

# Učinci radiofrekvencijskog elektromagnetskog zračenja na mušku plodnost



I. Žura Žaja, P. Martinec, I. Butković\*, M. Vilić, S. Milinković-Tur, S. Vince, N. Žura, A. Sluganović, M. Samardžija, J. Pejaković Hlede i I. Folnožić

## Sažetak

Elektromagnetsko se zračenje emitira iz prirodnog okruženja, ali i uporabom industrijskih i svakodnevnih uređaja za bežičnu komunikaciju, stoga su ljudski i životinjski organizmi stalno izloženi zračenju. Tijekom posljednjih godina, zbog brzog tehnološkog napretka, elektromagnetsko zračenje iz umjetnih izvora premašilo je vrijednosti zračenja prirodnog podrijetla. Opća zabrinutost svih nas, zbog sve većeg broja uređaja (mobilnih telefona, prijenosnih računala, Wi-Fi-ja i mikrovalnih pećnica), koji koriste radiofrekvencijsko elektromagnetsko zračenje (RF-EMZ) opravdana je zbog sve brojnijih dokaza o njihovoj štetnosti na žive organizme. Suvremeni uređaji moderne tehnologije emitiraju radiofrekvencijske elektromagnetske valove malih frekvencija koje ljudsko i životinjsko tijelo apsorbira što može imati potencijalne štetne učinke na: mozak, srce, endokrini sustav i reproduktivnu funkciju. Muški je reproduktivni sustav jedno od najosjetljivijih tkiva na RF-EMZ-e. Tako je primjerice, iz trenutno dostupnih studija provedenih *in vitro* i *in vivo*, jasno da RF-EMZ-e ima štetne učinke

na spermatogenezu, odnosno kakvoću ejakulata ljudi i životinja – broj spermija u ejakulatu, preživljavanje, morfologiju i gibljivost spermija – utječe na stanični metabolizam i endokrini sustav i može prouzročiti genotoksičnost, genomsku nestabilnost i oksidativni stres, a to može prouzročiti neplodnost. Štetni učinci RF-EMZ-a dijele se na toplinske i netoplinske. Većina negativnih bioloških učinaka pripisuje se netoplinskim učincima, a toplinski se učinci nastali RF-EMZ mobilnog telefona, smatraju manje štetnima. Zbog stvaranja prevelike količine reaktivnih kisikovih spojeva u muškom spolnom sustavu hipertermija skrotuma i povećani oksidativni stres mogu biti ključni mehanizmi putem kojih RF-EMZ-e utječe na plodnost muškaraca. Navedeni su i negativni učinci povezani s vremenom korištenja, ponajprije mobilnog telefona. Stoga je cilj ovoga preglednog rada opisati neke od učinaka RF-EMZ-a na muški spolni sustav.

**Ključne riječi:** *elektromagnetsko radiofrekvencijsko zračenje, muški spolni sustav, kakvoća ejakulata, endokrini sustavi, oksidativni stres*

Dr. sc. Ivona ŽURA ŽAJA, dr. med. vet., docentica, Paulina MARTINEC, dr. med. vet., dr. sc. Ivan BUTKOVIĆ\*, dr. med. vet., (dopisni autor, e-mail: [ibutkovic@vef.unizg.hr](mailto:ibutkovic@vef.unizg.hr)), dr. sc. Marinko VILIĆ, dr. med. vet., redoviti profesor, dr. sc. Suzana MILINKOVIĆ-TUR, dr. med. vet., redovita profesorica, dr. sc. Silvijo VINCE, dr. med. vet., redoviti profesor, Anamaria SLUGANOVIĆ, dr. med. vet., dr. sc. Marko SAMARDŽIJA, dr. med. vet., redoviti profesor, dr. sc. Jadranka PEJAKOVIĆ HLEDE, dr. med. vet., stručna suradnica, dr. sc. Ivan FOLNOŽIĆ, dr. med. vet., izvanredni profesor, Veterinarski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Hrvatska; Nikolino ŽURA, mag. physioth., Klinički bolnički centar Zagreb, Hrvatska

## Uvod

U današnjem svijetu u kojem živimo sastavni dio naše svakodnevice je uporaba moderne tehnologije kao načina komunikacije. Ljudi i životinje su svakodnevno izloženi sve većem broju radiofrekvencijskih elektromagnetskih polja (RF-EMP) nastalih proizvodnjom i opskrbom električne energije, televizijskih uređaja, osobnih računala, radija, mobilnih telefona i bežične internetske tehnologije kao što su: Wi-Fi i 5G ruteri/modemi (Gye i Park, 2012., Okechukwu, 2020.). Razvitkom tehnologije sve je veća izloženost živih bića zračenjima (RF-EMZ) koji interferiraju s načinom funkcioniranja organizama u njihovoj okolini, a time potencijalno imaju i štetno djelovanje. Stoga je opravdana zabrinutost svih nas za ljudsko i životinjsko zdravlje. RF-EMZ može prouzročiti toplinske (zagrijavanje tijela) i netoplinske (biološke i genetske) učinke (Žura Žaja i sur., 2021.).

Mobilni telefoni su najzastupljeniji uređaji u primjeni svekolikog pučanstva, a emitiraju radiofrekvencijske elektromagnetske valove, koji prenose signale s mobilnog telefona do baznih stanica i antena. Frekvencija takvih valova je niska, ali usprkos tome postoji određeni rizik za ljudsko i životinjsko zdravlje, jer tijela ljudi i životinja mogu djelovati kao antene koje apsorbiraju te valove i pretvaraju ih u vrtložne struje (Khullar, 2012.). Jedan od najosjetljivijih i najvažnijih fizioloških sustava koji je izložen RF-EMP-a je spolni sustav (Asghari i sur., 2016.). Testisi kao organi muškog spolnog sustava u kojima se stvaraju spermiji i testosteron, vrlo su osjetljivi na razne vanjske i unutarnje čimbenike kao što su: hipertermija, upala, zračenje te izlaganje agensima koji dovode do apoptoze zametnih stanica (Bahadur i sur., 2015.).

Radiofrekvencijsko elektromagnetsko zračenje prouzroči smanjeno stvaranje i

izlučivanje melatonina (hormona epifize), što dovodi do smanjenog izlučivanja gonadotropnih hormona adenohipofize (Al-Akhras i sur., 2006., Ciani i sur., 2021.), odnosno smanjeno stvaranje testosterona i spermatogenezu (Adah i sur., 2018., Kesari i sur., 2018., Okechukwu, 2020.). Nadalje, RF-EMZ-e povećava zastupljenost apoptoze zametnih stanica, oksidativnog stresa i smanjenje antioksidacijske zaštite u muškom spolnom sustavu (Kesari, 2010., Adah i sur., 2018.). Osim navedenog, produljeno izlaganje testisa i sekundarnih spolnih organa RF-EMZ-u ima i štetan učinak na spermije i može izazvati genetska oštećenja, odnosno oštećenje DNK-a spermija (Yildirim i sur., 2015.). Osim navedenog, dugotrajna izloženost RF-EMZ-u utječe i na stanični metabolizam spermija što se očituje smanjenom gibljivosti, smanjenim brojem i preživljavanjem spermija i povećanjem udjela spermija patološke morfologije u ejakulatu ljudi i životinja što može prouzročiti neplodnost (Khullar, 2012., Adah i sur., 2018., Kesari i sur., 2018., Okechukwu, 2020.).

U ovom će radu veća pozornost biti usmjerena na učinke RF-EMZ-a frekvencija 4G i starije tehnologije na muški spolni sustav o čijim se posljedicama djelomično znade, dok posljedice koje prouzroče izloženost RF-EMZ-a frekvencija 5G tehnologije još nisu istražene.

## Elektromagnetsko zračenje

Elektromagnetsko se zračenje može definirati kao prijenos energije u obliku elektromagnetskih valova koji se šire vakuumnim prostorom brzinom svjetlosti. Elektromagnetski spektar predstavlja raspon i opseg frekvencija elektromagnetskog zračenja i pripadajućih valnih duljina fotona, a dijeli se na neionizirajuće i ionizirajuće zračenje. Zračenje koje ima

dovoljnu energiju ioniziranja molekule ili atome tvari pri njihovu međudjelovanju nazivamo ionizirajućim zračenjem, a čine ga: alfa, beta, gama zračenje, X zrake i kozmičko zračenje. Najmanja energija koja je potrebna za ionizaciju i ispuštanje elektrona iz molekule ili atoma smatra se 10eV (Marjanović i sur., 2012.). Neionizirajuće elektromagnetsko zračenje je zračenje nižih frekvencija i nema dovoljnu energiju za ionizaciju atoma, a sastoji se od: vidljive svjetlosti, niskoenergetskog ultraljubičastog zračenja, infracrvenog zračenja, radiovalnog i mikrovalnog polja te polja ekstremno niskih frekvencija (ITU, 2008., Kesari i sur., 2018., Žura Žaja i sur., 2021.) (Slika 1.).

### Neionizirajuće zračenje

Ljudi i životinje izloženi su neionizirajućem zračenju prirodnog i antropogenog podrijetla. U izvore neionizirajućih zračenja ubrajaju se svi uređaji koji pro-

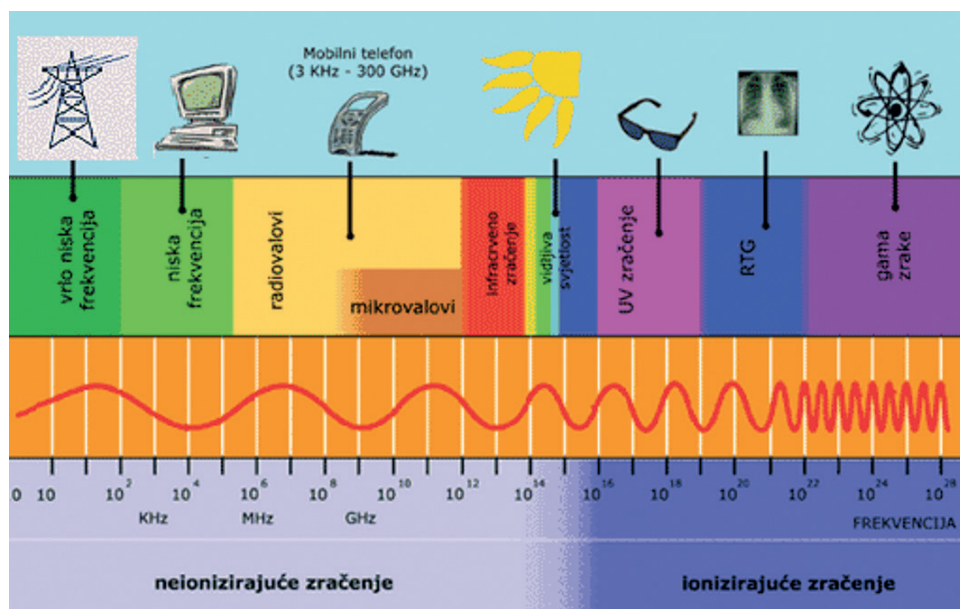
izvode jednu ili više vrsta neionizirajućih zračenja (Kesari i sur., 2018., Santini i sur., 2018., Žura Žaja i sur., 2021.). Neionizirajuće zračenje različitih frekvencija antropogenog podrijetla, onoga koje je proizveo čovjek (radiokomunikacijski sustavi, mobilni telefoni, mikrovalne pećnice, izvori iz područja bežičnog komunikacijskog sustava) i onečistio okoliš naziva se elektromagnetski smog ili elektrosmog (Kesari i sur., 2018.).

## Učinci radiofrekvencijskog zračenja

Radiofrekvencijsko elektromagnetsko zračenje ima toplinske i netoplinke učinke (Challis, 2005., Žura Žaja i sur., 2021.).

### Toplinški učinci radiofrekvencijskog elektromagnetskog zračenja

Toplinški učinak, tj. zagrijavanje tkiva povezan je s lokalnim povećanjem tem-



Slika 1. Spektar elektromagnetskog zračenja

([http://www.megon.net/docs/1\\_tko\\_to\\_tamo\\_zraci/osnove\\_o\\_zracenju.htm](http://www.megon.net/docs/1_tko_to_tamo_zraci/osnove_o_zracenju.htm))

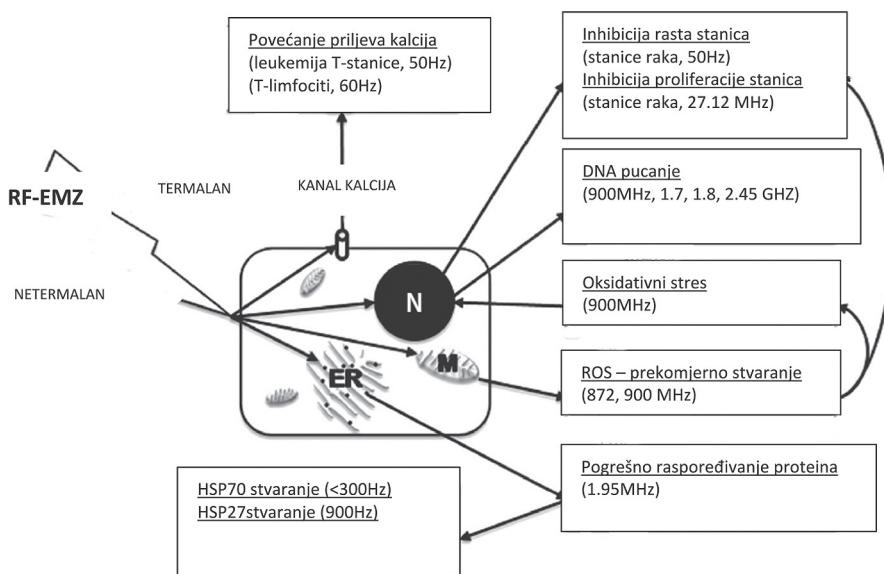
perature (Challis, 2005., Pourlis, 2009.). Na lokalno povećanje temperature i na sam toplinski učinak djeluje nekoliko čimbenika. Nekoliko čimbenika su: površina izloženog tkiva, frekvencija zračenja i vrijeme izloženosti tkiva zračenju i mogućnost odvođenja topline. Slabija sposobnost odvođenja topline testisa zbog slabe prokrvljenosti je razlog njihove osjetljivosti na RF-EMZ-e; toplinski učinci zbog uporabe mobitela manifestiraju se kao: glavobolja, osjećaj topline ili peckanje oko uha i lica te promjenama krvno-moždane barijere (Otzuran i sur., 2002., Khullar, 2012.).

### Netoplinski učinci radiofrekvencijskog elektromagnetskog zračenja

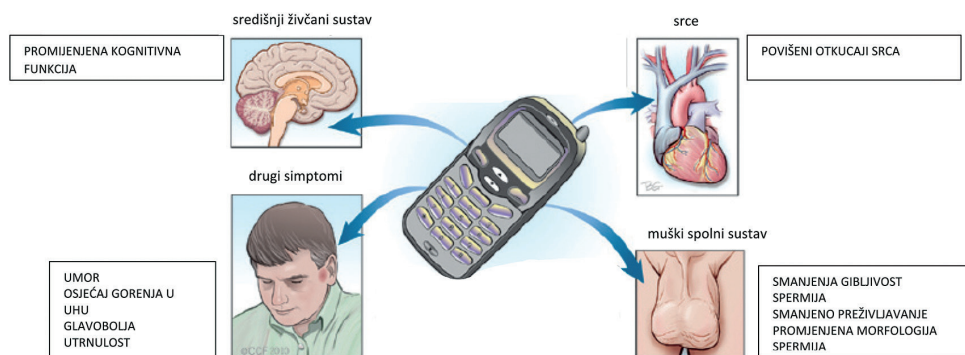
Netoplinski učinci uključuju sve interakcije bioloških tkiva s RF-EMV-a bez stvaranja topline ili bez mjerljivog porasta temperature (Slika 2.). Najštetniji učinak na žive organizme ima magnetsko

polje zbog svoje sposobnosti prodiranja u ljudska i životinjska tijela, dok s druge strane električno polje elektromagnetskih valova ima slabu sposobnost prodiranja kroz ljudsku kožu pa je samim time i manje štetno (Khullar, 2012.). Inducirane izmjenične struje u tijelima koje nastaju zbog izloženosti RF-EMZ-a mogu prouzročiti netoplinske učinke na: tkiva, stanice i molekule. Netoplinski učinci uključuju: poremećaj spavanja, učinak na kognitivne funkcije, povećanje krvnog tlaka i imaju potencijalno kancerogene učinke (Otzuran i sur., 2002., Khullar, 2012.). Mobilni telefoni svojim odašiljanjem i primanjem mikrovalnog zračenja na frekvencijama koje potiču rotaciju molekula vode i nekih organskih molekula, povezani su s toplinskim i netoplinskim učincima. Većina bioloških učinaka RF-EMV-a mobitela može se objasniti netoplinskim učinkom.

Kada tijelo koje ima sposobnost vodljivosti bude izloženo RF-EMZ-u dolazi



**Slika 2.** Učinci radiofrekvencijskog elektromagnetskog zračenja na staničnoj razini. RF-EMZ – radiofrekvencijsko elektromagnetno zračenje; N – jezgra; ER – endoplazmatska mrežica; M – mitohondriji, ROS – reaktivni kisikovi spojevi, HSP70, HSP27 – proteini toplinskog stresa (Prema Gye i Park, 2012.)



**Slika 3.** Simptomi različitih organskih sustava prouzročenih zračenjem mobilnog telefona (prema Agarwal i sur., 2011.)

do stvaranja električnih polja i cirkulirajuće električne struje, koja se istodobno natječe s endogenom strujom i naponima organizma, i na taj način narušava normalnu fiziološku ravnotežu (Adah i sur., 2018.). Ukoliko gustoća struje prelazi određene vrijednosti, zbog depolarizacije membrana može doći do stimulacije mišića i živaca (Adah i sur., 2018.). Dubina prodiranja zračenja u tijelo ovisi o njegovoj frekvenciji i svojstvima izloženog dijela tijela (Makker i sur., 2009.). Vrlo niskofrekventna RF-EMP-a mogu prouzročiti veću štetu u tjelesnim sustavima, jer su te frekvencije slične fiziološkim frekvencijama, a njihovo preklapanje može prouzročiti promjene u biološkim procesima. Tako primjerice, kada su izvori vrlo niskofrekventnih RF-EMP-a u bliskom kontaktu s tijelom dolazi do stvaranja vrtložnih struja i zagrijavanja (Kesari i Behari, 2012.). Životinje su, za razliku od ljudi, izložene promjenjivim količinama RF-EMZ-a, jer su često daleko od baznih stanica stoga ih od zračenja često odvajaju metalni kavez (Balmori, 2005.). Izloženost životinja RF-EMZ-u može prouzročiti pogoršanje zdravlja, promjene u ponašanju (Marks i sur., 1995.) i smanjenje plodnosti (Ferne i sur., 2000., Adah i sur., 2018.). Poznato je da uporaba elek-

troničkih kućanskih uređaja i mobilnih telefona prouzroči smanjenje plodnosti, ali i neplodnost (Erogul i sur., 2006.). Smatra se da je muški spolni sustav jedan od najosjetljivijih na RF-EMZ-e (Liu i sur., 2015.).

## Učinci radiofrekvencijskog elektromagnetskog zračenja na muški spolni sustav

Zbog sve veće izloženosti ljudi i životinja RF-EMP-a nastalih uporabom uređaja moderne tehnologije, zabrinutost svih nas sve je veća zbog mogućeg utjecaja na zdravlje (Slika 3.) (Marjanović i sur., 2012., Wdowiak i sur., 2017., Adah i sur., 2018.). Tehnološkim napretkom radiofrekvencijsko zračenje iz umjetnih izvora višestruko je premašilo količinu zračenja prirodnog podrijetla do  $10^{18}$  puta za frekvenciju od 900 MHz. Mobilni su telefoni najzastupljeniji uređaji u populaciji, a rade na različitim frekvencijama koje se razlikuju ovisno o proizvođaču i zemlji korištenja. Intenzivnija istraživanja vezana za biološki utjecaj mikrovalnog zračenja na ljudsko i životinjsko zdravlje započela su tijekom Drugog svjetskog rata potaknuta razvojem radara (Kesari, 2018.).

Utjecaj radiofrekvencijskog elektromagnetskog zračenja na ejakulat u ljudi istražuje se od ranih šezdesetih godina prošlog stoljeća. Naime, Prausnitz i Susskind (1962.) su prvi opisali rezultate utjecaja RF-EMZ-a na testise. Zbog smanjene plodnosti muškaraca tijekom 20. stoljeća znanstveni interes za istraživanja učinka RF-EMZ-a na spolni sustav muškaraca se povećao. Utvrđeno je da je broj spermija u ejakulatu muškaraca 1940. godine bio gotovo dvostruko veći od broja spermija 1990. godine (Giwereman i sur., 1993.). Misli se da muškarci koji nose mobilne telefone u džepovima hlača kroz dulje vremensko razdoblje, svakodnevno povećavaju mogućnost posljedica RF-EMZ-a, a posebno su mladići rizična skupina (Oh i sur., 2018.). Osim reproduktivnih organa i glava je znatno izložena RF-EMZ-a, jer je najviše u doticaju s mobilnim telefonima (Al-Bayyari, 2017.).

Izlaganje ejakulata RF-EMZ-a na frekvenciji mobilnih telefona prouzroči: smanjenje koncentracije, gibljivosti, preživljavanje spermija i povećanje udjela spermija s patološkom morfologijom u muškaraca (Erogul i sur., 2006., Agarwal i sur., 2007., Okechukwu, 2020.). Štakori izloženi RF-EMZ-u frekvencije od 10 GHz dva sata, dnevno tijekom 35 dana, imaju smanjeno stvaranje spermija (Kesari i sur., 2010.). Smanjena plodnost štakora se dovodi u vezu: sa stvaranjem prevelike količine reaktivnih kisikovih spojeva (ROS), smanjenom aktivnosti antioksidacijskih enzima, pucanjem DNK-a lanca, patološkom morfologijom spermija i smanjenom koncentracijom testosterona (Kesari i sur., 2010.). Ejakulat bika *in vitro* ozračen frekvencijom od 1800 MHz očituje nakon kratkotrajnog izlaganja i značajan porast gibljivosti spermija, dok duža izloženost ejakulata RF-EMZ-u prouzroči pad njihove gibljivosti (Lukac i sur., 2011.). Uzrok oštećenja spermija izlože-

nih RF-EMZ-u je nastanak veće količine ROS-a. ROS su nestabilne reaktivne molekule koje se fiziološki stvaraju u nekoliko tipova stanica, a uključene su između ostalog i u regulaciju ekspresije gena koja određuje: protuupalni odgovor, rast stanica, diferencijaciju, proliferaciju i odgovor na stres (Simko i Mattson, 2004.). Pored nastanka ROS-a, uz smanjenu količinu i/ili aktivnosti antioksidansa, dolazi do oštećenja spermija, odnosno oštećenja membrane stanica i organela, lipida, bjelančevina pa čak i molekule DNK-a (De Iulius i sur., 2009., Kim i sur., 2021.).

### **Biofizički pokazatelji radiofrekvencijskog elektromagnetskog zračenja**

Mjerenjem brzine apsorpcije zračenja biofizički pokazatelji opisuju fizičke i biološke čimbenike koji određuju staničnu radiosjetljivost nakon izlaganja RF-EMZ-u. Elektromagnetsko polje mora prodrijeti u izloženi biološki sustav i potaknuti unutarnje elektromagnetsko polje koje će potaknuti biološki odgovor. Dubina prodiranja ili apsorpcija RF-EMZ-a ovisi o pokazateljima polja koje prodire u tkivo (poput intenziteta i gustoće snage), području izloženosti, obliku, orijentaciji objekta i svojstvu zračenja (Sharma i sur., 2017.). Navedeni čimbenici izravno i neizravno sudjeluju u stvaranju slobodnih radikala za koje je utvrđeno da nakon izlaganja mobilnog telefona na frekvenciji 3G mreže izravno mogu oštetiti DNK-a spermija štakora (Kumar i sur., 2014.). Oštećenje DNK-a ukazuje na ozbiljnost promjena i opravdanu zabrinutost te povezanosti RF-EMZ-a i neplodnosti, a i raka testisa. Postavlja se pitanje na koji način tako niskofrekventno RF-EMZ-e može dovesti do oštećenja DNK-a. Naime, fotoni u RF-EMZ-u nemaju dovoljno energije da bi prouzročili pucanje kemijskih veza u molekulama te da prouzroče

izravno ioniziranje bioloških molekula (Sharma i sur., 2017.). Prihvaćena je teorija da do oštećenja dolazi indirektnim putem - stvaranjem velike količine slobodnih radikala, koji oštećuju DNK-a (Simko, 2007., Kesari, 2018.). Mobilni telefoni i prijenosni tornjevi podjednako su odgovorni za zdravstvene učinke, jer emitiraju zračenje obližnjim baznim stanicama ili antenama. Zračenje mobilnog telefona nastaje u odašiljaču, a emitira se kroz antenu u obliku radio valova (Sharma i sur., 2017.). Tijela ljudi i životinja su poput antena koja apsorbiraju zračenje i pretvaraju ga u izmjeničnu vrtložnu struju (Bhat, 2013.). Utjecaj elektromagnetskog polja na ljudsko tijelo mjeri se putem standardizirane jedinice zvane specifična gustoća apsorbirane snage (engl. *specific absorption rate - SAR*). SAR je mjera brzine apsorbiranja energije po jedinici mase biološkog tkiva, a izražava se u vatima po kilogramu (W/kg). Dok prodire u tjelesna tkiva, a tkivo je izloženo RF-EMP-u, energija se raspršuje i slabi.

Testisi su vrlo osjetljivi na zračenje, a osim dubine prodiranja, koja je bitan čimbenik oštećenja testisa, bitno je vrijeme i trajanje izlaganja zračenju, broj izlaganja u danu, količina nezrelih stanica izloženi zračenju i količina vode u organu koji je izložen. Veća količina vode u organizmu povećava učinak zračenja. Smatra se i da morfološke promjene prouzročene RF-EMP-m ovise o: vrsti, dozi, načinu i trajanju izlaganja RF-EMZ-u (Türedi i sur., 2015., Kesari, 2018.).

### **Učinci radiofrekvencijskog elektromagnetskog zračenja na ejakulat**

Prema istraživanjima iz 2005. godine nešto manje od 10 % parova u Sjedinjenim Američkim Državama bilo je neplodno, stoga se već tada predviđalo povećanje broja i do 15 % u industrijaliziranim državama (Chandra i sur., 2005., Homan

i sur., 2007.). Smatra se da je povećana uporaba bežične tehnologije (npr. mobilnih telefona ili Wi-Fi-ja), koja odašilje RF-EMZ-e usko povezana s neplodnošću i da je uzrok oštećenja spermija (Adah i sur., 2018., Kesari i sur., 2018.). Dokazano je da frekvencija mobilnih telefona i Wi-Fi-ja povezana sa smanjenjem broja gibljivih i progresivno gibljivih spermija, smanjenjem preživljavanja spermija i povećanjem broja spermija patološke morfologije kao i stvaranjem prekomjerne količine ROS-a, što u kombinaciji s drugim štetnim čimbenicima poput konzumacije opijata, pušenje cigareta i način života može dovesti do smanjene plodnosti u ljudi i životinja (Agarwal i sur., 2007., Kumar i sur., 2011., Avendano i sur., 2012., Adah i sur., 2018., Kesari i sur., 2018.).

### **Broj spermija**

Za normalno funkcioniranje testisa ljudi i životinja neophodna je određena temperatura, odnosno 2 °C niža temperatura od normalne tjelesne temperature. Povećanje temperature testisa, što nije isključeno u određenim okolnostima pri uporabi uređaja bežične tehnologije, može prouzročiti nepovratni poremećaj spermatogeneze (Kandeel i Swerdloff, 1988., Adah i sur., 2018.).

Značajno smanjen broj spermija i povećan broj apoptotskih stanica utvrđen je u štakora nakon njihovog izlaganja mobitelu u trajanju od 2 sata dnevno tijekom 35 dana (Kesari i sur., 2010.). U štakora koji su bili izloženi prijenosnim računalima povezanim s Wi-Fi mrežom utvrđeno je smanjenje broja i gibljivosti spermija. Štakori su bili izloženi RF-EMZ-u 7 sati dnevno tijekom jednog tjedna (Mortazavi i sur., 2010.). Štetni učinak RF-EMZ-a, posebice mobilnog telefona na testise utvrdila su brojna istraživanja na ljudima i životinjama. Zbog prekomjernog stvaranja slobodnih radikala u mitohondrijima

spermija dobiveni se učinak pripisuje nastanku oksidativnog stresa (De Iuliis i sur., 2009., Ghanbari i sur., 2013., Gorpinchenko i sur., 2014., Jonwal i sur., 2018.).

### Gibljivost i morfologija spermija

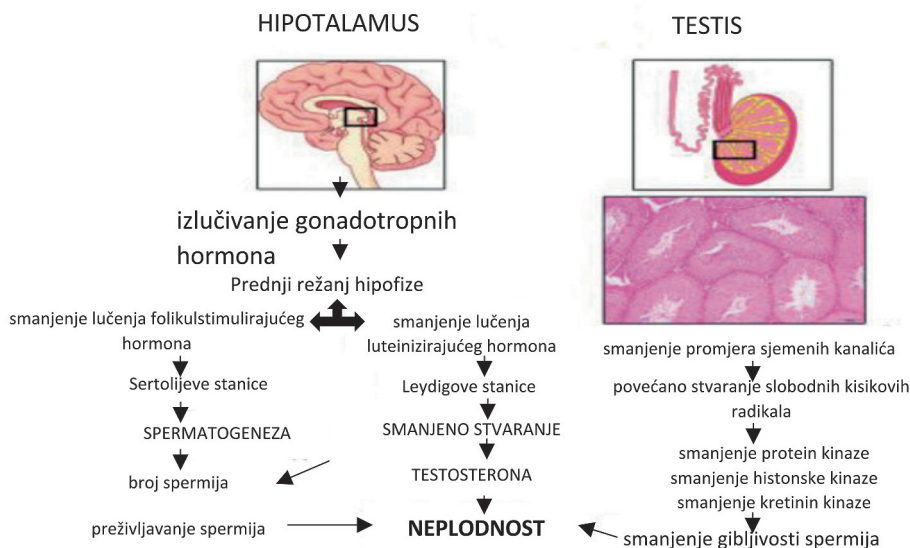
Izloženost testisa RF-EMZ-u prouzroči značajno smanjenje promjera i težine sjemenih kanalića testisa, odnosno patoloških i fizioloških promjena u tkivu testisa (Luo i sur., 2013., Kumar i sur., 2014., Bahaodini i sur., 2015.). Dugotrajna upotreba mobilnih telefona prouzroči smanjenu koncentraciju, gibljivost i preživljavanje spermija te smanjeni udio spermija normalne morfologije (Kesari i Behari, 2012., La Vignera i sur., 2012.), odnosno smanjenju progresivnu gibljivost spermija u muškaraca koji su nosili mobilni telefon u džepovima (Al-Bayyari i sur., 2017.).

Mehanizam negativnog učinka RF-EMZ-a na testise i smanjenja kakvoće ejakulata najvjerojatnije je povezan s nastankom oksidativnog stresa i prekomjer-

nog stvaranja ROS-a. Slobodni radikali oksidiraju fosfolipide u izvanstaničnom dijelu membrane spermija te tako prouzročuju smanjenu membransku fluidnost i preživljavanje spermija što prouzroči njihovu smanjenu gibljivost (Kesari i sur., 2018., Žura Žaja i sur., 2019.a). Poznato je da smanjenu gibljivost i preživljavanje spermija prouzroči povećanje koncentracije superoksidnog aniona (Agarwal i sur., 2009.). Nastali ROS, osim što utječu na gibljivost i preživljavanje prouzročuju oštećenja staničnih organela spermija poput: DNK-a i mitohondrija (Adah i sur., 2018.).

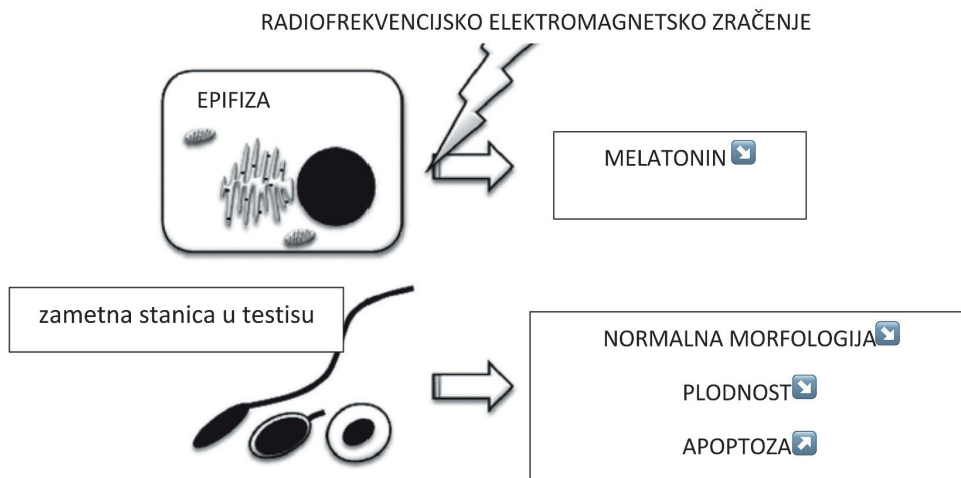
### Učinci radiofrekvencijskog elektromagnetskog zračenja na spolne hormone

Izloženost životinja RF-EMZ-u može utjecati na aktivnost njihove epifize i hipofize (Rodriguez i sur., 2004., Cucurachi i sur., 2013., Okechukwu, 2020.). RF-EMZ-e može utjecati na smanjeno izlučivanje melatonina, odnosno smanjenje biološkog učinka melatonina u ljudi i životinja (Yellon, 1994., Jarupat i sur., 2003., Kesari



**Slika 4.** Učinak radiofrekventnog elektromagnetskog zračenja mobilnog telefona na: hipotalamus, prednji režanj hipofize i testise (Altun i sur., 2018., Okechukwu, 2020.)





**Slika 5.** Sažeti prikaz učinaka radiofrekvencijskog elektromagnetskog zračenja na mušku plodnost. ↘ – povećanje; ↗ – smanjenje ili inhibicija (Preuzeto od Gye i Park, 2012.)

i sur., 2018.) (Slika 4.). Primjerice, štakori koji su bili izloženi RF-EMZ-u frekvencije od 50 Hz tijekom 6 tjedana, imali su smanjenu koncentraciju melatonina u epifizi i perifernoj krvi (Rodriguez i sur., 2003.). Melatonin regulira izlučivanje gonadotropnog oslobađajućeg hormona iz hipotalamusa, pritom utječući, na prednji režanj hipofize, odnosno na izlučivanje folikulostimulirajućeg hormona i luteinizirajućeg hormona (LH). LH stimulira Leydigove stanice na stvaranje testosterona, a testosteron je neophodan za spermatogenezu, stvaranje spermija, za normalnu morfologiju i fiziologiju sjemenih kanalića (Slika 4.). Dokazano je da su Leydigove stanice miša i štakora osobito osjetljive na RF-EMZ-e, a to se odražava na smanjenu koncentraciju testosterona i spermatogenezu (Kumar i sur., 2013.). Stoga je zbog negativnog učinka RF-EMZ-a smanjeno izlučivanje melatonina (hormona epifize), a posljedično tome i smanjeno izlučivanje gonadotropnih hormona adenohipofize (Al-Akhras i sur., 2006., Ciani i sur., 2021.), smanjena proizvodnja testosterona i spermatogeneza (Adah i sur., 2018., Kesari i sur., 2018., Okechukwu, 2020.).

### **Učinci radiofrekvencijskog zračenja na biokemijske pokazatelje sjemene plazme**

Izocitrat dehidrogenaza je jedan od važnih enzima u ciklusu limunske kiseline koji je pod utjecajem RF-EMP-a (Simko i Mattson, 2004.). Promjene u aktivnosti enzima dovode do smanjenog stvaranja adenozin trifosfata (ATP) u stanicama sisavaca, a budući da gibljivost spermija ovisi o ATP-u, takav mehanizam može proučiti smanjenje gibljivosti spermija tijekom izlaganja takvom zračenju (Slika 4.) (Adah i sur., 2018., Žura Žaja i sur., 2019.a). Spermiji gube citoplazmu u procesu sazrijevanja, što dovodi do gubitka antioksidativnog zaštitnog mehanizma koji se nalazi u citoplazmi, a taj ih proces čini podložnim oštećenju DNK-a (Žura Žaja i sur., 2016.a,b, Žura Žaja i sur., 2019.a,b). Tijekom sazrijevanja spermija dolazi do takvih promjena da se proces apoptoze ne može pokrenuti kao odgovor na bilo koji oblik teškog genetskog oštećenja (Aitken, 1999.), a tijekom procesa sazrijevanja dolazi do odvajanja spermija od Sertolijevih stanica, stanica – koje

ih prehranjaju (Kesari i Behari, 2012.). Poznato je da električno polje može utjecati na staničnu funkciju na način da mijenja strukturu ionskih kanala i integritet stanične membrane (Cucullo i sur., 2005.). Poznato je i da RF-EMZ-e može prouzročiti poremećaje u mehanizmima membrane stanica spermija koji reguliraju prolaz iona, posebno natrija i kalija, a posljedno i udio vode što negativno utječe na preživljavanje spermija (Ayrapetyan, 2006.). Misli se da je posljedica izravnog učinka RF-EMZ-a apoptoza i smanjenje broja stanica u sjemenim kanalici (Slika 5.) (Adah i sur., 2018.).

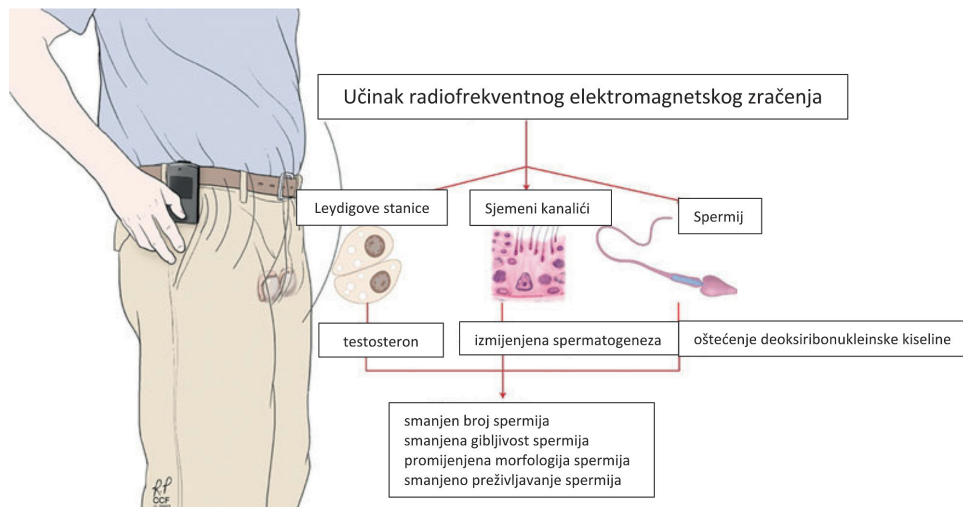
### **Učinci radiofrekvencijskog elektromagnetskog zračenja na krvno-testisnu barijeru**

Krvna barijera testisa je osjetljiva na stimulaciju okoliša, što može utjecati na njezinu propusnost i utjecati i na stvaranje protutijela protiv spermija, a to je ključno za mušku plodnost. Tkivo nakon izlaganja RF-EMZ-u mijenja oblik, pojavljuju se nabori, što može biti posljedica gubitka kolagena i retikularnih vlakana unutarnjih i vanjskih staničnih slojeva tkiva testisa štakora (Khaki i sur., 2006.). Vanjski je sloj tkiva pokusnih uzoraka testisa bio tanji od kontrolnih uzoraka testisa u muškaraca i bio je odvojen od sloja mioidnih stanica u više područja, dajući pritom mjehuričasti izgled tkivu (Kodoma i sur., 1997.). Mioidne stanice testisa pokusnih uzoraka miševa su imale manji broj poliribosoma, vezikula nastalih pinocitozom i glikogenih granula (Bushra i sur., 2011.). Utvrđeno je i da većina mitohondrija nema kriste, nedostaju veze između mioidnih stanica. Nakon prestanka izlaganja RF-EMZ-u epitelno tkivo se počelo oporavljati. Navedeno ukazuje da izlaganje RF-EMZ-u može prouzročiti duboke promjene u epitelnom tkivu sjemenih kanalića što u konačnici prouzroči

smanjenu plodnost, odnosno neplodnost (Adah i sur., 2018.).

### **Učinci radiofrekvencijskog elektromagnetskog zračenja na oksidativni stres i muški spolni sustav**

Budući da mitohondriji spermija stvaraju energiju za gibljivost spermija, metabolički poremećaj u tzv. „lancu prijenosa elektrona“ na unutarnjoj membrani mitohondrija tijekom procesa oksidativne fosforilacije, može značajno povećati stvaranje ROS-a, a čime utječe na gibljivost spermija ljudi (Koppers i sur., 2011.). Naime, u prvom dijelu oksidativne fosforilacije tj. „lancu prijenosa elektrona“ fiziološki se stvaraju superoksidni radikali. Poznato je da RF-EMZ-e može utjecati na mitohondrijske membrane i na taj način utjecati i na proizvodnju velike količine ROS-a (Pei i sur., 2015.). RF-EMZ-e može poremetiti metabolizam ROS-a, povećanjem stvaranja ROS-a ili smanjenjem aktivnosti antioksidacijskih enzima (Oksay i sur., 2014.). Tkivo testisa ovisi o kisiku za normalni proces spermatogeneze, a istovremeno je vrlo osjetljivo na toksične učinke ROS-a, stoga je optimalna aktivnosti antioksidativnih enzima neophodna za normalnu spermatogenezu (Oksay i sur., 2014., Žura Žaja i sur., 2019.a). Prekomjerne količine ROS-a kao što su: superoksidni anioni ( $O^{\cdot -}$ ), hidroksilni radikali ( $OH^{\cdot}$ ) i vodikov peroksid ( $H_2O_2$ ) mogu utjecati na strukturni integritet i funkciju spermija, kao što su: gibljivost, kapacitacija i fuzija spermija s oocitom (Griveau i sur., 1994.). Spermiji su osobito osjetljivi na oksidativni stres jer u staničnim membranama sadrže veliki udio višestruko nezasićenih masnih kiselina i membranski vezanu NADPH oksidazu (D'Autreaux i Toledano, 2007.). Povećano stvaranje ROS-a prouzroči oksidacijsko oštećenje lipida stanične membrane



**Slika 6.** Učinak radiofrekventnog elektromagnetskog zračenja mobitela na tkivo testisa i spermije [<https://www.renalandrologynews.com/home/departments/on-the-forefront/cleveland-clinic/cell-phone-use-by-men-may-decrease-fertility/>]

spermija (Hughes i sur., 1996., Diem i sur., 2005.) te korelira sa smanjenom muškom plodnošću (Iwaski i Gagnon, 1992., Adah i sur., 2018., Žura Žaja i sur., 2019.a) (Slika 6).

## Zaključna razmatranja

Na temelju dostupnih rezultata dobivenih istraživanjima na ljudima i životinjama, može se zaključiti da spermiji *in vitro* i *in vivo* izloženi RF-EMZ-u frekvencijama koje emitiraju mobilni telefoni, prijenosna računala ili Wi-Fi imaju smanjenu gibljivost, patološku morfologiju i povećani oksidativni stres zbog povećanog stvaranja ROS-a. Povećani oksidativni stres i hipertermija skrotuma mogu biti ključni mehanizmi pomoću kojih RF-EMZ-e utječe na plodnost muškaraca i muških životinja. Dugotrajna uporaba mobilnih telefona je jedan od uzroka koji

se moraju uzeti u obzir kao uzrok smanjenja kakvoće ejakulata. Muškarci ne bi smjeli držati mobitel u džepovima hlača ili blizu testisa da bi na taj način izbjegli dodatno štetno djelovanje RF-EMZ-a na reproduktivnu sposobnost. Zagađenje elektrosmogom stalno se povećava pa je za očekivati još više zdravstvenih problema uključujući povećanje muške neplodnosti. Navedeni učinci i posljedice izlaganja RF-EMZ-u ovise o fizikalnim pokazateljima kao što su: trajanje izlaganja, udaljenost od izvora zračenja, gustoća snage i dubina prodiranja.

Postoje brojni dokazi da RF-EMZ-e ima štetne učinke na muški reproduktivni sustav, kao što je povećana temperatura testisa koja ometa proces spermatogeneze, histološke aberacije u testisima, a ponekad smanjenje mase testisa. Preporuka je da se izloženost zračenju svede na najmanju moguću mjeru.

## Literatura

1. ADAH, A. S., D. I ADAH, K. T. BIOBAKU and A. B. ADEYEMI (2018): Effects of electromagnetic radiations on the male reproductive system. *Anat. J. Afr.* 7, 1152-1161. 10.4314/aja.v7i1.169488
2. AGARWAL, A., F. DEEPINDER, R. K. SHARMA, G. RANGA and J. LI (2007): Effect of cell phone usage on semen analysis in men attending infertility clinic: an observational study. *Fertil. Steril.* 89, 124-128. 10.1016/j.fertnstert.2007.01.166
3. AGARWAL, A., N. R. DESARI, K. MAKKER, A. VARGHESE, R. MOURADI, E. SABANEHGH and R. SHARMA (2009): Effects of radiofrequency electromagnetic waves (RF-EMW) from cellular phones on human ejaculated semen: an in vitro pilot study. *Fertil. Steril.* 92, 1318-1325. 10.1016/j.fertnstert.2008.08.022
4. AGARWAL, A., S. ASPINDER, H. ALAA and K. KESARI (2011): Cell phones and male infertility: A review of recent innovations in technology and consequences. *Int. Braz. J. Urol.* 37, 432-454. 10.1590/S1677-55382011000400002
5. AL-AKHRAS, M., H. DARMANI and A. ELBETIEHA (2006): Influence of 50 Hz magnetic field on sex hormones and other fertility parameters of adult male rats. *Bioelectromagnetics* 27, 127-131. 10.1002/bem.20186
6. AL-BAYYARI, N. (2017): The effect of cell phone usage on semen quality and fertility among Jordanian males. *Middle East Fertil. Soc. J.* 22, 178-182. 10.1016/j.mefs.2017.03.006
7. ALTUN, G., Ö. G. DENIZ, K. K. YURT, D. DAVIS and S. KAPLAN (2018): Effects of mobile phone exposure on metabolomics in the male and female reproductive systems. *Environ. Res.* 167, 700-707. 10.1016/j.envres.2018.02.031
8. ASGHARI, A., A. A. KHAKI, A. RAJABZADEH and A. KHAKI (2016): A review on Electromagnetic fields (EMFs) and the reproductive system. *Electron. Physician* 8, 2655-2662. 10.19082/2655
9. AVENDANO, C., A. MATA, C. S. SARMIENTO and G. DONCEL (2012): Use of laptop computers connected to internet through Wi-fi decreases human sperm motility and increases sperm DNA fragmentation. *Fertil. Steril.* 97, 39-45. 10.1016/j.fertnstert.2011.10.012
10. AYRAPETYAN, S. (2006): Cell aqua medium as a primary target for the effect of electromagnetic fields. In: Ayrapetyan, S. N. and M. Markov: *Bioelectromagnetics*. Germany, Heidelberg (31-63). 10.1007/1-4020-4278-7\_03
11. BAHADODINI, A., M. OWJFARD, A. TAMADON and S. M. JAFARI (2015): Low frequency electromagnetic fields long-term exposure effects on testicular histology, sperm quality and testosterone levels of male rats. *Asian Pac. J. Reproduct.* 4, 195-200. 10.1016/j.apjr.2015.06.001
12. BALMORI, A. (2005): Possible effects of electromagnetic fields from phone masts on a Population of White Stork (*Ciconia ciconia*). *Electromagn. Biol. Med.* 24, 109-119. 10.1080/15368370500205472
13. BHAT, M. A. (2013): Effects of electromagnetic waves emitted by mobile phones on male fertilit. *Computer Engineering and Intelligent Systems* 4, 51-64.
14. BUSHRA, H., R. LEILA, A. K. AMIR and S. JAFAR (2011): Histological study of testes and sperm parameters in adult mice exposed to 50 Hz electromagnetic field during developmental period. *Ann. Biol. Res.* 2, 455-462.
15. CHALLIS, L. J. (2005): Mechanisms for Interaction Between RF Fields and Biological Tissue. *Bioelectromagnetics* 7, 98-106. 10.1002/bem.20119
16. CHANDRA, A., G. M. MARTINEZ, W. D. MOSHER, J. C. ABMA and J. JONES (2005): Fertility, family planning, and reproductive health of U.S. women: data from the 2002 national survey of family growth. *Vital Health Stat.* 25, 1-160. 10.1037/e414702008-001
17. CIANI, E., T. M. HAUG, G. MAUGARS, F. A. WELTZIEN, J. FALCÓN and R. FONTAINE (2021): Effects of melatonin on anterior pituitary plasticity: a comparison between mammals and teleosts. *Front. Endocrinol.* 11, 1-20. 10.3389/fendo.2020.605111
18. CUCULLO, L., E. OBY, J. M. HALLENBECK, B. AUMAYR, E. RAPP and D. JANIGRO (2005): Artificial blood-brain barrier. In: Dermietzel, R., D. C. Spray, M. Nedergaard: *Blood-brain interfaces: from ontogeny to artificial barriers*. New Jersey, Hoboken (375-402). 10.1002/9783527611225.ch17
19. D'AUTREAU, B. and M. B. TOLEDANO (2007): ROS as signaling molecules: Mechanisms that generate specificity in ROS homeostasis. *Nat. Rev. Mol. Cell Biol.* 8, 813-824. 10.1038/nrm2256
20. DE IULIIS, G. N., R. J. NEWWEY, B. V. KING and R. J. AITKEN (2009): Mobile phone radiation induces reactive oxygen species production and DNA damage in human spermatozoa in vitro. *PLoS One* 4, e6446. 10.1371/journal.pone.0006446
21. DIEM, E., C. SCHWARZ, F. ADLKOEFER, O. JAHN and H. RÜDIGER (2005): Non-thermal DNA breakage by mobile-phone radiation (1800 MHz) in human fibroblasts and in transformed GFSH-R17 rat granulosa cells in vitro. *Mutat. Res.* 583, 178-183. 10.1016/j.mrgentox.2005.03.006
22. EROGUL, O., E. OZATESI, I. YILDIRIM, T. KIR, E. AYDUR, G. KOMESLI, H. C. IRKILATA, M. K. IRMAK and A. F. PAKER (2006): Effects of electromagnetic radiation from a cellular phone on human sperm motility: an in vitro study. *Arch. Med. Res.* 37, 840-843. 10.1016/j.arcmed.2006.05.003
23. FERNIE, K. J., D. M. BIRD, R. D. DAWSON and P. C. LAGUE (2000): Effects of electromagnetic fields on the reproductive success of American Kestrels. *Physiol. Biochem. Zool.* 73, 60-65. 10.1086/316726
24. GHANBARI, M., S. B. MORTAZAVI, A. KHAVANIN and M. KHAZAEI (2013): The effects of cell phone waves (900 MHz-GSM band) on

- sperm parameters and total antioxidant capacity in rats. *Int. J. Fertility Steril.* 7, 21-28.
25. GIWEREMAN, A., E. CARLSON and N. KEIDING (1993): Evidence for increasing incidence of abnormalities of the human testis: a review. *Environ. Health Perspect.* 101, 65-97. 10.2307/3431378
26. GORPINCHENKO, I., O. NIKITIN, O. BANYRA and A. SHULYAK (2014): The influence of direct mobile phone radiation on sperm quality. *Central Europ. J. Urol.* 67, 65-71. 10.5173/cej.2014.04.art26
27. GRIVEAU, J. F., P. RENARD and D. LE LANNOU (1994): An in vitro promoting role for hydrogen peroxide in human sperm capacitation. *Int. J. Androl.* 17, 300-307. 10.1111/j.1365-2605.1994.tb01260.x
28. GYE, M. C. and C. J. PARK (2012): Effect of electromagnetic field exposure on the reproductive system. *Clin. Exp. Reprod. Med.* 39, 1-9. 10.5653/serm.2012.39.1.1
29. HOMAN, G. F., M. DAVIES and R. NORMAN (2007): The impact of lifestyle factors on reproductive performance in the general population and those undergoing infertility treatment: a review. *Hum. Reprod. Update* 13, 209-223. 10.1093/humupd/dml056
30. HUGHES, C. M., S. E. LEWIS, V. J. MCKELVEY-MARTIN and W. THOMPSON (1996): A comparison of baseline and induced DNA damage in human spermatozoa from fertile and infertile men, using a modified comet assay. *Mol. Hum. Reprod.* 13, 1240-1247. 10.1093/molehr/2.8.613
31. ITU, International Telecommunication Union (2008): Radio Regulations. International Telecommunication Union 1, 1-429.
32. IWASAKI, A. and C. GAGON (1992): Formation of reactive oxygen species in spermatozoa of infertile patients. *Fertil. Steril.* 57, 409-416. 10.1016/S0015-0282(16)54855-9
33. JARUPAT S., A. KAWABATA, H. TOKURA and A. BORKIEWICZ (2003): Effects of the 1900 MHz electromagnetic field emitted from cellular phone on nocturnal melatonin secretion. *J. Physiol. Anthropol.* 22, 61-63. 10.2114/jpa.22.61
34. JONWAL, C., R. SISODIA, V. K. SAXENA and K. K. KESARI (2018): Effect of 2.45 GHz microwave radiation on the fertility pattern in male mice. *Gen. Physiol. Biophys.* 37, 453-460. 10.4149/gpb\_2017059
35. KANDEEL, F. R. and R. S. SWERDLOFF (1988): Role of Temperature in regulation of spermatogenesis and the use of heating as a method for contraception. *Fertil. Steril.* 49, 1-23. 10.1016/S0015-0282(16)59640-X
36. KESARI, K. K., S. KUMAR and J. BEHARI (2010): Mobile phone usage and male infertility in Wistar rats. *Indian J. Exp. Biol.* 48, 987-992.
37. KESARI, K. K., A. AGARWAL and R. HENKEL (2018): Radiations and male fertility. *Reprod. Biol. Endocrinol.* 16, 118. 10.1186/s12958-018-0431-1
38. KESARI, K. K. and J. BEHARI (2012): Evidence for mobile phone radiation exposure effects on reproductive pattern of male rats: role of ROS. *Electromagn. Biol. Med.* 31, 213-222. 10.3109/15368378.2012.700292
39. KHAKI, A. A., R. S. TUBBS, N. M. SHOJA, J. S RAD, R. M. FARAHANI and S. ZARRINTAN (2006): The Effects of an electromagnetic field on the boundary tissue of the seminiferous tubules of the rat: a light and transmission microscope study. *Folia Morphol.* 65, 188-194.
40. KHULLAR, S. (2012): Impact of electromagnetic waves generated by cellular phones on male fertility: A review. *Asian J. Biomed. Pharm. Sci.* 2, 9-14.
41. KIM, S., D. HAN, J. RYU, K. KIM and Y. H. KIM (2021): Effects of mobile phone usage on sperm quality - No time-dependent relationship on usage: A systematic review and updated meta-analysis. *Environ. Res.* 202, 111784. 10.1016/j.envres.2021.111784
42. KODAMA, H., R. YAMAGUCHI, J. FUKADA, H. KASAI and T. TANAKA (1997): Increased oxidative deoxyribonucleic acid damage in the spermatozoa of infertile male patients. *Fertil. Steril.* 68, 519-524. 10.1016/S0015-0282(97)00236-7
43. KOPPERS, A. J., L. A. MITCHELL, P. WANG, M. LIN and R. J. AITKEN (2011): Phosphoinositide 3- kinase signalling pathway involvement in a truncated apoptotic cascade associated with motility loss and oxidative DNA damage in human spermatozoa. *Biochem. J.* 436, 687-698. 10.1042/BJ20110114
44. KUMAR, S., J. BEHARI and R. SISODIA (2013): Influence of electromagnetic fields on reproductive system of male rats. *Int. J. Rad. Biol.* 89, 147. 10.3109/09553002.2013.741282
45. KUMAR, S., K. K. KESARI and J. BEHARI (2011): The therapeutic effect of a pulsed electromagnetic field on the reproductive patterns of male Wistar rats exposed to a 2.45-GHz microwave field. *Clin. (Sao Paulo)* 66, 1237-1245. 10.1590/S1807-59322011000700020
46. KUMAR, S., J. P. NIRALA, J. BEHARI and R. PAULRAJ (2014): Effect of electromagnetic irradiation produced by 3G mobile phone on male rat reproductive system in a simulated scenario. *Indian J. Exp. Biol.* 52, 890-897.
47. LA VIGNERA, S., R. A. CONDORELLI, E. VINCARI, R. D'AGATA and A. E. CALOGERO (2012): Effects of the exposure to Mobile phones on male reproduction: a review of the literature. *J. Androl.* 33, 350-356. 10.2164/jandrol.111.014373
48. LIU, Y., W. B. LIU, K. J. LIU, L. AO, J. L. ZHONG, J. CAO and J. Y. LIU (2015): Effect of 50 Hz Extremely Low-Frequency Electromagnetic Fields on the DNA Methylation and DNA Methyltransferases in Mouse Spermatoocyte-Derived Cell Line GC-2. *Biomed. Res. Int.* 2015, 237183. 10.1155/2015/237183
49. LUKAC, N., P. MASSANYI, S. ROYCHOUDHURY, M. CAPCAROVA, E. TVRDA, Z. KNAZICKA, A. KOLESAROVA and J. DANKO (2011): In vitro effects of radiofrequency electromagnetic waves on bovine spermatozoa motility. *J. Environ. Sci. Health*

- A Tox. Hazard Subst. Environ. Eng. 46, 1417-1423. 10.1080/10934529.2011.607037
50. LUO, Y., X. WANG, Y. CHEN, S. XU, G. DING, C. SHI (2013): Effects of electromagnetic radiation on morphology and TGF- $\beta$ 3 expression in mouse testicular tissue. *Toxicology* 310, 8-14. 10.1016/j.tox.2013.05.004
  51. MAKKER, K., A. VARGHESE, N. R. DESAI, R. MOURADI and A. AGARWAL (2009): Cell phones: modern man's nemesis? *Reprod. Biomed. Online* 18, 148-157. 10.1016/S1472-6483(10)60437-3
  52. MARJANOVIĆ, A. M., I. PAVIČIĆ and I. TROŠIĆ (2012): Biological indicators in response to radiofrequency/microwave exposure. *Arh. Hig. Rada Toksikol.* 63, 407-441. 10.2478/10004-1254-63-2012-2215
  53. MARKS, T. A., C. C. RATKE and W. O. ENGLISH (1995): Stray Voltage and developmental, reproductive and other toxicology problems in dogs, cats and cows: a discussion. *Vet. hum. toxicol.* 37, 163-172.
  54. MORTAZAVI, S. M. J., A. R. TAVASSOLI, F. RANJBARI and P. MOAMMAIEE (2010): Effects of laptop computers electromagnetic field on sperm quality. *J. Reprod. Infertil.* 11, 251-258.
  55. OH, J. J., S. S. BYUN, S. E. LEE, G. CHOE and S. K. (2018): Hong effect of electromagnetic waves from mobile phones on spermatogenesis in the era of 4G-LTE. *Biomed. Res. Int.* 2018, 1801798. 10.1155/2018/1801798
  56. OKECHUKWU, C. E. (2020): Does the use of mobile phone affect male fertility? A mini-review. *J. Hum. Reprod. Sci.* 13, 174-183. 10.4103/jhrs.JHRS\_126\_19
  57. OKSAY, T., M. NAZIROGLU, S. DOGAN, A. GUZEL, N. GUMRAL and P. A. KOSAR (2014): Protective effects of melatonin against oxidative injury in rat testis induced by wireless (2.45 GHz) devices. *Andrologia* 46, 65-72. 10.1111/and.12044
  58. OZTURAN, O., T. ERDEM, M. C. MIMAN, M. T. KALCIOGLU and S. ONCEL (2002): Effects of electromagnetic field of mobile phones on hearing. *Acta Otolaryngol.* 122, 289-293. 10.1080/000164802753648178
  59. PEI, X., Q. GU, D. YE, Y. WANG, X. ZOU, L. HE, Y. JIN and Y. YAO (2015): Effect of computer radiation on weight and oxidant-antioxidant status of mice. *Nutr. Hosp.* 31, 1183-1186.
  60. POURLIS, A. F. (2009): Reproductive and developmental effects of EMF in vertebrate animal models. *Pathophysiology* 16, 179-189. 10.1016/j.pathophys.2009.01.010
  61. PRAUSNITZ, S. and C. SUSSKIND (1962): Effects of chronic microwave irradiation on mice. *Ire. Trans. Biomed. Electron.* 9, 104-108. 10.1109/TBME.1962.4322972
  62. SHARMA, A., K. K. KESARI, H. N. VERMA and R. SISODIA (2017): Neurophysiological and behavioral dysfunctions after electromagnetic field exposure: a dose response relationship. In: KESARI, K.: Perspectives in environmental toxicology. Switzerland, Basel (1-30). 10.1007/978-3-319-46248-6\_1
  63. SIMKO, M. and MATTSON, M. (2004): Extremely low frequency electromagnetic fields as effectors of cellular responses in vitro: Possible immune cell activation. *J. Cell. Biochem.* 93, 83-92. 10.1002/jcb.20198
  64. SIMKO, M. (2007): Cell type specific redox status is responsible for diverse electromagnetic field effects. *Curr. Med. Chem.* 14, 1141-1152. 10.2174/0929867077780362835
  65. TÜREDI, S., H. HANCI, Z. TOPAL, D. ÜNAL, T. MERCANTEPE, I. BOZKURT, H. KAYA and E. ODACI (2015): The effects of prenatal exposure to a 900-MHz electromagnetic field on the 21-day-old male rat heart. *Electromag. Biol. Med.* 34, 390. 10.3109/15368378.2014.952742
  66. WDOWIAK, A., A. PAWEL, A. MAZUREK and I. B. WDOWIAK (2017): Effect of electromagnetic waves on human reproduction. *Ann. Agric. Environ. Med.* 24, 13-18. 10.5604/12321966.1228394
  67. YILDIRIM, M. E., M. KAYNAR, H. BADEM, M. CAVIS, O. F. KARATAS and E. CIMENTEPE (2015): What is harmful for male fertility: Cell phone or the wireless internet? *Kaohsiung J. Med. Sci.* 31, 480-484. 10.1016/j.kjms.2015.06.006
  68. ŽURA ŽAJA, I., M. SAMARDŽIJA, S. VINCE, M. VILIĆ, I. MAJIĆ-BALIĆ, D. ĐURIČIĆ and S. MILINKOVIĆ TUR (2016a): Differences in seminal plasma and spermatozoa antioxidative systems and seminal plasma lipid and protein levels among boar breeds and hybrid genetic traits. *Anim. Reprod. Sci.* 170, 75-82. 10.1016/j.anireprosci.2016.04.006
  69. ŽURA ŽAJA, I., M. VILIĆ, I. TOMULIĆ, A. SHEK VUGROVEČKI, K. MALARIĆ, P. TUCAK and I. TLAK GAJGER (2021): The effects of radiofrequency radiation on humans and animals, with special reference to honey bees (*Apis mellifera*). *Vet. stn.* 52, 347-357. 10.46419/vs.52.3.5 (In Croatian).
  70. ŽURA ŽAJA, I., M. SAMARDŽIJA, S. VINCE, A. SLUGANOVIĆ, S. STRELEC, J. ŠURAN, I. DELVECHIO, D. ĐURIČIĆ, M. OSTOVIĆ, H. VALPOTIĆ, S. MILINKOVIĆ-TUR (2016b): Antioxidant protection and lipid peroxidation in testes and different parts of epididymis in boars. *Theriogenology* 86, 2194-2201. 10.1016/j.theriogenology.2016.07.008
  71. ŽURA ŽAJA, I., A. SLUGANOVIĆ, M. SAMARDŽIJA, S. MILINKOVIĆ-TUR, T. DOBRANIĆ, S. STRELEC, D. ĐURIČIĆ, H. VALPOTIĆ and S. VINCE (2019a): The effects of oxidative stress on the male reproductive system and mechanisms of antioxidant protection. *Vet. stn.* 50, 43-54. (In Croatian).
  72. ŽURA ŽAJA, I., I. ŠVUB, S. MILINKOVIĆ-TUR, S. VINCE, H. VALPOTIĆ, D. ĐURIČIĆ, S. ČIPČIĆ and M. SAMARDŽIJA (2019b): Biochemical parameters of seminal plasma in domestic animals and humans. *Vet. stn.* 50, 3, 223-237. (In Croatian).

## Effects of radiofrequency electromagnetic radiation on male fertility

Ivona ŽURA ŽAJA, DVM, PhD, Assistant Professor, Paulina MARTINEC, DVM, Ivan BUTKOVIĆ, DVM, PhD, Marinko VILIĆ, DVM, PhD, Full Professor, Suzana MILINKOVIĆ-TUR, DVM, PhD, Full Professor, Silvijko VINCE, DVM, PhD, Full Professor, Anamaria SLUGANOVIĆ, DVM, Marko SAMARDŽIJA, DVM, PhD, Full Professor, Jadranka PEJAKOVIĆ HLEDE, DVM, PhD, Expert Associate, Ivan FOLNOŽIĆ, DVM, PhD, Associate Professor, Faculty of Veterinary Medicine, University of Zagreb, Croatia; Nikolino ŽURA, mag. physioth., University Hospital Centre Zagreb, Croatia

Humans and animals are constantly exposed to electromagnetic radiation emitted from the natural environment, and through the use of industrial and everyday devices for wireless communication. In recent years, due to rapid technological progress, electromagnetic radiation from artificial sources has exceeded the values of radiation of natural origin. General concern about the increasing number of devices (mobile phones, laptops, Wi-Fi and microwave ovens) using radiofrequency electromagnetic radiation (RF-EMR) is justified due to increasing evidence of their harm to the living organism. Modern technology devices emit small frequency radiofrequency electromagnetic waves, which are then absorbed by the human and animal bodies and can potentially cause adverse effects on the brain, heart, endocrine system and reproductive function. It is believed that the male reproductive system is one of the most sensitive tissues to RF-EMR. It is clear from the literature that RF-EMR has harmful effects on ejaculate quality indicators (such as spermatozoa

count in ejaculate and spermatozoa morphology and motility), affects cellular metabolism and the endocrine system, and causes genotoxicity, genomic instability and oxidative stress, which in turn may result in infertility. The adverse effects of RF-EMR are divided into thermal and non-thermal. Most negative biological effects are attributed to non-thermal effects, while the thermal effects from cell phone radiation are considered to be less harmful. However, scrotum hyperthermia and increased oxidative stress from the formation of excess reactive oxygen compounds in the male reproductive system can be key mechanisms by which RF-EMR affects male fertility. The negative effects associated with the duration of use of mobile phones are known and listed above. Therefore, the aim of this review article is to describe some of the effects of RF-EMR on the male reproductive system.

**Key words:** *radiofrequency electromagnetic radiation; male reproductive system; ejaculate quality; endocrine systems; oxidative stress*