

O BIOLOŠKIM UTICAJIMA RADIOFREKVENTNOG I MIKROTALASNOG NEJONIZUJUĆEG ZRAČENJA

ON BIOLOGICAL EFFECTS OF RADIOFREQUENCY AND MICROWAVE NON-IONIZING RADIATION

ALEKSANDAR KALAJDŽIĆ
DEJAN RAKOVIĆ

Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu

REZIME

U radu se razmatra uticaj elektromagnetnog zračenja na biološke sisteme a posebno na čoveka. Izvršena je identifikacija, definisanje i podela izvora nejonizirajućeg zračenja. Detaljno su razmotreni biološki uticaji i rizici od radiofrekventnog i mikrotalasnog nejonizirajućeg zračenja. Pored termalnih efekata analizirani su i netermalni: HSP proteini, genetski efekti, reproduktivni poremećaji, neurološki efekti, elektromagnetna preosetljivost, uticaj na biohemijske procese u ćeliji.

Ključne riječi: elektromagnetno zračenje, uticaj, biološki sistemi, termalni i netermalni efekti

ABSTRACT

The paper deals with the influence of electromagnetic radiation on biological systems and especially on humans. The identification, definition and division of non-ionizing radiation sources were performed. The biological impacts and risk of radiofrequency and microwave non-ionizing radiation are discussed in detail. Beside thermal effects non-thermal effects were analyzed: HSP proteins, genetic effects, reproductive disorders, neurological effects, electromagnetic hypersensitivities, influence on biochemical processes in the cell.

Key words: electromagnetic radiation, influence, biological effects, thermal and non-thermal effects

1. UVOD

Prirodna elektromagnetska nejonizujuća zračenja su prisutna od početka biološkog života na Zemlji. Živi svet se razvijao i razvija uz prisutnost ovih zračenja, evoluirao je uz njihovu prisutnost i svoje funkcionalne sisteme prilagodio njima. Signali i

frekvencije ovih zračenja su duboko usađeni u biološke sisteme.

Poslednjih decenija, a pogotovo poslednjih godina, sve više smo okruženi novim digitalnim tehnologijama, pre svega mobilnom telefonijom i bežičnim mrežama. Broj korisnika mobilnih telefona je značajno porastao tako da ga danas koriste i poseduju deca koja čak nisu još ni prohodala.

Tu je poseban problem u novim „smart“ telefonima koji su namenjeni za stalnu povezanost na internet, što preko mobilne telefonije što preko bežičnih mreža, pa ih ljudi nesvesni potencijalnih posledica drže neprestano „povezanim“ (gde se mobilni telefoni ponašaju slično kao i tokom razgovora, povećavajući snagu emitovanog zračenja visoko iznad „standby“ režima).

Pored mobilnih telefona, sve više su prisutne bežične mreže koje omogućavaju pristup internetu i lokalnu komunikaciju između uređaja. One su prisutne u stanovima i na javnim mestima.

Postoji velika naučna polemika oko toga da li radiofrekventno (RF) i mikrotalasno (MT) nejonizujuće zračenje proizvodi i druge efekte osim termalnih. Međutim, istraživanja pokazuju da je ljudski organizam osetljiv na ova zračenja i da ona prouzrokuju razne negativne efekte.

Ova zračenja aktiviraju stresne mehanizme povećavajući uopšteno stres kome su ljudi izloženi. Oni utiču na genetiku, pre svega na ekspresiju gena i proteina. Između ostalog utiču i na DNK molekule. Sve ovo ukazuje na potencijalne kancerogene efekte.

Takođe deluju na reproduktivni sistem utičući na mobilnost i kvalitet muških polnih ćelija, mada ima i indikacija da utiču i na ženski polni sistem. Pokazano je da mogu da dovedu do nepovratne neplodnosti kod životinja. Kakve li će biti posledice ovih uticaja na duge staze po čovečanstvo?

Pored toga utiču i na nervni sistem, na moždane aktivnosti u budnom stanju i prilikom spavanja, pogoršavajući kvalitet sna. Ova zračenja utiču i na glukozni metabolizam mozga čije se posledice ne znaju.

Kao vrhunac uticaja RF i MT zračenja jeste pojava elektromagnetske preosetljivosti. Ovo je funkcionalni poremećaj koji je u nekim zemljama prepoznat i u kojima se posvećuje posebna pažnja ljudima sa ovim poremećajem. Naime, ljudi sa ovim stanjem imaju razne simptome nastale izlaganjem ovim

zračenjima, a kao najčešće uzroke navode se mobilni telefoni i računari.

Treba dodati da RF i MT zračenja utiču na biohemijske procese u ćelijama, to jest utiču na jonske kanale i koncentracije jona remeteći funkciju ćelije.

Svetske strukovne organizacije negiraju netermalne efekte, i granice izlaganja baziraju samo na termalnim efektima.

Sve ove kontroverze dovode do potrebe za dodatnim naučnim istraživanjem svih ovih efekata, njihovom boljem objašnjenju i otkrivanju konačnih zdravstvenih uticaja, što bi omogućilo da se zakonski bolje reguliše prisutnost ovih zračenja u našem okruženju.

S obzirom da RF i MT zračenja mogu sinergetski da deluju sa drugim stresogenim pojavama stvarajući stalno stresno čovekovo okruženje, to je potrebno umanjiti njihov uticaj primenom biorezonantnih balansirajućih tehnika.

Treba istaći da tzv. biorezonantne tehnike pokazuju da RF i MT zračenje može imati i pozitivne efekte na organizam, ali samo kada su intenziteti ovih zračenja veoma mali i kada se primenjuju na odgovarajući način.

Ove tehnike se baziraju na biorezonantnim osobinama EM polja akupunktornog sistema. Metodama kojima se vrši merenje ovog polja može se dijagnostikovati stanje organizma, i ako je potrebno primeniti odgovarajuće terapije. Tipični primeri ovih biorezonantnih dijagnostičkih metoda su elektrodermalni AMSAT sistem i bioelektrografska GDV dijagnostika prema vizualizaciji gasnog pražnjenja oko prstiju.

Terapije koje se primenjuju su biorezonantnog balansirajućeg karaktera i koriste se i u prevenciji bolesti i stresa i u lečenju psihosomatskih poremećaja. Najčešća je mikrotalasna rezonantna terapija. Osim nje koristi se i aerojonizacija, bazirana na formiranju odgovarajuće blagotvorne jonske mikroklimе umanjujući još jedan štetan efekat elektronskih naprava, proizvodnju pozitivnih jona koji utiču razdražujuće na organizam.

Rad se sastoji iz pet poglavlja. Uvodno poglavlje navodi važne činjenice i motivaciju za pisanje ovog rada. Drugo poglavlje govori o elektromagnetskim poljima u životnoj sredini i njihovim karakteristikama, kako se opisuju i dele, i o prirodnim i veštačkim izvorima elektromagnetskih polja, od veoma niskofrekventnog do radiofrekventnog i mikrotalasnog opsega. Treće poglavlje se bavi raznim biološkim uticajima i rizicima izloženosti radiofrekventnim i mikrotalasnim nejonizujućim zračenjima.

2. O ELEKTROMAGNETSKIM POLJIMA U ŽIVOTNOJ SREDINI

Prirodna elektromagnetska nejonizujuća zračenja su prisutna od početka biološkog života na Zemlji. Živi svet se razvijao i razvija uz prisutnost ovih zračenja, on je evoluirao uz njihovu prisutnost i svoje funkcionalne sisteme prilagodio njima. Signali i frekvencije ovih prirodnih zračenja su duboko usađeni u biološke sisteme.

Razni organizmi, od insekata, preko guštera i kornjača, do ptica, pa i sisara, osetljivi su na elektromagnetska polja, pogotovo magnetsko koje koriste za navigaciju [1].

Kažu da čovek nije osetljiv i ne poseduje čula za elektromagnetsko zračenje, ne računajući vidljivi spektar i toplotno zračenje. Međutim, istraživanja pokazuju da su i ljudi osetljivi na ova zračenja, čak da mogu i svesno da ih oseće.

Problem savremenog društva se javlja u sve većoj prisutnosti ljudski stvorenih izvora elektromagnetskog nejonizujućeg zračenja koja su uporediva, pa čak i prevazilaze prirodne izvore, na koja je živi svet navikao i prilagodio im se, kako u domenu intenziteta tako i u domenu frekvencijske raznovrsnosti. U radiofrekventnom i mikrotalasnem domenu, veštački izvori nadjačavaju prirodne, ovo postaje posebno od značaja sa razvojem digitalnih radio tehnologija.

2.1. ELEKTROMAGNETSKO POLJE I ELEKTROMAGNETSKO ZRAČENJE

Elektromagnetsko (EM) polje nastaje kao posledica naelektrisanih čestica i njihovog kretanja. EM polje je posledica kombinacije električnog polja koga formiraju naelektrisane čestice samim svojim postojanjem i magnetskog polja koje je proizvod kretanja naelektrisanih čestica. Vremenski promenljive struje formiraju promenljivo magnetsko polje i promenljivo električno polje.

EM polje karakterišu sledeće četiri vektorske veličine:

1. ***E*** – vektor jačine električnog polja – jedinica volt po metru [V/m],
2. ***D*** – vektor električne indukcije ili vektor električnog pomeraja – jedinica kulon po kv. metru [C/m²],
3. ***B*** – vektor magnetske indukcije – jedinica tesla [T] i
4. ***H*** – vektor jačine magnetskog polja – jedinica amper po metru [A/m] (za vazduh: 1A/m ≈ 1,25 μT).

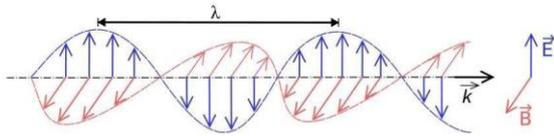
Osnovno svojstvo električnog polja jeste da na sva naelektrisanja koja se nalaze u njemu deluje električna sila. Ovu silu opisuje Kulonov zakon [2]. Osnovno svojstvo magnetskog polja jeste da na sva naelektrisanja koja se kreću u ovom polju deluje magnetska sila. Ukupna sila koja deluje na naelektrisanu česticu naziva se Lorencova sila [3], koja u vektorskom zapisu glasi:

$$\mathbf{F} = q \cdot (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

gde su: ***F*** sila koja deluje na česticu naelektrisanja ***q*** i brzine ***v***, ***E*** vektor jačine električnog polja i ***B*** vektor magnetske indukcije.

Elektromagnetsko zračenje je pojam koji se vezuje za proces širenja elektromagnetskog polja kroz prostor u vidu elektromagnetskih talasa. EM talasi se prostiru od izvora kroz prostor prenoseći

energiju i predajući je naelektrisanim česticama na koje nailaze. Svaki sistem vremenski promenljivih struja i naelektrisanja predstavlja izvor EM zračenja koji u svoju okolinu zrači EM talase.



Slika 2.1. Elektromagnetni talas

EM talasi sadrže u sebi i električnu i magnetsku komponentu polja koje osciluju ortogonalno jedna na drugu i ortogonalno u odnosu na pravac prostiranja talasa. Na slici 2.1 prikazan je ravanski polarisan EM talas. Najčešće je EM zračenje nepolarisano što znači da električno, odnosno magnetsko polje, osciluju u svim mogućim ravnima normalnim na pravac prostiranja.

Veličine koje karakterišu sve periodične pojave, pa svakako i EM talase, jesu talasna dužina λ [m] i frekvencija f [Hz = 1/s]. Talasna dužina je najmanje rastojanje između dve tačke talasa koje osciluju u istoj fazi. Talasna dužina, frekvencija i brzina prostiranja EM talasa c su povezani relacijom: $c = \lambda \cdot f$. U vakuumu, a približno i u vazduhu EM talasi se prostiru brzinom svetlosti koja je konstantna i iznosi: $c \approx 3 \cdot 10^8$ m/s. Praktičan izraz za izračunavanje talasne dužine u metrima na osnovu poznate frekvencije u MHz je:

$$\lambda \text{ (m)} = 300 / f \text{ (MHz)}$$

Na osnovu frekvencije, odnosno talasne dužine, EM zračenje se deli u više kategorija. Ove kategorije se razlikuju po određenim karakteristikama i primenama. EM spektar se najčešće deli u 7 kategorija: polja ekstremno niskih frekvencija, radiofrekventno zračenje (kojim je često obuhvaćeno i mikrotalasno zračenje iznad 1 GHz), infracrveno zračenje, vidljiva svetlost, ultraljubičasto, X i gama zračenje. Podela je prikazana u tabeli 2.1. Frekvencijske granice između ovih podeljenih oblasti su proizvoljne i u različitim radovima se koriste različite vrednosti.

Tabela 2.1. Spektar elektromagnetskog zračenja [4]

Talasna dužina (λ)	Frekvencija (f)	Klasifikacija spektra	Energija fotona	Tip zračenja
< 100 nm	> 3000 THz	Gama zračenje X zračenje	> 12,4 eV	JONIZUJUĆE ZRAČENJE
100–400 nm	750 THz – 3000 THz	Ultraljubičasto zračenje (UV)	3,1 eV – 12,4 eV	NEJONIZUJUĆE ZRAČENJE
400–780 nm	385–750 THz	Vidljiva svetlost	1,59–3,1 eV	
780 nm – 1 mm	0,3 THz – 385 THz	Infracrveno zračenje (IC)	1,24 meV– 1590 meV	
1 mm – 100 km	3 kHz – 300 GHz	Radiofrekventno zračenje (RF)	1,24 peV – 1,24 meV	
> 1000 km	< 300 Hz	Ekstremno niske frekvencije (ENF)	< 1,24 peV	

EM talas je zapravo snop kvantata energije, odnosno elementarnih čestica koje se nazivaju fotoni. Fotoni imaju tačno određenu energiju koja zavisi od frekvencije f EM talasa:

$$E = h \cdot f$$

gde je E energija fotona, a h Plankova konstanta i iznosi približno $4,136 \cdot 10^{-15}$ eV·s.

Energija fotona, odnosno njegova frekvencija, predstavlja glavnu razliku prema kojoj se dele elektromagnetska zračenja. Energija fotona određuje sposobnosti prodiranja EM zračenja kroz objekte, efekte zagrevanja objekata i efekte na žive organizme.

Na osnovu frekvencije, odnosno energije fotona, zračenje se deli na jonizujuće i nejjonizujuće. Jonizujuće zračenje je zračenje čiji foton ima dovoljnu energiju da jonizuje atom ili molekul, to jest da izbaci elektron iz njegovog omotača. Nejonizujuće zračenje nema tu sposobnost. Energija jonizacije je reda veličine 1 eV, što u frekvencijama daje red veličine 10^{15} Hz. Ova energija se nalazi negde unutar opsega ultraljubičastog

¹ Jedinica elektronvolt eV = $1,6 \cdot 10^{-19}$ J

zračenja, tako da X i gama zračenje pripadaju jonizujućem, a ostale vrste nejonizujućem zračenju.

2.2. IZVORI EM NEJONIZUJUĆIH ZRAČENJA

Ovo poglavlje je posvećeno izvorima EM zračenja iz oblasti ekstremno niskih frekvencija (ENF), i radiofrekvencija (RF) odnosno mikrotalasa (MT). Posebna pažnja je posvećena veštačkim izvorima RF i MT domena. Razlog posvećivanja posebne pažnje ovim frekvencijskim domenima EM zračenja leži u tome da je na njih posebno osetljiv ljudski organizam.

2.2.1. IZVORI ELEKTRIČNIH I MAGNETSKIH ENF POLJA

ENF polja ($f < 300$ Hz, $\lambda > 1000$ km) su sporo promenljiva EM polja, drugi naziv im je kvazistatička EM polja. Kvazistatička EM polja su polja čija je brzina promene struja i naelektrisanja u toku vremena takva da se komponente magnetskog polja i ona komponenta električnog polja koja potiče od naelektrisanja mogu približno računati prema formulama za statička polja. Ono po čemu se kvazistatičko i statičko polje bitno razlikuju jeste indukovana komponenta električnog polja, za koju prethodni uslov ne važi [4].

Pošto su talasne dužine ovih EM talasa značajno veće od dimenzija ljudskog tela, granice izlaganja se izražavaju odvojeno za električno i magnetsko polje [4].

Najčešća podela prirodnih izvora ENF polja je na prirodna električna i prirodna magnetska polja.

2.2.1.1. PRIRODNI IZVORI ENF POLJA

Prirodna električna polja grubo se mogu podeliti na dve komponente:

- Stacionarno električno polje
- Promenljiva električna polja

Stacionarno prirodno električno polje se nalazi u blizini Zemljine površine. Ono nastaje usled električnog naelektrisanja koji postoji između atmosfere i tla i ima jačinu

od oko 130 V/m. Ovo naelektrisanje stvaraju Zemlja kao negativan pol i jonosfera kao pozitivan pol, čineći zajedno jedan ogroman kondenzator. Njegova vrednost se smanjuje sa povećanjem visine, jer provodljivost atmosfere raste sa visinom, i na visini od oko 30 km iznosi ispod 1 V/m. Treba naglasiti da na njegovu jačinu bitno utiču dnevne promene u atmosferi kao što su olujna pražnjenja, pri kojima vrednost jačine prirodnog električnog polja može dostići vrednosti od 3 - 20 kV/m [4].

Promenljiva prirodna električna polja su povezana sa aktivnošću olujnih pražnjenja i sa magnetskim pulsacijama koje stvaraju struje iz Zemljine unutrašnjosti (Telurske struje). Jačina ovih polja zavisi od dnevnih i godišnjih promena i prostire se u frekventnom opsegu 0,001 - 1 kHz. Lokalne varijacije zavise od atmosferskih uslova i varijacija u magnetskom polju.

Detaljnije karakteristike vezane za prirodno (Zemljino) električno polje za ENF opseg date su u tabeli 2.2.

Prirodna magnetska polja grubo se mogu podeliti na dve komponente:

- Unutrašnje magnetsko polje
- Spoljašnja magnetska polja

Tabela 2.2. Karakteristike prirodnog električnog polja [4] (E_x, E_y - horizontalne komponente, E_z - vertikalna komponenta)

Frekvencijski opseg	Prirodna polja	Jačina elektr. polja (V/m)
0,001 - 5	Kratkotrajni impulsi magneto-hidrodinamičkog porekla	$0,2 - 10^3$ (za E_z)
7,5 - 8,4 26 - 27	Kvazisinusoidalni impulsi u vremenskom intervalu 0,04 - 1 s	u proseku $(0,15 - 0,6) \cdot 10^{-6}$ (za E_x, y) max. 10^{-6}
5 - 1000	Povezana sa atmosferskim promenama (stalno prisutna)	$10^{-4} - 0,5$ (za E_z) (amplituda opada sa porastom frekvencije)

Unutrašnje prirodno magnetsko polje stvara planeta Zemlja koja deluje kao džinovski magnetski dipol. Njegova vrednost zavisi od geografskog položaja na Zemlji. Na Ekvatoru se vrednost jačine ovoga polja kreće oko 28 A/m (magnetska indukcija $\sim 35 \mu\text{T}$), na polovima 56 A/m ($\sim 70 \mu\text{T}$). Na našim geografskim prostorima se jačina ovog polja kreće oko 40 A/m ($\sim 50 \mu\text{T}$) [4].

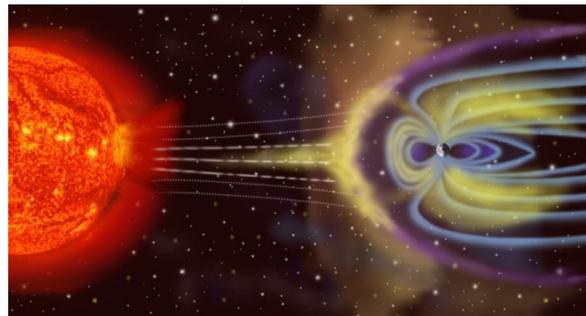
Linije magnetskog polja se protežu između severnog i južnog magnetnog pola kao između polova stalnog magneta (slika 2.2). Magnetna osa Zemlje je oko 10° pomeren u odnosu na geografsku osu i pritom je još i obrnuta tako da je južni magnetni pol u blizini severnog geografskog, a severni magnetni u blizini južnog geografskog. Na južnom magnetnom polu Zemlje, linije magnetske indukcije su usmerene ka Zemlji, a na severnom magnetnom polu su usmerene od Zemlje.



Slika 2.2. Izgled Zemljinog magnetskog polja

Magnetosfera predstavlja deo svemira oko Zemlje, odmah iznad jonosfere i u njoj se nalaze zarobljene naelektrisane čestice.

Zemljina magnetosfera predstavlja dinamički pojas plutajuće plazme vođene magnetskim poljem, koja dolazi u dodir sa Sunčevim magnetskim poljem. Magnetosfera nije sfernog oblika već je iskrivljena od strane solarnog vetra, tako da se prostire u svemiru od Zemlje otprilike od 80 do 60.000 km sa strane prema Suncu, odnosno do 300.000 km udaljenosti na strani okrenutoj od Sunca (slika 2.3). Solarni vetar se sastoji iz naelektrisanih čestica velikih energija, od kojih nas magnetosfera štiti. U magnetosferi se nalazi hladna plazma koja potiče iz jonosfere, vruća plazma koja potiče sa spoljašnje strane Sunčeve atmosfere, i još toplija plazma ubrzana do velikih brzina, koja se može usijati na gornjim slojevima Zemljine atmosfere stvarajući polarnu svetlost bilo na južnoj ili severnoj hemisferi.



Slika 2.3. Prikaz solarnog vetra i magnetnog repa

Spoljašnja magnetska polja imaju višestruko poreklo i međusobno se znatno razlikuju po svojim spektralnim i energetskim svojstvima. Ona se ciklički menjaju svakih 11 godina a uzrokovana su prvenstveno pojavom Sunčevih pega. Za vreme intenzivnih solarnih aktivnosti u toku pojave Sunčevih pega magnetska polja dostižu intenzitete od $5 \cdot 10^{-7} \text{ T}$.

Detaljnije karakteristike vezane za prirodno (Zemljino) magnetsko polje za ENF opseg date su u tabeli 2.3.

Tabela 2.3. Karakteristike prirodnog magnetskog polja [4]

Priroda i poreklo	Promene amplitude (A/m)	Frekvencija (Hz)	Vremenski period
Pravilne 24-čas. promene povezane sa delovanjem Sunca i Meseca	0,024 - 0,4 (S) 0,004 - 0,005 (M)	-	-
Nepravilne magnetske oluje povezane sa Sunčevim pegama	0,8 - 2,4	širok opseg frekvencija	-
Prirodne fluktuacije (mikropulsacije) koje zavise od stanja jonosfere i magnetosfere	$8 \cdot 10^{-5}$ - $4 \cdot 10^{-2}$	0,001 - 5	Tokom dana (u satima)

2.2.1.2. ŠUMANOVE REZONANCE

Šumanove rezonance predstavljaju skup frekvencija koje se nalaze unutar ENF opsega. Ovi signali potiču od sistema Zemlja - jonosfera koji se ponaša kao šuplji rezonator širine 140 km iznad površine Zemlje. Posledica su električnog pražnjenja munja u ovoj šupljini. Prva frekvencija je na oko 7,83 Hz što je frekvencija koja odgovara Zemlji, tačnije njenom obimu, a ostale su svaka sledeće veća za približno 6,5 Hz od prethodne. Ove frekvencije se aproksimativno mogu dobiti na osnovu izraza [4]:

$$f_n \approx 8 \sqrt{\frac{n(n+1)}{2}}, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

Vrednosti polja Šumanovih rezonanci su veoma niske. Vrednost električnog polja je oko 10 mV/m, a magnetske indukcije oko 1-10 nT [5].

Pokazuje se da su ova polja od velikog značaja za biološki svet. U vezi su sa frekvencijama na kojima radi ljudski mozak (δ , θ , α , β , γ - rezonantne frekventne trake u EEG snimku), a izgleda da imaju značajnu ulogu u adaptacionom mehanizmu na nivou bioloških vrsta što potvrđuju

eksperimenti Šeldrajka (1987), koji ukazuju da jednom naučeni sadržaji od strane i malog dela neke biološke populacije – omogućavaju lakše buduće obučavanje preostalog dela populacije [6].

2.2.1.3. VEŠTAČKI IZVORI POLJA ENF

ENF polja [4] najčešće nastaju u toku prenosa, distribucije i upotrebe električne energije. Dominantne frekvencije su 50 i 60 Hz, ali generalno frekvencije zavise od izvora i ljudi su uglavnom izloženi mešavini frekvencija.

Glavni izvori ENF polja su:

- Elektroenergetski sistem,
- Prevozna sredstva i
- Električni uređaji i kućni aparati

Elektroenergetski sistem čine proizvodnja, prenos, distribucija i potrošnja električne energije. Glavni elementi elektroenergetskog sistema koji imaju ulogu u formiranju EM polja ENF kojima su ljudi izloženi jesu visokonaponski prenosni vodovi, distribucijske transformatorske stanice, mali transformatori. Najjača polja kao posledica elektroenergetskog sistema se najčešće nalaze ispod visokonaponskih prenosnih vodova. U ovim prilikama vrednosti magnetske indukcije se kreću izme u 1 - 40 μ T. Značajni izvori EM zračenja ENF su i transformatorske stanice, koje se najčešće nalaze u blizini stambenih objekata, pa čak i u okviru stambenih objekata, u čijem se okruženju vrednosti magnetske indukcije kreću i do $\sim 10 \mu$ T.

Prevozna sredstva koja su značajni izvori EM zračenja ENF jesu električni tramvaji i vozovi. Vrednosti magnetske indukcije koje se javljaju u blizini podova putničkih vagona tramvaja mogu dostići vrednosti od čak 3 mT, a na nivou sedišta putnika električna polja mogu dostići 300 V/m, dok gornji delovi tela putnika mogu biti izloženi magnetskoj indukciji od 30 μ T. Putnici u električnim vozovima su uglavnom izloženi EM poljima koje stvara

nadzemni visokonaponski vod naizmenične struje iznad železničke prige, ovom izvoru su dodatno izloženi putnici tramvaja.

Električni uređaji i kućni aparati zauzimaju značajno mesto u svakodnevnom životu. EM polja ovih uređaja nisu zanemarljiva. Magnetska indukcija raznih uređaja u njihovoj neposrednoj blizini dostiže vrednosti od $\sim 10 \mu\text{T}$.

2.2.2. IZVORI RF I MT ZRAČENJA

U skladu sa propisima Međunarodne telekomunikacione unije (ITU), radiofrekvencije (RF) se dele na osam frekvencijskih opsega koji su navedeni u tabeli 2.4. Opseg frekvencija od 1 GHz do 300 GHz predstavlja opseg kom pripadaju miktrotalasi.

Prema poreklu, izvori RF i MT zračenja dele se na prirodne i veštačke.

2.2.2.1. PRIRODNI IZVORI RF I MT ZRAČENJA

Prirodnom RF i MT nejonizujućem zračenju [4] izloženi smo tokom celog svog života. Ovo zračenje obuhvata širok opseg frekvencija, ali o ulozi i značaju ovih zračenja za život na Zemlji naučna znanja su nedovoljna. Osnovna podela prirodnih RF i MT zračenja je na:

- Atmosferska polja,
- Elektromagnetska zračenja Zemlje
- Kosmička zračenja.

Atmosferska polja nastaju usled prirodnih fenomena, tačnije električnih pražnjenja u atmosferi sa frekvencijama do 30 MHz. Jačine i opsezi frekvencija ovih polja se razlikuju od geografskog položaja, godišnjih doba, doba dana. Najintezivnija su polja u opsegu frekvencija 2 - 30 MHz. Jačine ovih polja generalno opadaju sa rastom frekvencije. Što se tiče geografske razlike, najveći intenziteti su oko ekvatora, a najmanji na polovima.

Tabela 2.4. Podela radiofrekvencijskog opsega

Frekvencijski opseg	Oznaka	Naziv (po frekvencijama)	Naziv (po talas. dužinama)
3 – 30 kHz	VLF	Vrlo niske frekvencije	Vrlo dugi talasi
30 – 300 kHz	LF	Niske frekvencije	Dugi talasi (kilometarski)
300 kHz – 3 MHz	MF	Srednje frekvencije	Srednji talasi (hektometarski)
3 – 30 MHz	HF	Visoke frekvencije	Kratki talasi (decimetarski)
30 – 300 MHz	VHF	Vrlo visoke frekvencije	Vrlo kratki talasi (metarski)
300 MHz – 3 GHz	UHF	Ultra-visoke frekvencije	Ultra-kratki talasi (decimetarski)
3 – 30 GHz	SHF	Super-visoke frekvencije	Super-kratki talasi (centimetarski)
30 – 300 GHz	EHF	Ekstra-visoke frekvencije	Ekstra-kratki talasi (milimetarski)

EM zračenja Zemlje su posledica toga što je Zemlja toplo telo. Sva tela koja imaju temperaturu veću od apsolutne nule ($> 0 \text{ K}$) emituju EM zračenja praktično na svim frekvencijama. U okviru RF i MT opsega frekvencija, kada se prema Plankovom² zakonu zračenja crnog tela preračuna gustina snage, dobija se vrednost od $0,3 \mu\text{W}/\text{cm}^2$.

Kosmička zračenja koja se kreću ka Zemlji većinom bivaju zaustavljena od strane atmosfere, jonosfere i magnetosfere. EM RF i MT zračenje stiže do Zemlje u dva frekvencijska prozora, optički prozor i drugi u opsegu 10 MHz - 37,5 GHz. Zračenje sa frekvencijama preko 37,5 GHz uglavnom apsorbuju molekuli O_2 i H_2O .

2.2.2.2. VEŠTAČKI IZVORI RF I MT ZRAČENJA

U poslednjih nekoliko decenija veštački izvori RF i MT nejonizujućeg zračenja [4] u sve većoj su ekspanziji što po raznovrsnosti, što po brojnosti. Najvažniji predstavnici ovih izvora, iz ugla zaštite od

² Max Planck.

zračenja jesu predajne antene radio i TV stanica, bazne stanice mobilne telefonije i, kao najzastupljeniji, mobilni telefoni.

Imajući u vidu toliku brojnost i različitost izvora RF i MT zračenja nije lako ili čak moguće napraviti njihovu celovitu podelu. Najčešća podela veštačkih RF i MT izvora zračenja je prema gustini snage. Dele se na izvore velike i male snage.

Izvori velike snage su izvori RF i MT nejonizujućeg zračenja koji na rastojanju od 100 m od sebe mogu da proizvedu gustinu snage od 1 W/m^2 .

U izvore velike snage spadaju:

- Radio i TV predajnici,
- Radari za kontrolu vazdušnog saobraćaja,
- Radari za kontrolu kopnenih granica i priobalnih pojaseva,
- Meteorološki radari,
- Sistemi komunikacija (veze sa satelitima i kosmičkim brodovima) i
- Radarski teleskopi.

Izvori male snage su izvori koji na rastojanju od 100 m ne mogu da proizvedu gustinu snage od 1 W/m^2 .

U izvore male snage spadaju:

- Policijski radari,
- Relejni mikrotalasni radari (za kablovsku televiziju),
- Mikrotalasne peći,
- Antenski sistemi u mobilnoj telefoniji i drugi.

Opšte primene izvora RF i MT zračenja po odgovarajućim frekvencijama date su u tabeli 2.5.

Tabela 2.5. Opšte primene izvora RF i MT zračenja [4]

Frekvencijski opseg	Opšte primene
VLF (3 - 30 kHz)	- radionavigacioni sistemi - pomorski komandni sistemi - međukontinentalna radio-telegrafija - elektrotermija (indukciono zagrevanje, oko 10 kHz)
LF (30 - 300 kHz)	- radionavigacioni sistemi; - radiokomunikacije; - elektrotermija
MF (300 kHz - 3 MHz)	- pomorska radiotelefonija; - AM radioemisije
HF (3 - 30 MHz)	- dielektričko zagrevanje (zagrevanje i sušenje drveta, tekstila, lepljenje plastičnih masa, vulkanizacija gume...) - polimerizacija; - kratkotalasna dijametrijacija (KTD); - radioemisije; - radioastronomija
VHF (30 - 300 MHz)	- VHF TV (kanali 2 - 13); - radionavigacija; - FM radioemisije; - medicinska dijagnostika
UHF (300 MHz - 3 GHz)	- UHF TV (kanali 14 - 83); - javna mobilna telefonija; - komunikacioni sistemi u radionavigaciji; - meteorološki radari; - mikrotalasna dijametrijacija; - mikrotalasne peći; - telemetrija; - prehrambena industrija
SHF (3 - 30 GHz)	- satelitske komunikacije; - transmisija TV slika sa kosmičkih brodova; - brodski i vazduhoplovni navigacioni radari.
EHF (30 - 300 GHz)	- radiometeorologija; - istraživanje kosmosa; - nuklearna fizika i tehnologija; - satelitske komunikacije

U poslednjim decenijama RF i MT zračenja se sve više primenjuje u *digitalnim radio tehnologijama*. Uzrok ovome je u potreba čovečanstva za sve većom, lakšom i bržom razmenom informacija na globalnom nivou. Svedoci smo brzine razvoja ovih tehnologija, koju je skoro nemoguće pratiti, a ima ogromne uticaje na celokupno čovečanstvo, i pozitivne i negativne.

Ove tehnologije se svrstavaju u tri velike grupe:

- Mobilne komunikacije (GSM, UMTS, HSPA, LTE ...),
- Digitalni prenos radio i TV signala (DAB, DVB ...) i
- Lokalne radio-veze (uređaji kratkog dometa, WiFi, Bluetooth ...).

U tabeli 2.6 je dat prikaz frekvencija na kojima rade odgovarajući sistemi mobilnih tehnologija, kao i WiFi.

Osnovni kanali ovih digitalnih radio tehnologija su podeljeni na podkanale koji se nalaze u odgovarajućim opsezima oko svog osnovnog kanala. U toku samog korišćenja ovih tehnologija, recimo tokom telefonskog razgovora mobilnim telefonom, frekvencije često bivaju menjane od strane bazne stanice, što može biti štetnije po biološke sisteme, jer su oni više osetljivi na promenljive signale nego na kontinualne [7].

Tabela 2.6. Frekvencijski kanali digitalnih radio tehnologija

Tehnologija	Frekvencije (MHz)
GSM	850, 900, 1800, 1900
UMTS	850, 900, 1900, 2100
HSDPA	850, 900, 1700, 1900, 2100
LTE	700, 800, 850, 900, 1700, 1800, 1900, 2300, 2500, 2600
WiFi	2400, 3600, 4900, 5000, 5900

3. O BIOLOŠKIM UTICAJIMA I RIZICIMA RADIOFREKVENTNOG I MIKROTALASNOG NEJONIZUJUĆEG ZRAČENJA

Biološki efekat predstavlja promenu u biološkom sistemu koja se može izmeriti i koja nastaje nakon nekakvog stimulusa. Biološki efekat ukazuje na postojanje osetljivosti biološkog sistema na odgovarajući stimulus. Jasno je da biološki efekat ne mora obavezno da ukazuje na postojanje biološkog, odnosno zdravstvenog rizika, recimo ako je ta promena u sistemu privremena, ili ako ona ima pozitivne posledice, ali ako je trajna, ili ako sa takve promene događaju često i nadovezuju jedna na drugu, onda taj efekat svakako treba dobro proučiti. Dugo vremena je smatrano da jedini efekat koji proizvode RF i MT nejonišujuća zračenja jeste termalni. Pokazuje se da postoje efekti koji nisu termalni, za koje su potrebni manji intenziteti polja i koji su daleko značajniji od termalnog jer su potencijalno veoma opasni.

Glavne svetske organizacije i dalje negiraju netermalne efekte i svoje preporuke u zaštiti od zračenja baziraju na termalnom efektu.

3.1. TERMALNI EFEKAT I GRANICE IZLAGANJA

Dobro proučeni biološki uticaj RF i MT nejonišujućih zračenja jeste mikrotalarno zagrevanje, pri kojem se svaki dielektrični materijal, uključujući i biološka tkiva, zagreva oscilacijama polarnih molekula, koje su indukovane EM poljem. U slučaju kada osoba koristi telefon, ovaj termalni efekat se najviše primećuje na površini glave, povećavajući temperaturu za mali deo stepena. Ovo povišenje temperature je za red veličine manje od povišenja pri izloženosti direktnom suncu. Moždani krvotok čoveka je u stanju da se izbori sa viškom toplote povećavajući protok krvi. Izlaganje većem RF i MT zračenju može da dovede do oštećenja tkiva [7].

Prema ovom principu, odnosno biološkom efektu formirane su preporučene granice izlaganja.

3.1.1. GRANICE IZLAGANJA

Prva stvar u definisanju granica izlaganja jeste definisanje grupa na koje se primenjuju.

Generalna podela je na tri grupe:

- Profesionalna lica,
- Opšta populacija stanovništvo i
- Lica podvrgnuta medicinskom tretmanu.

Profesionalna lica čine osobe koje su pri zaposlenju izloženi EM zračenju i pritom su upoznati sa rizicima i zaštitnim merama. Ova grupa ljudi je pod redovnim medicinskim nadzorom. Granice izlaganja profesionalnih lica su viša u odnosu na opštu populaciju. Dužina izlaganja je ograničena na period radnog vremena.

Opšta populacija podrazumeva osobe različitog zdravstvenog stanja i uzrasta, koja nisu svesna izlaganja EM zračenju. Ova grupa može biti izložena zračenju 24 h dnevno.

Za lica podvrgnuta medicinskom tretmanu granice nisu postavljene, već se izlaganje razmatra u cilju veće koristi od štete.

Međunarodna komisija za zaštitu od nejonizujućeg zračenja (ICNIRP) je nezavisna naučna organizacija odgovorna za donošenje preporuka vezanih za ograničavanje ljudskog izlaganja nejonizujućem zračenju.

3.1.1.1. PREPORUKE ICNIRP

ICNIRP [8] je 1998. godine objavio preporuke za izlaganje nejonizujućem zračenju do 300 GHz. Ove preporuke su donete na osnovu višegodišnjeg vrednovanja naučnih izveštaja. Za formiranje ovih preporuka je uzet u obzir praktično samo termalni efekat, a postojanje netermalnih efekata je negirano.

Ograničenja su podeljena u dve grupe:

- Osnovna ograničenja i

- Referentni nivoi.

Osnovna ograničenja zavise od frekvencije EM zračenja i za frekvencije između 100 kHz i 10 GHz se izražavaju preko veličine SAR (Specifična brzina apsorpcije), u cilju zaštite od zagrevanja celog tela, odnosno lokalnog tkiva ili dela tela. SAR predstavlja snagu koja se apsorbuje po jedinici mase. Najčešće se usrednjava za celo telo ("Whole-body SAR"), dok se lokalni SAR odnosi na snagu apsorbovanu od strane određenih delova tela. SAR se usrednjava u vremenskom intervalu, najčešće 6 minuta.

Prema ICNIRP ustanovljeni biološki i zdravstveni efekti, u frekvencijskom opsegu između 10 MHz do nekoliko GHz, odgovaraju biološkom odzivu organizma čija temperatura poraste za više od 1 °C. Porast temperature organizma za 1 °C približno odgovara srednjoj vrednosti "Whole-body" SAR od 4 W/kg u vremenskom intervalu od 30 minuta. Za navedenu vrednost je "u cilju adekvatne zaštite" uveden redukциони faktor 10 za profesionalno izlaganje, odnosno 50 za izlaganje stanovništva, tabela 3.1.

Tabela 3.1. ICNIRP osnovna ograničenja za izlaganje RF i MT nejonizujućem zračenju u opsegu frekvencija od 10 MHz do 10 GHz [8].

SAR	Profesionalna lica	Stanovništvo
Usrednjen za celo telo u vremenskom periodu od 6 minuta ("Whole-body" SAR)	0,4 W/kg	0,08 W/kg
Usrednjen na 10 g tkiva glave i trupa u vremenskom periodu od 6 minuta ("Localized" SAR)	10 W/kg	2 W/kg
Usrednjen na 10 g tkiva ekstremiteta u vremenskom periodu od 6 minuta ("Localized" SAR)	20 W/kg	4 W/kg

Referentni nivoi služe za praktičnu procenu izlaganja i održavanje istog unutar preporučenih granica, tabela 3.2. Dobijeni su iz osnovnih ograničenja matematičkim modelovanjem i na osnovu laboratorijskih merenja i izražavaju se u merljivim, odnosno referentnim veličinama.

Tabela 3.2. ICNIRP referentni nivoi za izlaganje RF i MT nejonizujućem zračenju u opsegu frekvencija od 10 MHz do 10 GHz [8].

	Opseg	Jačina elektr. polja	Jačina magn. polja (A/m)	Magnetska indukcija (μT)	Gustina snage (W/m ²)
Profesionalna lica	10 – 400 MHz	61	0,16	0,2	10
	400 – 2000 MHz	$3 \cdot f^{1/2}$	$0,008 \cdot f^{1/2}$	$0,01 \cdot f^{1/2}$	$f / 40$
	2 – 300 GHz	137	0,36	0,45	50
Stanovništvo	10 – 400 MHz	28	0,073	0,092	2
	400 – 2000 MHz	$1,375 \cdot f^{1/2}$	$0,0037 \cdot f^{1/2}$	$0,0046 \cdot f^{1/2}$	$f / 200$
	2 – 300 GHz	61	0,16	0,20	10

3.2. NETERMALNI EFEKTI

Netermalni efekti predstavljaju biološke efekte koji se javljaju pri niskim intenzitetima, odnosno snagama polja, koje ne mogu da izazovu termalni efekat i koje su nekad i znatno ispod preporučenih granica izlaganja.

3.2.1. HSP PROTEINI

Neki naučnici čak tvrde da su netermalni efekti zapravo termalni u osnovi. Glaser i Foster [9] su argumentovali da postoji nekoliko termoreceptorskih molekula u ćelijama i da oni aktiviraju kaskadu drugih sistema, mehanizme ekspresije genoma i proizvodnju proteina toplotnog šoka (u daljem tekstu HSP) u

cilju odbrane ćelije od metaboličkog ćelijskog stresa proizvedenog od strane zagrevanja. Kažu da su povećanja u temperaturi previše mala da bi bila detektovana mernom instrumentacijom korišćenom u istraživanjima.

Leszczynski i ostali [10] su pokazali da efekti vezani za HSP proteine nisu posledica termalnih efekata, odnosno zagrevanja. Koristili su 900 MHz GSM mobilni telefon, čije je zračenje izazvalo privremene povećane aktivnosti Hsp27 proteina. Prema njihovim zaključcima, aktivacija HSP protenina može da dovede do razvijanja kancera u mozgu i do povećanja propustljivosti moždano-krvne barijere (BBB)³. Dalje ako bi se ovi događaju ponavljali tokom dužeg perioda moglo bi da dođe do akumulacije oštećenja moždanog tkiva. Oni dodaju da ostali faktori koji dovode do oštećenja moždanog tkiva mogu da sudeluju sa efektima izazvanim zračenjem mobilnih telefona.

French i ostali [11] su razvili teorijski mehanizam pomoću kojeg bi RF-MT zračenje mobilnih telefona moglo da prouzrokuje kancer, a to je pomoću hronične aktivacije odgovora na toplotni šok. Uzlazna regulacija HSP proteina je normalan odbrambeni odgovor na ćelijski stres. Međutim, hronična ekspresija HSP proteina je poznata da indukuje ili promovise onkogenezu, metastazu ili otpor na lekove protiv kancera. Oni predlažu da ponovljeno izlaganje zračenju mobilnih telefona (a svakako i drugih izvora MT zračenja) deluje kao ponavljajući stres vodeći do kontinualne ekspresije HSP proteina u izloženim ćelijama i tkivima, što utiče na njihovu normalnu regulaciju i može dovesti do pojave kancera. Ova hipoteza daje mogućnost direktne veze između RF i MT zračenja (i drugih sveprisutnih digitalnih radio tehnologija) i kancera.

³ BBB – Bloud-Brain Barrier

3.2.2. GENETSKI EFEKTI

U mnogim radovima je pokazano da RF-MT zračenje izaziva promenu ekspresije gena i proteina u određenim ćelijama pri intenzitetima koji su manji od preporučenih granica.

U radu [12] je pregledano 114 naučnih radova koji se bave genetskim efektima RF (MT) nejonizujućeg zračenja, objavljenih u godinama 2007-2014. U analizi tih radova, pokazalo se da je 74 (65%) od njih pokazalo biološke efekte, dok preostalih 40 (35%) nije. U ovom radu je takođe analizirano i 59 radova koji se bave ENF zračenjem.

Više radova je impliciralo učešće slobodnih radikala u genetskim efektima RF zračenja [13-15]. Porast aktivnosti slobodnih radikala i promene u enzimima uključenim u ćelijske oksidativne procese su najdosledniji efekti primećeni u ćelijama ljudi i životinja nakon izlaganja RF zračenju. Mnogi biološki efekti EM polja se mogu objasniti unutarćelijskim promenama u oksidativnom statusu, uključujući genetske efekte [12].

Pokazano je da su efekti RF i ENF zračenja vrlo slični. Objašnjenje sličnih genetskih efekata ovih zračenja čije su energije mnogostruko različite dato je u zanimljivom radu [16] i leži u tome da se DNK ponaša kao fraktalna antena. Kako autori ovog rada navode u svom zaključku, „širok frekventni opseg interakcija sa EM zračenjima je funkcionalna karakteristika fraktalnih antena, a DNK izgleda da poseduje dve strukturne karakteristike fraktalnih antena, električnu provodnost i samosličnost“. Ova osobina DNK bi mogla da objasni osnovni mehanizam njene interakcije sa EM zračenjima, koji je prisutan na svim frekvencijama zračenja.

Dva važna otkrića u studijama jeste da su efekti EM zračenja zavisni od oblika talasa i tipa ćelija [12]. U [15] su pokazali da se povećana aktivnost slobodnih radikala

i fragmentacije DNK u astrocitima⁴ mozga pacova javlja kod 20-minutnog izlaganja 50 Hz amplitudski modulisanom 900 MHz RF zračenju, dok se ovaj efekat ne javlja kod nemoduliranih talasa. Zhao i ostali [17] su otkrili da su neuroni pacova više osetljivi od astrocita, pokazali su da se ekspresija gena neurona pacova menja pod uticajem RF zračenja od 1800 MHz moduliranim sa 217 Hz, što je često u mobilnim telefonima.

Belyaev sa ostalima je u svojim radovima [18,19] pokazao da netermalni efekti MT zračenja mobilnih telefona ispod preporučenih granica zavise od nekoliko fizičkih i bioloških parametara. Primećeni su frekventno zavisni efekti GSM mobilnog telefona na 53BP1/ γ H2AX⁵ proteine i konformacije hromatina u ljudskim limfocitima. Pokazali su da zračenje UMTS mobilnog telefona uzrokuje značajne negativne efekte u ljudskim limfocitima slično efektima GSM telefona i toplotnog šoka. Za razliku od GSM telefona UMTS emituju MT zračenje šireg frekventijskog prozora i hipotetički mogu uzrokovati veće biološke efekte zbog „efektivnijih“ frekvencija. Pokazali su da UMTS MT zračenje utiče na hromatin i sprečava formaciju i lokalizaciju 53BP1/ γ H2AX proteina u žarištu dvolančanih prekida DNK u ljudskim limfocitima i potvrdili su zavisnost efekata od frekvencije. Ono što je posebno zanimljivo jeste da su efekti na 53BP1/ γ H2AX proteine trajali 72 h nakon ozračivanja ćelija, čak duže od stresnog odgovora na toplotni šok. Ovaj dugoživeći efekat na ove važne ljudske ćelije imunog sistema može predstavljati jaku vezu opasnosti po zdravlje od mobilnih telefona.

U [12] se navodi da postoji više studija koje pokazuju da RF zračenje ima negativne efekte na reprodukciju, posebno

⁴ Astrociti su glia ćelije koje se nalaze u mozgu i regulišu hemijsko okruženje neurona.

⁵ 53BP1 i γ H2AX su proteini koji se javljaju kao odgovor na oštećenje DNK i imaju funkciju u popravljanju DNK lanca

na fiziologiju sperme i DNK polnih ćelija, o čemu će biti reči u nastavku.

3.2.3. REPRODUKTIVNI POREMEĆAJI

Pregled BioInitiative 2012 [20,21] je sumirao dokaze koji se tiču neplodnosti i problema sa reproduktivnim potencijalom. Najviše dokaza dolazi od ljudskih i životinjskih ispitivanja na spermi i plodnosti muškaraca.

Zračenje mobilnih telefona oštećuje ljudske spermatozoide sa vrlo niskim gustinama snage (u opsegu 0,00034 - 0,07 $\mu\text{W}/\text{cm}^2 = 3,4 - 700 \mu\text{W}/\text{m}^2$). Nivoi izlaganja su slični nivoima kao posledice nošenja mobilnog telefona u džepu od pantalona, ili od korišćenja laptopa u krilu. Autori navode da spermatozoidi nemaju sposobnost popravke DNK zbog strukture proteina [20,21].

Više istraživanja je pokazalo negativne efekte na kvalitet sperme, pokretljivost i oštećenja DNK kod muškaraca koji koriste mobilne telefone i pogotovo kod onih koji nose mobilne telefone, PDA ili pejdžere na svom kaišu ili u džepu pantalona [13,14,22-24].

Postoji manje studija na životinjama koje su se bavile efektima zračenja mobilnih telefona na parametre plodnosti ženki.

Panagopoulos [25] je u svom radu dobio smanjen razvoj i veličinu jajnika, preranu ćelijsku smrt folikula jajnika i ćelija koje ishranjuju jajnik kod vinskih mušica (*Drosophila melanogaster*). U ovom radu je takođe pokazano da je reproduktivni kapacitet mnogo više oslabljen od strane modulisanog zračenja u odnosu na nedomulirano.

Gul i ostali [26] su pokazali da je izlaganje miševa „standby“ nivou RF zračenja (mobilni telefon je uključen ali ne transmituje telefonski razgovor) uzrokovalo značajno smanjenje broja jajnih folikula kod mladunaca, a takođe i značajno

smanjenje broja mladunaca rođenih u ovim uslovima.

Magras i Xenos [27] su pokazali nepovratnu neplodnost miševa nakon pet generacija izloženih RF-MT zračenju. Miševi su bili izloženi nivou zračenja baznih stanica, u čijoj su se blizini nalazili, manjem od jednog mikrovata po kvadratnom centimetru ($<1 \mu\text{W}/\text{cm}^2$, odnosno $<10 \text{mW}/\text{m}^2$).

3.2.4. NEUROLOŠKI EFEKTI

Postoji dosta objavljenih radova koji se bave uticajem RF i MT nejonizujućeg zračenja na moždanu električnu aktivnost (EEG), kao i na ljudski san. Ovde sam naveo neke od njih koji su primetili efekte. Postoji i veliki broj radova u kojima nikakav efekat nije primećen.

Bak i ostali [28] su primetili uticaj GSM mobilnog telefona na centralni nervni sistem (CNS) i evocirane potencijale (ERP).

Croft je sa ostalima [29] primetio promene alfa talasa u EEG prilikom izlaganja ispitanika zračenju mobilnog telefona.

Leung [30] je primetio slične efekte 2G i 3G mobilnih uređaja na EEG.

Postoji više radova koji su zabeležili uticaje RF i MT zračenja na san. Lustenberger [31] je primetila da pulsno-modulisano 900 MHz zračenje povećava niskotalasnu aktivnost mozga pred kraj spavanja, negativno utičući na kvalitet sna. Loughran [32] potvrđuje da zračenja mobilnog telefona utiču na EEG signale za vreme ne REM faza sna. Važnu stvar koju je Loughran primetila jeste da ovaj efekat zavisi od individualne ličnosti.

U studiji [33] koristeći fluorodeoksiglukoza i pozitronsku emisiju tomografiju su pokazali da izlaganje MT zračenju delova mozga koji su najbliži anteni pri razgovoru telefonom dovodi do povećanja glukoznog metabolizma u njima.

3.2.5. ELEKTROMAGNETSKA PREOSETLJIVOST

U našem svakodnevnom životu smo izloženi povećanim nivoima kombinovanih statičnih, ENF i RF/MT nejonizujućih zračenja. Sva ova polja zajedno čine jedno šarenoliko EM polje, koje se popularno naziva „elektrosmog“.

EM preosetljivost (EHS) predstavlja osetljivost ljudi na EM nejonizujuća zračenja. Veliki broj ljudi prijavljuje probleme sa zdravljem pripisujući ih EM zračenju. Ovi ljudi pokazuju razne simptome koji se, kako ih oni pripisuju, javljaju za vreme ili u toku razgovora mobilnim telefonom, pa i kućnim bežičnim telefonom, ili pak u blizini baznih stanica mobilne telefonije, prilikom korišćenja laptopova, računara, u blizini WiFi predajnika, u prevozu, u automobilu, prilikom korišćenja kućnih aparata [34,35]. Simptomi koji se javljaju su subjektivni i najčešće se javlja više od njih odjednom. Neki glavni simptomi su: poremećaji spavanja, glavobolje, nervoza, zamor, problemi sa koncentracijom, vrtoglavica [34,35].

U upitniku [36] sprovedenom nad lekarima opšte prakse u Švajcarskoj, 69% njih je imalo konsultacije povodom EM zračenja, prosek je bio oko 3 konsultacije godišnje. Lekari su u 54% slučajeva vezu između EM zračenja i simptoma smatrali verovatnom.

U drugom upitniku [37] sprovedenom u Austriji nad lekarima samo trećina nije nikad imala ovakve pacijente. Čak 96% lekara donekle ili potpuno veruje da postoji uticaj EM nejonizujućeg zračenja na zdravlje. Ono što je primećeno jeste da vlasti imaju marginalnu ulogu u informisanju lekara, samo 4% njih kaže da je dobilo informacije o EM zračenju. Vredno pažnje je to da se mišljenje lekara tako razlikuje od nacionalnih i internacionalnih procena zdravstvenog rizika.

U Švedskoj je EHS zvanično prepoznata kao funkcionalni poremećaj

(nije bolest). Ankete pokazuju da oko 3% Švedana ispoljava neke od simptoma kada su izloženi EM zračenju. U Švedskoj se funkcionalni poremećaji posmatraju iz ugla okruženja. Nijedan čovek nije funkcionalno poremećen, već je okruženje to koje izaziva poremećaj. Ovo implicira da bi osobama sa EHS trebalo obezbediti priliku da žive i rade u okruženju sa niskim EM zračenjem [38].

Johansson [39] je otkrio da kod EHS osoba postoji povećana koncentracija mastocita⁶ u koži, pogotovo lica. Veći broj mastocita može objasniti simptome poput svraba, bola, edem i eritema.

Belpomme i ostali [40] su od 2009. istražili, klinički i biološki 727 EHS i MCS samoprijavljenih slučajeva. 521 su dijagnostikovali sa EHS, 52 sa MCS i 154 i EHS i MCS. Pošto je zapaljenje ključan proces koji se javlja i kod EM zračenja i kod hemijskih efekara na tkivo, a histamin je veliki posrednik kod zapaljenja, sistematski su merili histamin u krvotoku pacijenata. Skoro 40% je imalo povećanu histaminemiju⁷. Oksidativni stres je deo zapaljenja i ima ulogu u oštećenju i odgovoru. Nitrotirosin, signal proizvodnje peroksinitrita⁸ (ONOO⁻) i otvaranja moždano-krvne barijere je bio povećan za 28%. Protein S100B koji je takođe indikator otvaranja BBB je bio povećan za 15%. Autoantitela protiv O-mielin su detektovana u 23%, pokazujući da bi EHS i MCS mogli biti povezani sa autoimunim odgovorom. Pronašli su Hsp27 i/ili Hsp70 kod 33% pacijenata. Pošto je većina pacijena prijavila insomniju i umor kao simptome, ispitali su tokom 24h odnos 6-hidroksimelotin sulfata i kreatinina u urinu i otkrili da je smanjen u svim ispitanim slučajevima. Ispitivanjem protoka krvi u

⁶ Mastociti su vrsta leukocita, odnosno belih krvnih zrnaca. Imaju značajnu ulogu u imunom odgovoru i mogu dovesti do alergijskih reakcija.

⁷ Histaminamija – histamin u krvotoku.

⁸ Peroksinitrit je kako kažu u [21] najdestruktivniji molekul u našim telima, aktivniji i od slobodnih radikala.

mozgu otkrili su hipoperfuziju oko talamusa (capsulothalamic) ukazujući da zapalenijski proces uključuje limbički sistem i talamus. Pokazalo se da oba poremećaja uključuju hiperhisteminemiju, oksidativni stres, autoimuni odgovor, hipoperfuziju u capsulotalamičkoj regiji i otvaranje BBB ukazujući na hroničnu neurodegenerativnu bolest. Analiza koincidencije EHS i MCS ukazuje na sličan patološki mehanizam.

3.2.6. UTICAJI NA BIOHEMIJSKE PROCESE ĆELIJE

Pokazano je da radiofrekventno i mikrotalasno nejonizujuće elektromagnetsko zračenje utiče na biohemijske procese u ćelijama. Ono utiče na GJ⁹ jonske kanale remeteći funkciju ćelije. Takođe je pokazano da RF/MT zračenje utiče na i menja koncentracije jona u ćelijama, posebno kalcijuma (Ca²⁺)¹⁰.

Prema Chiangu i ostalima [41] ENF komponenta GSM signala utiče na GJ kanale inhibirajući ih i time remeteći normalno funkcionisanje ćelija.

U radovima [42,43] je pokazano da ENF modulirano RF/MT zračenje utiče na koncentraciju kalcijuma u ćelijama, tačnije na njegovo isticanje iz ćelija. Ovaj efekat se odvija pri niskim gustinama snage sa maksimumom pri 0,6 - 1 mW/cm² [43].

Američki naučnik Adey Ross koji je u svojim mnogobrojnim radovima ukazao na osetljivost organizma na slaba EM polja. U radu [42] su koristili GSM signale modulirane ENF sa gustinama snage 0,06 - 0,436 mW/cm². Istanje kalcijuma je bilo

⁹ *Gap junction* jonski kanali imaju važnu ulogu u me usobnoj komunikaciji ćelija. Ovaj vid me u-ćelijske komunikacije ima važnu ulogu u održavanju ćelijske proliferacije i diferencijacije, a i u višestepenom procesu karcinogeneze [41].

¹⁰ Kalcijum igra ključnu ulogu u fiziologiji i biohemiji organizma i ćelije. Ima važnu ulogu u putevima prenosa signala, u oslaba anju neurotransmitera iz neurona, kontrakcijama mišićnih ćelija, u procesima zgrušavanja krvi i oplodnji.

povećano usled izlaganja zračenju i trajalo je i nakon zračenja. Ćelijska proliferacija, sinteza DNK, RNK i proteina su povećani sa koncentracijama jona u ćelijama, posebno kalcijumom i sa depolarizacijom ćelijske membrane. Kako kažu u ovom radu, čini se da su efekti spoljašnjeg EM polja na koncentracije jona povezani sa interakcijom između EM polja i jonskih kanala membrane, što se ispoljava nepravilnim radom, odnosno otvaranjem ovih kanala.

U ovoj glavi su razmatrani uticaji RF i MT nejonizujućeg zračenja na organizam na ćelijskom i molekularnom nivou, odnosno mikroskopskom koje bi moglo da dovede do poremećaja i bolesti organizma, to je takozvani „upward causation“ (uzlazna uzročnost).

Pokazuje se da EM RF i MT nejonizujuće zračenje u manjim dozama i na finiji način primenjeno može imati pozitivan uticaj na zdravstveno stanje čoveka. O mehanizmima i tehnikama koje se baziraju na ovim saznanjima će biti reči u našem sledećem radu [44], sa predstavljenim mehanizmom uticaja RF i MT nejonizujućeg zračenja na globalno EM polje čoveka koji objašnjava i pozitivne i negativne uticaje ovog zračenja na ljudski organizam preko kvantno-holografskog makroskopskog „downward causation“ (silazna uzročnost) mehanizma, uz moguće preventivne biorezonantne balansirajuće uticaje na organizam izložen štetnim uticajima nejonizujućeg zračenja.

4. ZAKLJUČAK

Digitalne komunikacione tehnologije se sve više razvijaju i sve više bivaju masovno korišćene, pogotovo novi „pametni“ mobilni telefoni i lokalne bežične mreže. Efekti ovih novih tehnologija, tačnije elektromagnetskog zračenja koje ona stvaraju na ljudski organizam dosta su proučavani. Sadašnja nauka nije još u stanju da ih potpuno objasni i da sagleda njihove krajnje opasnosti, ali su primećeni neki

zabrinjavajući efekti koji mogu direktno da ugroze ljudski život ili utiču na potomstvo.

Ovi potencijalno visokorizični efekti RF i MT nejonizujućeg zračenja zahtevaju dodatna eksperimentalna i teorijska istraživanja. Potrebno je da se utvrdi da li su oni zaista toliko opasni i ako jesu trebalo bi preduzeti odgovarajuće mere.

Dok se ne istraži sve vezano za RF i MT zračenja, potrebno je da čovek bude pažljiviji u rukovanju uređajima koji ih emituju i da izbegava nepotrebna izlaganja, a o dodatnim metodama prevencije biće reči u našem sledećem radu [44].

5. LITERATURA

- [1] Johnsen, S., K. J. Lohmann. "Magnetoreception in animals." *Physics Today* 61.3 (2008): 29-35.
- [2] Đorđević, A., *Osnovi elektrotehnike, Elektrostatika*, Akademska misao, Beograd, 2009.
- [3] Đorđević, A., *Osnovi elektrotehnike, Elektromagnetizam*, Akademska misao, Beograd, 2009.
- [4] Vulević B. Procena merne nesigurnosti kod određivanja nivoa elektromagnetskih polja u životnoj sredini. Doktorska disertacija. Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, 2010.
- [5] Adey, W. R. "Evidence for non-thermal electromagnetic bioeffects: Potential health risks in evolving low-frequency and microwave environments." *Electromagnetic Environments and Health in Buildings* (2003).
- [6] Adey, W. R. "Electromagnetic fields, the modulation of brain tissue functions - a possible paradigm shift in biology." *International Encyclopedia of Neuroscience* (2003).
- [7] Raković, D., *Osnovi biofizike*, IASC & IEFPG, Beograd, 2008, i tamošnje reference.
- [8] Alshaim, H. S. *Biological Effects of Low Power Microwaves: Experimental Evaluation at Molecular and Cellular Levels*. Diss. RMIT University, 2014.
- [9] Guideline, I. C. N. I. R. P. "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz)." *Health Phys* 74.4 (1998): 494-522.
- [10] Foster, K. R., R. Glaser. "Thermal mechanisms of interaction of radiofrequency energy with biological systems with relevance to exposure guidelines." *Health Physics* 92.6 (2007): 609-620.
- [11] Leszczynski, D., et al. "Non-thermal activation of the hsp27/p38MAPK stress pathway by mobile phone radiation in human endothelial cells: Molecular mechanism for cancer and blood brain barrier related effects." *Differentiation* 70.2-3 (2002): 120-129.
- [12] French, P. W., et al. "Mobile phones, heat shock proteins and cancer." *Differentiation* 67.45 (2001): 93-97.
- [13] Lai, H. *Genetic Effects of Non-Ionizing Electromagnetic Fields*. The BioInitiative Working Group, 2014.
- [14] Agarwal, A., et al. "Effects of radiofrequency electromagnetic waves (RF-EMW) from cellular phones on human ejaculated semen: an in vitro pilot study." *Fertility and Sterility* 92.4 (2009): 1318-1325.
- [15] De Iuliis, G. N., et al. "Mobile phone radiation induces reactive oxygen species production and DNA damage in human spermatozoa in vitro." *PloS One* 4.7 (2009): e6446.
- [16] Campisi, A., et al. "Reactive oxygen species levels and DNA fragmentation on astrocytes in primary culture after acute exposure to low intensity microwave electromagnetic field." *Neuroscience Letters* 473.1 (2010): 52-55.
- [17] Blank, M., R. Goodman. "DNA is a fractal antenna in electromagnetic fields." *International Journal of Radiation Biology* 87.4 (2011): 409-415.

- [18] Zhao, R., et al. "Studying gene expression profile of rat neuron exposed to 1800MHz radiofrequency electromagnetic fields with cDNA microassay." *Toxicology* 235.3 (2007): 167-175.
- [19] Belyaev, I. Y., et al. "915 MHz microwaves and 50 Hz magnetic field affect chromatin conformation and 53BP1 foci in human lymphocytes from hypersensitive and healthy persons." *Bioelectromagnetics* 26.3 (2005): 173-184.
- [20] Belyaev, I. Y., et al. "Microwaves from UMTS/GSM mobile phones induce long lasting inhibition of 53BP1/ γ -H2AX DNA repair foci in human lymphocytes." *Bioelectromagnetics* 30.2 (2009): 129-141.
- [21] BioInitiative Working Group, C. Sage, D. O. Carpenter. *BioInitiative Report: A Rationale for Biologically-based Public Exposure Standards for Electromagnetic Radiation*, at [www. bioinitiative.org](http://www.bioinitiative.org), 2012.
- [22] Belyaev, I. Y., et al. "EUROPAEM EMF Guideline 2015 for the prevention, diagnosis and treatment of EMF-related health problems and illnesses." *Rev. Environ. Health* 30 (2015): 337-371.
- [23] Eroglu, O., et al. "Effects of electromagnetic radiation from a cellular phone on human sperm motility: an in vitro study." *Archives of Medical Research* 37.7 (2006): 840-843.
- [24] Fejes, I., et al. "Is there a relationship between cell phone use and semen quality?." *Archives of Andrology* (2009).
- [25] Wdowiak, A., L. Wdowiak, H. Wiktor. "Evaluation of the effect of using mobile phones on male fertility." *Annals of Agricultural and Environmental Medicine* 14.1 (2007): 169-172.
- [26] Panagopoulos, D. J. "Effect of microwave exposure on the ovarian development of *Drosophila melanogaster*." *Cell Biochemistry and Biophysics* 63.2 (2012): 121-132.
- [27] Gul, A, H Çelebi, S. Uğraş. "The effects of microwave emitted by cellular phones on ovarian follicles in rats." *Archives of Gynecology and Obstetrics* 280.5 (2009): 729733.
- [28] Magras, I. N., T. D. Xenos. "RF radiation-induced changes in the prenatal development of mice." *Bioelectromagnetics* 18.6 (1997): 455-461.
- [29] Bağ, M., et al. "Effects of GSM signals during exposure to event related potentials (ERPs)." *International journal of occupational medicine and environmental health* 23.2 (2010): 191-199.
- [30] Croft, R. J., et al. "The effect of mobile phone electromagnetic fields on the alpha rhythm of human electroencephalogram." *Bioelectromagnetics* 29.1 (2008): 1-10.
- [31] Leung, S., et al. "Effects of 2G and 3G mobile phones on performance and electrophysiology in adolescents, young adults and older adults." *Clinical Neurophysiology* 122.11 (2011): 2203-2216.
- [32] Lustenberger, C., et al. "Stimulation of the brain with radiofrequency electromagnetic field pulses affects sleep-dependent performance improvement." *Brain Stimulation* 6.5 (2013): 805-811.
- [33] Loughran, S. P., et al. "Individual differences in the effects of mobile phone exposure on human sleep: rethinking the problem." *Bioelectromagnetics* 33.1 (2012): 86-93.
- [34] Volkow, N. D., et al. "Effects of cell phone radiofrequency signal exposure on brain glucose metabolism." *Jama* 305.8 (2011): 808-813.
- [35] Rössli, M., et al. "Symptoms of ill health ascribed to electromagnetic field exposure— a questionnaire survey." *International Journal of Hygiene and Environmental Health* 207.2 (2004): 141-150.
- [36] Kato, Y., O. Johansson. "Reported functional impairments of

- electrohypersensitive Japanese: A questionnaire survey." *Pathophysiology* 19.2 (2012): 95-100.
- [37] Huss, A., M. Rössli. "Consultations in primary care for symptoms attributed to electromagnetic fields—a survey among general practitioners." *BMC Public Health* 6.1 (2006): 1.
- [38] Leitgeb, N., J. Schröttner, M. Böhm. "Does "electromagnetic pollution" cause illness?." *Wiener Medizinische Wochenschrift* 155.9-10 (2005): 237-241.
- [39] Johansson, O. "Aspects of studies on the functional impairment electrohypersensitivity." *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 10. No. 1. IOP Publishing, 2010.
- [40] Johansson, O. "Electrohypersensitivity: state-of-the-art of a functional impairment." *Electromagnetic Biology and Medicine* 25.4 (2006): 245-258.
- [41] Belpomme, D., C. Campagnac, P. Irigaray. "Reliable disease biomarkers characterizing and identifying electrohypersensitivity and multiple chemical sensitivity as two etiopathogenic aspects of a unique pathological disorder." *Reviews on Environmental Health* 30.4 (2015): 251-271.
- [42] Chiang, Huai, Genlin Hu, Zhengping Xu. "Effects of extremely low frequency magnetic fields on gap junctional intercellular communication and its mechanism." *Progress in Natural Science* 12.3 (2002): 166-169.
- [43] Adey, W. R., S. M. Bawin, A. F. Lawrence. "Effects of weak amplitude modulated microwave fields on calcium efflux from awake cat cerebral cortex." *Bioelectromagnetics* 3.3 (1982): 295-307.
- [44] Kalajdžić, A., D. Raković. "O preventivnim biorezonantnim balansirajućim uticajima na organizam izložen štetnim uticajima nejonizujućeg zračenja." *DIT (Društvo, Istraživanje, Tehnologije)*, podneto za štampu (2019), i tamošnje reference

Adresa autora: Aleksandar Kalajdžić, dipl. inž,
 Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu,
 Bulevar Kralja Aleksandra 73, Beograd
 e-mail: rakovicd@etf.bg.ac.rs
 Rad primljen: jul 2019.
 Rad prihvaćen: septembar 2019.

Ovaj pregledni stručni rad baziran je na delu Diplomskog rada Aleksandra Kalajdžića, "O biološkim uticajima RF i MT nejonizujućeg zračenja", odbranjenog pod mentorstvom prof. Dejana Rakovića, na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu, na Smeru za biomedicinski i ekološki inženjering, 29.09.2016. Poziv za štampanje tematskog dvodelnog stručnog rada u časopisu DIT potekao je posle predavanja prof. Dejana Rakovića na temu "O biološkim uticajima RF i MT nejonizujućeg zračenja", na Tribini u organizaciji Kulturnog centra, Zrenjanin, 10.10.2019. Ovom prilikom autori se zahvaljuju i dr sci. Branislavu Vuleviću, naučnom saradniku Instituta Nikola Tesla, na smernicama i literaturi iz oblasti bioloških uticaja ENF nejonizujućeg zračenja.