-ih godina prošlog stoljeća dovedena na znatno višu razinu kvalitete [38], među općom populacijom raslo je nepovjerenje zbog sve većeg broja bežičnih elektroničkih uređaja koji rade u neposrednoj blizini ljudskog tijela a čija je sigurnost upitna. Zbog kroničnog nedostatka konkretnih ograničenja i propisa definiranih na temelju rigorozno provjerenih znanstvenih činjenica, pojavljivao se i sve veći broj kontroverznih tvrdnji i stavova o sprezi EM polja i ljudskog tijela. S obzirom na to, objavljen je niz studija baziranih na računalnoj dozimetriji, uglavnom razmatrajući izloženost ravnim valovima s obzirom na stanje tehnologije u to vrijeme, što kulminira i objavom prvog priručnika sponzoriranog od strane Zračnih snaga SAD-a [39]. Prvi skup službenih sigurnosnih standarda u SAD-u objavljen je tijekom kasnih 60-ih godina prošlog stoljeća iz kojih proizlazi IEEE obitelj standarda za sigurnosne razine s obzirom na izloženost ljudi radio-frekventnim poljima u rasponu do 300 GHz (C95.1-x, gdje x odgovara godini izdanja). Rana ograničenja su se izražavala kroz gustoću snage upadne na tijelo modelirano kanonskim geometrijama [40]. Tijekom narednih desetljeća, došlo je do razvoja niza međunarodnih, često neovisnih, regulatornih tijela, uključujući Američki nacionalni institut za standarde (ANSI), Federalnu komisiju za komunikacije (FCC), ICNIRP, IEEE/ICES, itd.

Tijekom posljednjeg desetljeća, istraživanja su se barem udvostručila na svim frontama: od eksperimentalnih preko epidemioloških do dozimetrijskih/tehničkih studija. Ipak, najveći napredak vidljiv je u kvaliteti i broju objavljenih studija provedenih u računalnim dozimetrijskim istraživanjima, čija je glavna ideja realizacija preciznih simulacija na visokim frekvencijama u bliskom polju [34]. U većini studija, pokazano je da su učinci zagrijavanja dobro su povezani s količinom snage EM polja koju apsorbira biološko tkivo [41]. Međutim, s nadolazećom masovnom implementacijom 5G mrežnog standarda, bežične mreže će biti heterogene u smislu frekvencije i pokrivenosti. Osim već postojećih pojaseva ispod 6 GHz (npr. raspon ispod 1 GHz koji podržava širokopojasnu pokrivenost, raspon 3.3-4.2 GHz koji podržava većina davatelja komunikacijskih usluga, itd.), planira se i uvođenje malih ćelija u rasponu 24-28 GHz [42] ali se istodobno posvećuje velika pozornost frekvencijama oko 60 GHz [43]. Na ovim je frekvencijama apsorpcija u ljudskom tijelu uglavnom površinska zbog iznimno male dubine prodiranja EM valova [3].

Na pitanje koja je odgovarajuća metrika izloženosti u rasponu 1-10 GHz – SAR ili IPD, raspravljalo se u dvije studije iste istraživačke skupine korištenjem 1-D ravnog modela [44] i složenih modela ljudskog tijela [45]. Numerički rezultati pokazuju da maksimalni porast temperature na površini bolje korelira s vršnim 10-g SAR-om do 6 GHz u usporedbi s IPD-om. S druge strane, značajno bolju korelaciju ostvaruje IPD iznad 6 GHz. Uzimajući u obzir kombinirane zaključke iz obje studije, autori sugeriraju da bi prijelazna frekvencija trebala biti postavljena na 6 GHz. Naknadno, u [18], pokazano je postojanje fizikalno neopravdanih diskontinuiteta u maksimalnoj snazi zračenja pri prijelazu sa SAR-a na IPD. Sam prijelaz implicira da bi uređaji trebali koristiti znatno manju snagu zračenja (reda nekoliko dB) kako bi postigli usklađenost iznad 6 GHz. Slični rezultati su dobiveni i u opsežnoj numeričkoj studiji [46] koristeći realistične izvore i scenarije izloženosti. Sustavno je razmatran utjecaj parametara kao što su frekvencija, veličina niza, topologija niza, udaljenost od antene do tijela i raspon usmjeravanja snopa te je uspoređen s mjerenim podacima. Zaključak je da je potrebno globalno usklađivanje granica izloženosti iznad 6 GHz kako bi se izbjeglo neopravdano smanjenje maksimalne snage prijenosa 5G korisničke opreme u usporedbi s prethodnim generacijama.

Prethodne tvrdnje su potvrđene u neovisnoj studiji [24] pri čemu se, umjesto IPD-a, kao relevantno temeljno ograničenje koristi prostorno usrednjeni TPD. Prednost korištenja TPD-a leži u činjenici što se uzima u obzir apsorbirano umjesto upadnog polja te se osigurava mogućnost demonstracije usklađenosti s ograničenjima izloženosti i u području bliskog polja [47]. U [48], provedena je dodatna rasprava o TPD-u kao metrici relevantnoj za ažuriranu verziju ICNIRP smjernica i za nacrt IEEE C95.1 verzije standarda iz 2019. Za jednostavne scenarije izloženosti homogenih modela, usrednjeni TPD se da aproksimirati kao produkt koeficijenta prijenosa izvedenog iz faktora refleksije s vrijednošću usrednjenog IPD-a, dobivenog koristeći apsolutnu vrijednost ili realne komponente vremenski usrednjenog Poyntingovog vektor na ravnini koja predstavlja izloženu površinu modela u slobodnom prostoru.

Studije bazirane na toplinskom modeliranju [20] i analitičkim rješenjima problema EM i toplinske dozimetrije [21] sugeriraju da područje od $2 \times 2 \text{ cm}^2$ ostvaruje blisku aproksimaciju lokalnog maksimalnog porasta temperature s obzirom na prirodu lokaliziranog zagrijavanja izloženog tkiva na frekvencijama iznad 6 GHz. Ovi zaključci su dodatno potkrijepljeni izračunima za realistične scenarije izloženosti [32]. Ovakve dimenzije kvadratnog područja za površinsko usrednjavanje osim toga osiguravaju i dosljednost između lokalnog SAR-a i gustoće apsorbirane snage – površina prednje strane volumena od 10 g u obliku kocke za volumno usrednjavanje SAR-a je približno 4 cm^2 . Bitno je voditi računa da je područje usrednjavanja gustoće apsorbirane snage relevantne za porast temperature ovisno o frekvenciji; potrebna su manja područja usrednjavanja kako se frekvencija povećava zbog suženja snopa upadnih zraka. Stoga je kao dodatni kriterij za frekvencije iznad 30 GHz potrebno odrediti i vršnu gustoću apsorbirane snage usrednjenu na području od $1 \times 1 \text{ cm}^2$, uz uvjet da je dobivena vrijednost najviše 2 puta veća od odgovarajuće vrijednosti za područje usrednjavanja od $2 \times 2 \text{ cm}^2$ [21].

Od posljednjeg izdanja ICNIRP smjernica i IEEE standarda, istraživanje u području računalne dozimetrije uglavnom je usmjereno kako bi dalo odgovor na pitanja ekvivalencije definicija APD-a, odgovarajuće plohe za usrednjavanje te prikladnog definiranja IPD-a (normalne komponente ili magnituda vremenski usrednjenog

Poyntingovog vektora). U [49], dana je kvantitativna usporedba usrednjenih IPD-a i APD-a koji se odnose na izloženost u bliskom polju na frekvencijama u rasponu 6-100 GHz. Analiza se odnosi na okomito upadne EM valove emitirane od strane realističnih izvora (poluvalni dipol i antenski nizovi) na višeslojni ravni model postavljen na udaljenosti u rasponu 2-10 mm. Izvan reaktivne zone bliskog polja, postoji zanemariva razlika između dviju interpretacija IPD-a (unutar 0.7 dB). Razlika između IPD-a dobivenog koristeći normalne komponente ili magnitudu vremenski usrednjenog Poyntingovog vektora u usporedbi s usrednjenim APD-om iznosi 0.9 odnosno 1.4 dB. Unutar reaktivne zone bliskog polja, IPD se pokazao kao neprikladna metrika za procjenu usklađenosti. Konačno, rezultati sugeriraju da sama definicija IPD-a nije značajan čimbenik koji utječe na procjenu izloženosti u usporedbi s drugim čimbenicima poput frekvencije, položaja antene u odnosu na tkivo i dimenzija površine korištene za usrednjavanje gustoće snage. Slični zaključci su izvedeni i u [22] gdje je dodatno provedena sveobuhvatna statistička analiza uz pripadne testove značajnosti. Svi izvedeni zaključci prethodnih studija potvrđeni su naknadno u internacionalnoj komparativnoj studiji [50]. Ova studija pojašnjava glavne uzroke numeričkih pogrešaka u dozimetrijskoj analizi uspoređujući rezultate izračuna 6 međunarodnih laboratorija korištenjem vlastitih numeričkih metoda s različitim modelima tijela i antena. Pojediniosti su izostavljene radi sažetosti ali valja naglasiti da ostvareno slaganje među istraživačkim grupama indicira da su greške numeričkog izračuna dozimetrijske analize uzrokovane definicijom IPD-a tek granične.

Također, kosi upad EM polja na tkivo je tema od posebnog interesa. U [51], autori su pokazali da propusnost transversalno magnetskog upadnog EM vala raste s povećanjem kuta do maksimalnog kuta propusnosti zbog Brewsterovog efekta. U skladu sa studijama [34, 52], pokazano je da okomiti upad odgovara najgorem scenariju lokalne izloženosti. Dodatno, rezultati također ukazuju na to da u rasponu od 6-1000 GHz, TPD snažno korelira s porastom površinske temperature i predstavlja prikladnu veličinu za procjenu EM dozimetrije iznad 6 GHz. U 2021. godini, objavljen je i IEEE vodič za definiciju IPD-a za korelaciju maksimalnog porasta površinske temperature [53] kako bi se razjasnile sve eventualno preostale nejasnoće oko matematičke definicije IPD-a, površine za usrednjavanje ali i mogućnosti praktične uporabe i utjecaja upadnog kuta EM polja. Ovaj vodič uključuje realistične scenarije izloženosti višeslojnih ravnih modela ljudske kože (već predstavljene u [50]) uz različite izvore zračenja, upadne kutove i frekvencije unutar raspona 10-90 GHz na udaljenostima od 2-150 mm. Osim statističke analize, rezultati su verificirani i termografskim mjerenjima. Konačno, izvedena su i tri temeljna zaključka: (i) magnituda površinski usrednjenog IPD-a rezultira najvišim koeficijentima korelacije s temperaturom, međutim, obje definicije snažno koreliraju s porastom temperature za scenarij kvazi-okomitog upada (Pearsonovi koeficijenti korelacije > 0.7 u oba slučaja), (ii) magnituda površinski usrednjenog IPD-a daje bolju procjenu induciranog povećanja temperature od normalne definicije uz graničnu razliku prisutnu isključivo uz pretpostavku uvjeta bliskog polja, i (iii) faktor zagrijavanja (omjer maksimalnog temperaturnog porasta i usrednjene gustoće snage) kao funkcija upadnog kuta pokazuje da normalna definicija IPD-a bolje korelira s maksimalnim porastom površinske temperature u usporedbi s magnitudom jer je manje osjetljiva na varijaciju upadnog kuta; upotreba magnitude rezultira konzervativnijim procjenama izloženosti.

Radna skupina 5 uključena u djelovanje IEEE/ICES tehničkog odbora (eng. *technical committee*, TC) 95 pododbora (eng. *subcommittee*, SC) 6 za EM dozimetrijsko modeliranje uspostavila je dvije različite definicije IPD-a površinski

usrednjenog na evaluacijskoj plohi – kontrolna površina na ozračenoj ravnoj projekciji ljudske kože u slobodnom prostoru [53]. Do danas, većina studija procjene izloženosti bazirana na EM dozimetriji iznad 6 GHz, uključujući i milimetarske valove, koristi ravni ekvivalent jednoslojnog [52, 28, 29, 30, 54] ili višeslojnog [4, 55, 27, 34, 32, 33, 31, 56] modela ljudske kože. Međutim, problem u takvom pristupu je procjena gustoće snage na zakrivljenim dijelovima tijela čiji red veličine polumjera zakrivljenost odgovara valnoj duljini upadnog EM polja [26]. Istraživači u [57] su se na ovaj problem već osvrnuli za raspon frekvencija 900-3700 MHz s obzirom na apsorpciju EM polja u ljudskim šakama. Rezultati usporedbe apsorpcije u ruci u odnosu na standardizirani ravni fantom pokazali su poboljšanja od nekoliko dB. Pretpostavljeni uzrok ovog fenomena je rezonancija ostvarena između izloženih prstiju i EM polja na korištenim frekvencijama s obzirom na dimenziju i oblik. Nadalje, utjecaj zakrivljenosti različitih dijelova tijela modeliranih korištenjem kanonskih geometrija, npr. cilindra ili izduženog cilindra, s radijusima reda veličine nekoliko mm pri milimetarskim valovima istražen je u [26], ali zbog smanjenih dimenzija modela, nije uzeto u obzir površinsko usrednjavanje.

Radna skupina 7 (IEEE/ICES TC 95 SC 6) je okupljena s ciljem unifikacije sheme površinskog usrednjavanja za procjenu APD-a. Osim već postojećih ravnih modela, predložena su i dva kanonska zakrivljena modela: kugla i cilindar. Ovaj prijedlog je izravno motiviran rezultatima studije [58] u kojoj Diao i suradnici predlažu 4 različita pristupa usrednjavanja APD-a na sfernoj i cilindričnoj površini u rasponu od 6-60 GHz te potvrđuju rezultate koristeći realistični model podlaktice. Rezultati istraživanja izloženosti sfernog modela ljudske glave fiksnih dimenzija EM poljima do 100 GHz proizašli iz naše istraživačke skupine pokazuju da površinsko usrednjavanje gustoće upadne snage biva i do 30 % veće od odgovarajućih vrijednosti dobivenih koristeći uobičajenu ravnu kontrolnu plohu. Dodatni doprinos ove studije je i korištenje efikasne Gauss-Legendre numeričke integracijske tehnike koja osigurava točnost i preciznost proračuna i za relativno mali broj točaka proračuna upadnog EM polja.

Naposljetku, od iznimnog značaja je i mogućnost određivanja prostorno usrednjenih dozimetrijskih veličina na složenim konformnim anatomskim modelima – najveća važnost za preciznu dozimetriju na visokim frekvencijama relevantnu za nadolazeće komunikacijske standarde. Upravo ovo je postavljeno kao jedan od najvažnijih ciljeva u ovom dokumentu i doktorskom istraživanju na kojeg se odnosi.

3. Hipoteza

Jedna od glavnih značajki 5G tehnološkog standarda za širokopojasne mobilne komunikacije temelji se na proširenju frekvencijskog pojasa u područje visokih mikro (> 6 GHz) i milimetarskih valova (> 30 GHz). Utjecaj EM polja na ljudsko tijelo pri ovim frekvencijama uglavnom je lokalnog karaktera i manifestira se porastom temperature na površini kože. Iz tog razloga, temeljno ograničenje (i odgovarajuća referentna razina) definirano je kao gustoća apsorbirane (i upadne) snage usrednjena na ograničenom području najveće izloženosti.

Do danas, prilikom dozimetrijske analize, područje usrednjavanja je aproksimirano kao ravna ploha čija je površina funkcija frekvencije. Međutim, pri visokim frekvencijama EM polja čija je valna duljina usporediva s polumjerom zakrivljenosti izloženih dijelova tijela, ravna ploha predstavlja grubu

aproksimaciju i potencijalno dovodi do poddimenzioniranja površinski usrednjenih dozimetrijskih veličina.

Iz ovog razloga, kao temeljna pretpostavka doktorskog istraživanja postavlja se da korištenje zakrivljenih modela nužno dovodi do vrijednosti srednje gustoće snage bliže stvarnim vrijednostima. Kako su prilikom praktičnih scenarija izloženosti u najvećoj ugrozi od površinskog pregrijavanja na lokalnoj skali prsti šake te vanjsko uho i glava, odgovarajući cilindrični ili sferni modeli nameću se kao najprikladniji.

S obzirom da iznimno kompleksne površinske geometrije poput one vanjskog uha ne mogu biti adekvatno opisane kanonskim modelima, javlja se potreba i za korištenjem ekvivalentnih anatomskih modela. Matematički opis zakrivljenosti površine ovakvih modela je moguć isključivo koristeći preciznu numeričku procjenu normalnih jediničnih vektora na površinu. Usrednjavanje gustoće snage je potom moguće parametrizacijom površine i numeričkim pristupom aproksimacije plošnih integrala vektorskog polja.

Dakle, sljedeća pretpostavka je da raspodjela normalnih vektora na površini anatomskih modela uvjetovana morfološkim nepravilnostima, nesimetrijama i eventualnim deformitetima promatranog tkiva, značajno utječe na apsorpciju upadnog EM polja. Za posljedicu, vrijednosti usrednjene gustoće snage potencijalno mogu biti drastično veće u usporedbi s ravnim modelima ali i zakrivljenim modelima simetrične geometrije, ovisno o položaju antene, polarizaciji upadnog polja, i površini integracijske domene.

Otkrivanje ograničenog područja najvećeg temperaturnog porasta na anatomskim modelima nije moguća izravno u usporedbi s ravnim ili zakrivljenim modelima simetričnih geometrijskih karakteristika. S obzirom da će raspodjela apsorbiranih komponenti EM polja biti izrazito heterogena, poglavito u području bliskog polja, potrebno je evaluirati srednju gustoću snage na kompletnoj površini izloženog dijela tijela. Ovakav proces zahtjeva korištenje velikih računalnih resursa posebno kod detaljnih, višeslojnih modela.

Ovo doktorsko istraživanje tako za cilj postavlja i razvoj hibridne metode bazirane na principima strojnog učenja i standardnih numeričkih metoda koje na efikasan način indirektno ostvaruje automatsko otkrivanje prethodno definiranih područja vruće točke – ograničenih područja lokalno povišene temperature u usporedbi s okolinom.

Točnost usrednjavanja bit će osigurana koristeći suvremenu tehnologiju, ideje i značajke iz računalne grafike i računalnog vida prilagođene potrebama dozimetrijske analize. Kako bi se izbjeglo pojednostavljenje prostorne domene na bilo koji način, npr. kanonizacija zakrivljenih područja, zaglađivanje nepravilnih morfoloških značajki, itd., i kako bi se osigurala točna procjena usrednjene gustoće snage, kontrolna površina će biti parametrizirana u odgovarajućem prostoru određenom ortonormalnom bazom izvedenom iz svojstvenih vrijednosti lokalne zakrivljenosti.

Opisani pristup integracije ima i dodatnu pogodnost – neovisnost o ishodišnoj numeričkoj ili analitičkoj metodi proračuna apsorbiranog EM polja na površini modela. Naime, predložena tehnika se oslanja isključivo na vrijednosti izračunate u neorganiziranom skupu točaka uzorkovanih na izloženoj površini modela. Na ovaj način, nakon parametrizacije, integracijska površina može biti funkcionalno

rekonstruirana korištenjem bivarijatne interpolacije s obzirom na bilo koji smjer koji nije dio tangencijalne ravnine. Određivanje raspodjele normalnih vektora je tako svedeno na strojnu preciznost parcijalnim deriviranjem bivarijatnog interpolata po ortogonalnim komponentama tangencijalne ravnine. Tako je eliminirana i potreba za formalnom definicijom prostornih veza između točaka u kojima je definiran integrand, npr. razvoj Voronoijevih dijagrama ili mreže konačnih elemenata, te je osigurana mogućnost korištenja numeričke integracije visoke točnosti, npr. Gaussova kvadratura.

4. Opis i metodologija istraživanja

Razvoj adekvatnih zakrivljenih i anatomskih modela dijelova ljudskog tijela. U prvom dijelu istraživačkog rada provest će se sustavni pregled literature i prikupljanje relevantnih podataka za realizaciju referentnih modela ljudskog tkiva baziranim na sfernoj/cilindričnoj geometriji ili koristeći realistična morfološka obilježja. U većini postojeće literature, modeli tkiva, s obzirom na primjenu i tip dozimetrijske analize za koju se koriste, realiziraju se kao ravni poluprostor sačinjen od jednog ili više slojeva. Najčešće je riječ o 3 sloja koji po širini i dielektričnim svojstvima odgovaraju dvama slojevima kože i masnom potkožnom tkivu [27]. S obzirom na niski udio slobodnih polarnih molekula, prilikom EM dozimetrijske analize iznad 6 GHz, rožnati sloj se klasificira kao odvojeni sloj od epiderme kojoj strukturalno pripada [59]. Sljedeći sloj je sačinjen od epiderme i derme zbog sličnih dielektričnih svojstava i apsorbivnosti EM energije [3]. Treći sloj je adipozno tkivo koje zbog iznimno slabe apsorpcije ostvaruje karakteristike toplinske barijere. Dielektrična svojstva ljudske kože dobivaju se mjerenjem njezine relativne kompleksne permitivnosti koja ovisi o vodljivosti i frekvenciji EM polja apsorbiranog u koži. Rezultati mjerenja kompleksne permitivnosti kože do sada objavljeni u literaturi pokazali su izrazitu korelaciju s tehnikom mjerenja i modelom kože (*in vivo* ili *in vitro*, temperatura kože, položaj na tijelu i debljina različitih slojeva). Tako su primjerice Gabriel i suradnici [60] objavili ekstrapoliranu kompleksnu permitivnost ljudske kože do 110 GHz na temelju mjerenja izvedenih ispod 20 GHz. Nadalje, rezultati koje su prikazali Gandhi i Riazzi [61] na 60 GHz dobiveni su pomoću Debyeovog modela temeljenog na mjerenjima izvedenim koristeći kožu kunića na 23 GHz. Osim toga, brojni istraživači su pokušali precizno utvrditi kompleksnu permitivnost na temelju tehnike slobodnog prostora, *in vivo* mjerenja koaksijalnim sondama, *in vitro* mjerenja refleksije s otvorenim valovodom, itd. Do danas, kao referenca se uzimaju podaci predstavljeni u [60] uglavnom jer se širokodostupne baze dielektričnih i toplinskih parametara [62] baziraju upravo na njima. Potrebno je dakle uzeti u obzir individualiziranu varijabilnost debljine pojedinih slojeva kože te dielektričnih svojstava koje dodatno ovise i o dijelovima tijela izloženim EM poljima. Kod jednostavnih zakrivljenih geometrija (kugla i cilindar), varijacija parametara je moguća primjenom Monte Carlo analize dok je kod anatomskih modela ovakav pristup iznimno računalno zahtjevan. Zato, na temelju dostupne literature, anatomske modeli trebaju biti razvijeni u svrhu postizanja kompatibilnosti s većinom populacije koristeći očekivane vrijednosti dimenzija modeliranog dijela tijela, njegove strukture i anatomije, te vrijednosti dielektričnih parametara od interesa.

Rigorozni proračun fizikalnih veličina za dozimetrijsku analizu. U posljednjem izdanju IEEE standarda [11] i ICNIRP smjernica [10] za sigurnosne razine s obzirom na izloženost ljudi EM poljima do 300 GHz, temeljna ograničenja iznad 6 GHz za situacije lokalne izloženosti u stacionarnom stanju dane su u vidu dvije matematičke definicije gustoće apsorbirane snage na kontrolnoj površini.

Obje definicije su postavljene kao plošni integrali pri čemu se podintegralne funkcije bitno razlikuju. U prvoj definiciji, podintegralna funkcija je skalarno polje dobiveno linijskom integracijom produkta SAR-a i gustoće tkiva po dubini istoga. U drugoj definiciji, podintegralna funkcija je izvedena direktno iz vremenski usrednjenog Poyntingovog vektora i predstavlja vektorsko polje čija je orijentacija određena raspodjelom normalnih vektora promatrane kontrolne površine. Prema teoremu o divergenciji, s obzirom da integracijska površina nije zatvorena, navedene definicije APD-a kako ih definira ICNIRP i IEEE/ICES nisu ekvivalentne. Međutim, s obzirom na iznimno malu dubinu prodiranja EM snage u tkivo (generalno, više od 90% snage na površini je apsorbirano u 1 mm tkiva), konačna usrednjena vrijednost će biti tek neznatno različita na ravnim modelima [63]. S druge strane, raspodjela apsorbiranog EM polja na površini anatomskih modela je iznimno heterogena i teško je predvidjeti fizikalna svojstva površinski usrednjenih vrijednosti. Iz tog razloga je potrebno, koristeći prethodno opisane zakrivljene modele, usporediti vrijednosti dobivene dvjema definicijama APD-a i potvrditi dobivene rezultate referirajući se na postojeće rezultate temeljene na ravnim modelima.

Proračun normala na integracijskim površinama. Kako je spomenuto u opisu druge definicije APD-a, oblik i zakrivljenost kontrolne površine su određeni raspodjelom jediničnih normalnih vektora. Kod kanonskih geometrija zakrivljenih modela, proračun normala je izravan koristeći analitičke izraze u odgovarajućem koordinatnom sustavu (sferni ili cilindrični koordinatni sustav temeljen na ISO 80000-2:2019 konvenciji). S druge strane, kod anatomskih modela, integracijska površina se matematički može opisati kao 2-D Riemannova mnogostrukost (eng. *manifold*) u 3-D Euklidskom prostoru. U svim točkama promatrane površine postoji zasebna tangencijalna ravnina. Pravac u bilo kojoj točki okomit na pripadnu tangencijalnu ravninu sadržava normalni i jedinični normalni vektor proizvoljne orijentacije. Zakrivljenost površine u promatranoj točki se potom može opisati koristeći dvije ravnine koje sadržavaju vektor normale a koje karakterizira najveća i najmanja zakrivljenost krivulje dobivene kao presjek ovih ravnina i kontrolne površine. Zakrivljenost krivulja se dobije izravno iz Frenet-Serret formula kao obrnuto proporcionalna vrijednost polumjera oskulirajućeg kruga – krug koji najbolje lokalno odgovara zakrivljenosti krivulje i dodiruje je u samo jednoj točki. Na temelju svojstvenih zakrivljenosti izvodi se Gaussova zakrivljenost koja omogućuje formalnu definiciju operatora oblika promatrane površine i posljedično njezinu funkcionalnu rekonstrukciju. Bilo koja pravilna i glatka (diferencijabilna) površina može se lokalno izraziti kao graf bivarijantne "funkcije visine" u odnosu na bilo koji z-smjer koji ne pripada tangencijalnom 2-D prostoru. Određivanje tzv. z-smjera je moguće transformacijom originalnog koordinatnog sustava koristeći analizu glavnih komponenti ili faktorsku analizu. Vektor normale tada se računa kao vektorski produkt parcijalne derivacije parametrizirane površine po tangencijalnim komponentama.

Plošna integracija. Prethodno opisani proračun normala ne zahtjeva konstrukciju položajnih veza između točaka u 3-D prostoru u kojem se računa EM polje. Rekonstrukcija parametrizirane površine izvodi se funkcionalno primjenom 3-D interpolacijske tehnike iz čega se direktno izvode normalni vektori po interpoliranoj površini. Prilikom proračuna apsorbiranog polja, potrebno je definirati raspodjelu normalne komponente polja po površini što u je matematičkom smislu određeno skalarnim produktom vektorskog polja jediničnih normala i kompleksnih EM komponenti. Plošni integral vektorskog polja tada se može aproksimirati korištenjem 2-D Gauss-Legendreove kvadrature budući da samo polje (podintegralna funkcija) prolazi parametarskom površinom. Ova

parametarska površina, postavljena okomito na smjer upada, predstavlja projekciju konformne površine u 2-D prostoru i integracijsku domenu. Važno je napomenuti da je konformna površina općenito veća od parametarske (fiksirana na predefiniranu vrijednost). Normalizacija, prilikom proračuna APD-a, se ostvaruje korištenjem vrijednosti površine odgovarajućeg konformnog područja.

5. Očekivani znanstveni doprinos

U skladu s izloženom hipotezom doktorskog istraživanja uz odgovarajući opis i metodologiju, glavni očekivani znanstveni doprinos je realizacija tehnike i pripadnog računalnog alata za efikasno usrednjavanje dozimetrijskih veličina na površini zakrivljenih dijelova ljudskog tijela izloženih EM poljima iznad 6 GHz. Time bi se omogućio uvid u utjecaj geometrijskih obilježja površine tkiva, njegovih morfoloških obilježja, zakrivljenosti i geometrije područja usrednjavanja. Posredno, osigurali bi se i temelji za razvoj referentnih modela ekvivalentnih izloženom tkivu u budućim smjernicama i standardima za ograničenje izloženosti EM poljima do 300 GHz.

Glavni doprinosi ovog rada su sljedeći:

- Razvijen je niz realističnih modela dijelova ljudskog tijela izloženih zračenju poljima iznad 6 GHz kojima se zamjenjuju dosadašnji ravni modeli široko zastupljeni u literaturi u svrhu vjernije aproksimacije zakrivljenih dijelova ljudskog tijela nepravilne strukture čiji je polumjer zakrivljenosti usporediv s valnom duljinom upadnog polja. Radi se o homogenom/slojevitom sfernom i cilindričnom modelu glave te homogenom/slojevitom anatomskom modelu vanjskog uha. Uho je odabrano zbog morfološke složenosti uslijed koje dolazi do izrazito heterogene raspodjele apsorbiranog polja, za razliku od ravnog, sfernog i cilindričnog modela. Također, vanjsko uho predstavlja najizloženiji dio tijela prilikom praktičnih scenarija izloženosti.
- Razvijen je algoritam automatskog otkrivanja područja tzv. vruće točke (eng. *hot-spot*) – ograničeno područje maksimalnog temperaturnog porasta u odnosu na prosječnu temperaturu okoline izvan utjecaja EM polja. Ova tehnika zasniva se na iterativnoj primjeni analize glavnih komponenta (eng. *principal component analysis*, PCA) ili faktorske analize koristeći bilo zakrivljene modele jednostavne geometrije ili anatomske modele transformirane u neorganizirani oblak točaka – komplet 3-D koordinata, gdje svaka koordinata predstavlja jednu točku na površini modela.
- Proveden je proračun usrednjene gustoće apsorbirane i upadne EM snage koristeći rigorozne matematičke definicije temeljene na plošnoj integraciji vektorskog toka gustoće snage kroz kontrolnu površinu proizvoljnog oblika. Kako je temeljni dio podintegralne funkcije plošnog integrala diferencijal elementa integracijske domene, potrebno je odrediti i raspodjelu normalnih vektora na površini modela. Doprinos ove doktorske disertacije je i razvoj napredne, efikasne numeričke tehnike za procjenu plošnog integrala skalarnog i vektorskog polja, u potpunosti neovisne o ishodišnoj EM metodi.

Osim znanstvenog doprinosa, daljnja primjena rezultata istraživanja predložene doktorske disertacije bi ostvarila i:

- potvrdu valjanosti gustoće apsorbirane snage kao temeljnog ograničenja za procjenu temperaturnog porasta za lokalnu izloženost zakrivljenih dijelova tijela iznad 6 GHz u stacionarnom stanju;

- uvid o efikasnosti zakrivljenih i anatomskih modela za EM dozimetriju pri visokim frekvencijama kao temelj buduće rasprave i djelatnosti radne grupe 7 pod IEEE/ICES TC 95 SC 6 za EM dozimetrijsko modeliranje; i
- temelje za diskusiju o realizaciji zakrivljenih modela kao referentnih za buduće generacije ICNIRP smjernica i IEEE standarda.

6. Bibliografski podaci o relevantnoj literaturi

- [1] T. S. Rappaport, S. Sun, R. Mayzus, H. Zhao, Y. Azar, K. Wang, G. N. Wong, J. K. Schulz, M. Samimi, and F. Gutierrez. "Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: It will work!" *IEEE Access*, 1:335-349, 2013.
- [2] J. G. Andrews, S. Buzzi, W. Choi, S. V. Hanly, A. Lozano, A. C. K. Soong, and J. C. Zhang. "What will 5G be?" *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 32(6):1065-1082, 2014.
- [3] M. Zhadobov, N. Chahat, R. Sauleau, C. Le Quement, and Y. Le Drean. "Millimeter-wave interactions with the human body: state of knowledge and recent advances." *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 3(2):237-247, 2011.
- [4] T. Wu, T. S. Rappaport, and C. M. Collins. "Safe for generations to come: Considerations of safety for millimeter waves in wireless communications." *IEEE Microwave Magazine*, 16(2):65-84, 2015.
- [5] R. F. Cleveland and J. L. Ulcek. "Questions and answers about biological effects and potential hazards of radio-frequency electromagnetic fields." Federal Communication Commission, Office of Engineering and Technology Bulletin, 56, 1999.
- [6] Y. Le Dréan, Y. S. Mahamoud, Y. Le Page, D. Habauzit, C. Le Quément, M. Zhadobov, and R. Sauleau. "State of knowledge on biological effects at 40-60 GHz." *Comptes Rendus Physique*, 14(5):402-411, 2013.
- [7] S. Romanenko, R. Begley, A. R. Harvey, L. Hool, and V. P. Wallace. "The interaction between electromagnetic fields at megahertz, gigahertz and terahertz frequencies with cells, tissues and organisms: Risks and potential." *Journal of The Royal Society Interface*, 14(137):20170585, 2017.
- [8] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). "Principles for non-ionizing radiation protection." *Health Physics*, 118(5):477-482, 2020.
- [9] A. Hirata, Y. Diao, T. Onishi, K. Sasaki, S. Ahn, D. Colombi, V. De Santis, I. Laakso, L. Giaccione, W. Joseph, E. A. Rashed, W. Kainz, and J. Chen. "Assessment of human exposure to electromagnetic fields: Review and future directions." *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 63(5):1619-1630, 2021.
- [10] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). "Guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz)." *Health Physics*, 118:483-524, 2020.
- [11] IEEE standard for safety levels with respect to human exposure to electric, magnetic, and electromagnetic fields, 0 Hz to 300 GHz. IEEE Std C95.1-2019 (Revision of IEEE Std C95.1-2005/ Incorporates IEEE Std C95.1-2019/Cor 1-2019), 2019.
- [12] A. M. J. van den Heuvel, B. J. Haberley, D. J. R. Hoyle, N. A. S. Taylor, and R. J. Croft. "The independent influences of heat strain and dehydration upon cognition." *European Journal of Applied Physiology*, 117:1025-1037, 2017.

- [13] T. J. Walters, D. W. Blick, L. R. Johnson, E. R. Adair, and K. R. Foster. "Heating and pain sensation produced in human skin by millimeter waves: Comparison to a simple thermal model." *Health Physics*, 78:259-267, 2000.
- [14] M. W. Dewhirst, B. L. Viglianti, M. Lora-Michiels, M. Hanson, and P. J. Hoopes. "Basic principles of thermal dosimetry and thermal thresholds for tissue damage from hyperthermia." *International Journal of Hyperthermia*, 19(3):267-294, 2003.
- [15] A. Hirata, D. Funahashi, and S. Kodera. "Setting exposure guidelines and product safety standards for radio-frequency exposure at frequencies above 6 GHz: Brief review." *Annals of Telecommunications*, 74:17-24, 2019.
- [16] Ministarstvo zdravstva RH. "Pravilnik o zaštiti od elektromagnetskih polja," online: https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2014_12_146_2740.html (pristupljeno 28.2.2022.), 2014.
- [17] Ministarstvo zdravstva RH. "Pravilnik o izmjenama i dopunama pravilnika o zaštiti od elektromagnetskih polja," online: https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2019_03_31_627.html (pristupljeno 28.2.2023.), 2019.
- [18] D. Colombi, B. Thors, and C. Törnevik. "Implications of emf exposure limits on output power levels for 5G devices above 6 GHz." *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 14:1247-1249, 2015.
- [19] K. Sasaki, M. Mizuno, K. Wake, and S. Watanabe. "Monte Carlo simulations of skin exposure to electromagnetic field from 10 GHz to 1 THz." *Physics in Medicine & Biology*, 62:6993-7010, 2017.
- [20] Y. Hashimoto, A. Hirata, R. Morimoto, S. Aonuma, I. Laakso, K. Jokela, and K. Foster. "On the averaging area for incident power density for human exposure limits at frequencies over 6 GHz." *Physics in Medicine & Biology*, 62(8):3124-3138, 2017.
- [21] K. R. Foster, M. C. Ziskin, and Q. Balzano. "Thermal response of human skin to microwave energy: A critical review." *Health Physics*, 111(6):528-541, 2016.
- [22] V. De Santis, A. Di Francesco, G. Bit-Babik, J. Roman, and W. El Hajj. "On the correlation between incident power density and temperature increase for exposures at frequencies above 6 GHz." *IEEE Access*, 10:82236-82245, 2022.
- [23] A. Hirata. "Review on human dosimetry for radio-frequency exposure above 6 GHz - international exposure standards." *In proceedings of Asia-Pacific Microwave Conference*, 681-683, 2018.
- [24] D. Funahashi, A. Hirata, S. Kodera, and K. R. Foster. "Area-averaged transmitted power density at skin surface as metric to estimate surface temperature elevation." *IEEE Access*, 6:77665-77674, 2018.
- [25] A. Hirata, S. Kodera, K. Sasaki, J. Gomez-Tames, I. Laakso, A. Wood, S. Watanabe, and K. R. Foster. "Human exposure to radio-frequency energy above 6 GHz: Review of computational dosimetry studies." *Physics in Medicine & Biology*, 66(8):08TR01, 2021.
- [26] G. Sacco, Z. Haider, and M. Zhadobov. "Exposure levels induced in curved body parts at mmWaves." *IEEE Journal of Electromagnetics, RF and Microwaves in Medicine and Biology*, 6(3):413-419, 2022.
- [27] M. C. Ziskin, S. I. Alekseev, K. R. Foster, and Q. Balzano. "Tissue models for RF exposure evaluation at frequencies above 6 GHz." *Bioelectromagnetics*, 39(3):173-189, 2018.

- [28] T. Nakae, D. Funahashi, J. Higashiyama, T. Onishi, and A. Hirata. "Skin temperature elevation for incident power densities from dipole arrays at 28 GHz." *IEEE Access*, 8:26863-26871, 2020.
- [29] D. Poljak and M. Cvetković. "Assessment of absorbed power density at the surface of flat lossy medium in GHz frequency range: A case of Hertz dipole." *In proceedings of International Conference on Smart and Sustainable Technologies*, 1-4, 2020.
- [30] M. Ziane, R. Sauleau, and M. Zhadobov. "Antenna/body coupling in the near-field at 60 GHz: Impact on the absorbed power density." *Applied Sciences*, 10(21), 2020.
- [31] K. R. Foster, M. C. Ziskin, Q. Balzano, and A. Hirata. "Thermal analysis of averaging times in radio-frequency exposure limits above 1 GHz." *IEEE Access*, 6:74536-74546, 2018.
- [32] W. He, B. Xu, M. Gustafsson, Z. Ying, and S. He. "RF compliance study of temperature elevation in human head model around 28 GHz for 5G user equipment application: Simulation analysis." *IEEE Access*, 6:830-838, 2018.
- [33] E. Carrasco, D. Colombi, K. R. Foster, M. Ziskin, and Q. Balzano. "Exposure assessment of portable wireless devices above 6 GHz. Radiation Protection Dosimetry," 183(4):489-496, 2019.
- [34] Y. Diao, K. Li, K. Sasaki, S. Kodera, I. Laakso, W. El Hajj, and A. Hirata. "Effect of incidence angle on the spatial-average of incident power density definition to correlate skin temperature rise for millimeter wave exposures." *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 63(5):1709-1716, 2021.
- [35] K. R. Foster, M. C. Ziskin, and Q. Balzano. "Three quarters of a century of research on RF exposure assessment and dosimetry - what have we learned?" *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(4), 2022.
- [36] R. Kovacs. "Electrotherapy & Light Therapy, 5th edition." *Lea & Febiger*, 1945.
- [37] J. C. Lin. "Early Contributions to Electromagnetic Fields in Living Systems," *Springer*, 1994.
- [38] A. W. Guy. "Analyses of electromagnetic fields induced in biological tissues by thermographic studies on equivalent phantom models." *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 19(2):205-214, 1971.
- [39] C. H. Durney, H. Massoudi, and M. F. Iskander. "Radio-frequency radiation dosimetry handbook, 4th edition." Brooks Air Force Base, TX: USAF School of Aerospace Medicine, Aerospace Medical Division (AFSC), 1986.
- [40] W. P. Roach. "Radio-frequency radiation dosimetry handbook, 5th edition." Air Force Research Lab Brooks Air Force Base, TX: Human Effectiveness Directorate, 2009.
- [41] R. L. McIntosh and V. Anderson. "SAR vs. VAR, and the size and shape that provide the most appropriate RF exposure metric in the range of 0.5-6 GHz." *Bioelectromagnetics*, 32(4):312-321, 2011.
- [42] Federal Communications Commission. "Auction 101: Spectrum Frontiers - 28 GHz," *online*: <https://www.fcc.gov/auction/101/factsheet> (pristupljeno: 1.3.2023.), 2019.
- [43] Federal Communications Commission. "Fact sheet on Spectrum Frontiers item," *online*: <https://www.fcc.gov/document/fact-sheet-spectrum-frontiers-item> (pristupljeno: 1.3.2023.), 2016.

- [44] V. Anderson, R. Croft, and R. L. McIntosh. "SAR vs. Sinc : What is the appropriate RF exposure metric in the range 1-10 GHz? Part I: Using planar body models." *Bioelectromagnetics*, 31(6):454-466, 2010.
- [45] R. L. McIntosh and V. Anderson. "SAR vs. Sinc : What is the appropriate RF exposure metric in the range 1-10 GHz? Part II: Using complex human body models." *Bioelectromagnetics*, 31(6):467-478, 2010.
- [46] B. Thors, D. Colombi, Z. Ying, T. Bolin, and C. Törnevik. "Exposure to RF EMF from array antennas in 5G mobile communication equipment." *IEEE Access*, 4:7469-7478, 2016.
- [47] A. Christ, T. Samaras, E. Neufeld, and N. Kuster. "Limitations of incident power density as a proxy for induced electromagnetic fields." *Bioelectromagnetics*, 41:348-359, 2020.
- [48] D. Funahashi, T. Ito, A. Hirata, T. Iyama, and T. Onishi. "Averaging area of incident power density for human exposure from patch antenna arrays." *IEICE Transactions on Electronics*, E101.C(8):644-646, 2018.
- [49] K. Li, K. Sasaki, K. Wake, T. Onishi, and S. Watanabe. "Quantitative comparison of power densities related to electromagnetic near-field exposures with safety guidelines from 6 to 100 GHz." *IEEE Access*, 9:115801-115812, 2021.
- [50] K. Li, Y. Diao, K. Sasaki, A. Prokop, D. Poljak, V. Doric, J. Xi, S. Kodera, A. Hirata, and W. El Hajj. "Intercomparison of calculated incident power density and temperature rise for exposure from different antennas at 10-90 GHz." *IEEE Access*, 9:151654-151666, 2021.
- [51] K. Li, K. Sasaki, S. Watanabe, and H. Shirai. "Relationship between power density and surface temperature elevation for human skin exposure to electromagnetic waves with oblique incidence angle from 6 GHz to 1 THz." *Physics in Medicine & Biology*, 64(6):065016, 2019.
- [52] D. Poljak, M. Cvetković, O. Bottauscio, A. Hirata, I. Laakso, E. Neufeld, S. Reboux, C. Warren, A. Giannopoulos, and F. Costen. "On the use of conformal models and methods in dosimetry for nonuniform field exposure." *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 60(2):328-337, 2018.
- [53] IEEE guide for the definition of incident power density to correlate surface temperature elevation. IEEE Std 2889-2021, 2021.
- [54] A. Kapetanović and D. Poljak. "Application of automatic differentiation in electromagnetic dosimetry – Assessment of the absorbed power density in the mmWave frequency spectrum." *In proceedings of the International Conference on Smart and Sustainable Technologies*, 1-6, 2021.
- [55] T. Wu, T. S. Rappaport, and C. M. Collins. "The human body and millimeter-wave wireless communication systems: Interactions and implications." *In proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2423-2429, 2015.
- [56] K. R. Foster, M. C. Ziskin, Q. Balzano, and G. Bit-Babik. "Modeling tissue heating from exposure to radio-frequency energy and relevance of tissue heating to exposure limits: Heating factor." *Health Physics*, 115(2):295-307, 2018.
- [57] C.-H. Li, M. Douglas, E. Ofli, N. Chavannes, Q. Balzano, and N. Kuster. "Mechanisms of RF electromagnetic field absorption in human hands and fingers." *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 60(7):2267-2276, 2012.
- [58] Y. Diao, E. A. Rashed, and A. Hirata. "Assessment of absorbed power density and temperature rise for nonplanar body model under

electromagnetic exposure above 6 GHz." *Physics in Medicine & Biology*, 65(22):224001, 2020.

- [59] W. S. Snyder, M. J. Cook, E.S. Nasset, L. R. Karhausen, G. Parry Howells, and I. H. Tipton. "Report of the task group on reference man." *Annals of the ICRP*, 3(23), 1979.
- [60] C. Gabriel. "Compilation of the dielectric properties of body tissues at RF and microwave frequencies." US Air Force, Final Technical Report, TR-1996-0037, 1996.
- [61] O.P. Gandhi and A. Riazi. "Absorption of millimeter waves by human beings and its biological implications." *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 34(2):228-235, 1986.
- [62] P. A. Hasgall, E. Neufeld, M. C. Gosselin, A. Klingenböck, and N. Kuster. "IT'IS database for thermal and electromagnetic parameters of biological tissues, ver. 4.1", *online*: www.itis.ethz.ch/database (pristupljeno 28.2.2023), 2022.
- [63] K. Li, S. Kodera, D. Poljak, Y. Diao, K. Sasaki, A. Šušnjara, A. Prokop, K. Taguchi, J. Xi, S. Zhang, M. Yao, G. Sacco, M. Zhadobov, W. El Hajj, and A. Hirata. "Calculated epithelial/absorbed power density for exposure from antennas at 10-90 GHz: Intercomparison study using a planar skin model." *IEEE Access*, 11:7420-7435, 2023.

KRATAK ŽIVOTOPIS PRISTUPNIKA

Osobni podaci

Prezime / Ime Kapetanović, Ante

Radno iskustvo

Datumi	Listopad, 2019 - danas
Zanimanje ili radno mjesto	mlađi istraživač na projektu
Glavni poslovi i odgovornosti	Istraživački rad u području računalne elektromagnetske i toplinske dozimetrije; izvođenje nastave diplomskom i stručnom studiju u području elektromagnetske kompatibilnosti.
Ime i adresa poslodavca	Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, R. Boškovića 32, 21000 Split
Vrsta djelatnosti ili sektor	Obrazovanje

Obrazovanje i osposobljavanje

Datumi	Rujan, 2017 - Rujan, 2019
Naziv dodijeljene kvalifikacije	Magistar inženjer elektrotehnike i informacijske tehnologije
Glavni predmeti / stečene profesionalne vještine	Polja i valovi u elektronici, mjerenja u bežičnim sustavima, Numeričke metode u komunikacijama / numeričko programiranje, istraživački rad
Ime i vrsta organizacije pružatelja obrazovanja i osposobljavanja	Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Splitu
Datumi	Rujan, 2014 - Rujan, 2017
Naziv dodijeljene kvalifikacije	sveučilišni prvostupnik (<i>baccalaureus</i>) inženjer elektrotehnike i informacijske tehnologije
Glavni predmeti / stečene profesionalne vještine	Osnovne elektrotehnike, Diferencijalni i integralni račun, Vektorska analiza, Impulsni i digitalni sklopovi
Ime i vrsta organizacije pružatelja obrazovanja i osposobljavanja	Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Splitu

Tehničke vještine i kompetencije

numeričko programiranje, podatkovna analiza, znanstveno pisanje

Računalne vještine i kompetencije

Python: SciPy ekosistem biblioteka (numeričke metode), Jax i Pytorch (duboko učenje), scikit-learn (strojno učenje), Jupyter uz Matplotlib, Seaborn i Mayavi (obrada podataka i vizualizacija), LaTeX uz PGF/TikZ (znanstveno pisanje)

POPIS ZNANSTVENIH RADOVA PRISTUPNIKA IZ PODRUČJA PREDLOŽENE TEME DOKTORSKOG RADA*

Znanstveni radovi kategorije A

Autori	Kapetanović, A. , Sacco, G., Poljak, D., Zhadobov, M.
Naslov rada	Area-Averaged Transmitted and Absorbed Power Density on Realistic Body Parts
Časopis	IEEE Journal of Electromagnetics, RF and Microwaves in Medicine and Biology
Broj izdanja, stranice, godina	7(1), 39-45, 2023
Bibliografske baze podataka	Current Contents/Engineering, Google Scholar, SCOPUS, Science Citation Index...
Impact factor	3.00
Autori	Kapetanović, A. , Poljak, D.
Naslov rada	Assessment of Incident Power Density on Spherical Head Model up to 100 GHz
Časopis	IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility
Broj izdanja, stranice, godina	64, 1296-1303, 2022
Bibliografske baze podataka	Current Contents/Engineering, Google Scholar, SCOPUS, Science Citation Index...
Impact factor	2.036
Autori	Kapetanović, A. , Šušnjara, A., Poljak, D.
Naslov rada	Stochastic analysis of the electromagnetic induction effect on a neuron's action potential dynamics
Časopis	Nonlinear Dynamics
Broj izdanja, stranice, godina	105, 3585-602, 2021
Bibliografske baze podataka	Current Contents/Engineering, Google Scholar, SCOPUS, Science Citation Index...
Impact factor	5.022
Autori	Cvetković, M., Kapetanović, A. , Poljak, D., Dodig, H.
Naslov rada	On the Applicability of Numerical Quadrature for Double Surface Integrals at 5G Frequencies
Časopis	Journal of communications software and systems
Broj izdanja, stranice, godina	18:42-53, 2022
Bibliografske baze podataka	Scopus, EBSCO, INSPEC, CrossRef, Google Scholar and DOAJ
Impact factor	1.26

Znanstveni radovi kategorije C

- Autori **Kapetanović, A.**, Šušnjara, A., Poljak, D., Russo, M.
Naslov rada Stochastic-Deterministic Electromagnetic Modeling of Human Head Exposure to Microsoft HoloLens
Naslov zbornika Special Session on Environmental Electromagnetic Compatibility (EEMC)
Stranice (od-do) 1-6
Naziv skupa 30th International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks, SoftCOM 2022
Datum održavanja skupa 22-24.9.2022, Split, Croatia
- Autori **Kapetanović, A.**, Sacco, G., Poljak, D., Zhadobov, M.
Naslov rada Novel procedure for spatial averaging of absorbed power density on realistic body models at millimeter waves
Naslov zbornika BioEM proceedings
Stranice (od-do) 242-8
Naziv skupa BioEM 2022
Datum održavanja skupa 19-24.6.2022, Nagoya, Japan (virtual)
- Autori **Kapetanović, A.**, Poljak, D.
Naslov rada Machine learning-assisted antenna modeling for realistic assessment of human exposure reference levels above 6 GHz
Naslov zbornika IEEE and ICNIRP and Hot Topics EMF
Stranice (od-do) 1 (abstract)
Naziv skupa 6th European Congress on Radiation Protection
Datum održavanja skupa 30.5-3.6.2022, Budapest, Hungary
- Autori **Kapetanović, A.**, Sacco, G., Poljak, D., Zhadobov, M.
Naslov rada Assessment of Area-Average Absorbed Power Density on Realistic Tissue Models at mmWaves
Naslov zbornika Facing challenges in electromagnetic dosimetry at mm waves and THz
Stranice (od-do) 153-5
Naziv skupa IEEE International Microwave Biomedical Conference (IMBioC 2022)
Datum održavanja skupa 16-18.5.2022, Suzhou, China in a hybrid mode
- Autori Cvetković, M.; Poljak, D.; **Kapetanović, A.**; Dodig, H.
Naslov rada Study on the Suitability of Numerical Integration at 5G Frequencies Using Unit Cube Test
Naslov zbornika Special Session on Environmental Electromagnetic Compatibility (EEMC)
Stranice (od-do) 1-6
Naziv skupa 29th International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks, SoftCOM 2021
Datum održavanja skupa 23-25.9.2021

Autori Cvetković, M.; Poljak, D.; **Kapetanović, A.**; Dodig, H.
Naslov rada Selecting Optimal Numerical Integration Rules for Double
Surface Integrals on Triangular Domains
Naslov zbornika Computation of Electromagnetic Fields
Stranice (od-do) 38-41
Naziv skupa 15th International Conference on Applied Electromagnetics,
PEC 2021
Datum održavanja skupa 30.8-1.9.2021

Autori Cvetković, M.; Poljak, D.; **Kapetanović, A.**; Dodig, H.
Naslov rada Unit Cube Test for Double Surface Integrals in Frequency
Domain Integral Equation Formulations
Naslov zbornika Engineering Modeling
Stranice (od-do) 1-6
Naziv skupa 6th International Conference on Smart and Sustainable
Technologies, SpliTech 2021
Datum održavanja skupa 8-11.9.2021

Autori **Kapetanović, A.**; Poljak, D.
Naslov rada Application of Automatic Differentiation in Electromagnetic
Dosimetry – Assessment of the Absorbed Power Density in
the mmWave Frequency Spectrum
Naslov zbornika Engineering Modeling
Stranice (od-do) 1-6
Naziv skupa 6th International Conference on Smart and Sustainable
Technologies, SpliTech 2021
Datum održavanja skupa 8-11.9.2021

****Kategorizacija znanstvenih radova sukladno Pravilniku o uvjetima za izbor u znanstvena zvanja (NN 28/2017)***

POPIS SVIH OBJAVLJENIH RADOVA PRISTUPNIKA IZ PODRUČJA PREDLOŽENE TEME DOKTORSKOG RADA

Autori	Kapetanović, A. ; Poljak, D.
Naslov rada	Efficient procedures in assessment of incident power density on non-planar tissue models under electromagnetic exposure in mmWave spectrum
Naslov zbornika	PhD Forum – Book of Abstracts
Stranice (od-do)	9-10
Naziv skupa	16th International Conference on Telecommunications - ConTEL 2021
Datum održavanja skupa	30.6-2.7.2021

**POTVRDA MENTORA DA SU OBJAVLJENI RADOVI
PRISTUPNIKA IZ PODRUČJA ISTRAŽIVANJA DOKTORSKOG
RADA**

Potvrđujem da radovi koje je pristupnik Ante Kapetanović, student poslijediplomskog doktorskog studija Elektrotehnike i informacijske tehnologije, naveo u priloženom popisu znanstvenih radova i priloženom popisu svih objavljenih radova, pripadaju području istraživanja doktorskog rada.

Mentor

prof. dr. sc. Dragan Poljak

POTVRDA O SUDJELOVANJU PRISTUPNIKA U ZNAISTVENO-ISTRAŽIVAČKIM PROJEKTIMA

Naziv projekta:	DATAACROSS - Napredne metode i tehnologije u znanosti o podacima i kooperativnim sustavima
Oznaka projekta:	KK.01.1.1.01.000
Trajanje projekta (od - do):	1.11.2019 - 31.10.2023
Vrsta projekta:	nacionalni
Voditelj projekta:	Dragan Poljak

Potvrđujem da je Ante Kapetanović, student poslijediplomskog doktorskog studija Elektrotehnike i informacijske tehnologije, sudjelovao u radu na navedenom znanstveno-istraživačkom projektu.

Voditelj projekta

prof. dr. sc. Dragan Poljak