

UČINCI RADIOFREKVENCIJSKOG ZRAČENJA NA MUŠKU PLODNOST

Martinec, Paulina

Master's thesis / Diplomski rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Veterinary Medicine / Sveučilište u Zagrebu, Veterinarski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:178:717111>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-11**



Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Veterinary Medicine -
Repository of PHD, master's thesis](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
VETERINARSKI FAKULTET

PAULINA MARTINEC

**UČINCI RADIOFREKVENCIJSKOG ZRAČENJA NA
MUŠKU PLODNOST**

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, 2022.

Naziv zavoda ili klinike: Klinika za porodništvo i reprodukciju i Zavod za fiziologiju i radiobiologiju

Predstojnik: prof. dr. sc. Marko Samardžija
prof. dr. sc. Suzana Milinković Tur

Mentori: izv. prof. dr. sc. Ivan Folnožić
doc. dr. sc. Ivona Žura Žaja

Članovi Povjerenstva za obranu diplomskog rada:

1. izv. prof. dr. sc. Silvijo Vince
2. izv. prof. dr. sc. Ivan Folnožić
3. doc. dr. sc. Ivona Žura Žaja
4. prof. dr. sc. Suzana Milinković Tur

ZAHVALA

Zahvaljujem svojim mentorima izv. prof. dr. sc. Ivanu Folnožiću i doc. dr. sc. Ivoni Žura Žaja što su omogućili izradu ovog diplomskog rada pod svojim vodstvom. Hvala vam na izdvojenom vremenu i svoj potrebnoj literaturi. Hvala Vam na vašoj nesebičnoj podršci i pomoći tokom izrade ovog rada, ali i tokom cijelog studija veterinarske medicine. Primjer ste kako motivirati i zainteresirati studenta što je nekada najteži zadatak.

Hvala mojoj obitelji, roditeljima, braći, mojem čovjeku, tetama i svima koji su bili dio ovog puta, bili ste mi vjetar u leđa kada ni sama nisam imala snage vjerovati u sebe. Hvala vam svima što me u bitnim trenucima poznajete bolje nego što poznajem samu sebe. Hvala vam što ste uvijek tu i što ste moje samopouzdanje kada ono unutar mene zakaže. Vjerovali ste u mene sve ove godine i veliko vam hvala svima za to. Ovo je i vaš uspjeh.

Veliko hvala zaručniku Ianu, uz tebe znam da sve što budućnost donosi ćemo zajedno prolaziti u miru, ljubavi i razumijevanju. Hvala ti na toj sigurnosti, stabilnosti i podršci, upotpunio si sve čemu sam se nadala.

Hvala mojim prijateljima koji su bili uz mene kroz sve ove godine studiranja, bez vas ništa ne bi bilo isto, a s vama je bilo predivno. Hvala na svakom razgovoru i svakom „živjeli“ kada je bilo potrebno.

I hvala tebi kolega, dida, što si ovaj završetak fakulteta nadgledao potihom i pomogao mi da završim ovaj svoj put smireno. Dao si mi snagu u točno onim trenucima kada ti znaš da mi je trebala. Nastavljam ovaj put van naših klupa sa najdražim kolegom u mislima zauvijek.

POPIS KRATICA

| | |
|---------------|---|
| ATP: | adenozin trifosfat (<i>engl. Adenosine triphosphate</i>) |
| DNK: | deoksiribonukleinska kiselina (<i>eng. Deoxyribonucleic acid</i>) |
| eV: | elektrovolt (<i>eng. electrovolt</i>) |
| FSH: | folikulstimulirajući hormon (<i>engl. Follicle stimulating hormone</i>) |
| LH: | luteinizirajući hormon (<i>engl. Luteinizing hormone</i>) |
| ROS: | reaktivni kisikovi spojevi (<i>engl. Reactive oxygen species</i>) |
| SV: | Sivert (<i>engl. Sivert</i>) |
| Hz: | Herc (<i>engl. Hertz</i>) |
| Wi-Fi: | bežična tehnologija (<i>engl. Wireless Technology</i>) |

POPIS SLIKA

| | |
|--|----|
| Slika 1. Muški spolni sustav malih preživaca | 3 |
| Slika 2. Histološki presjek testisa..... | 4 |
| Slika 3. Prostata normalne veličine i građe te promijenjena prostata za vrijeme upalnog procesa | 5 |
| Slika 4. Presjek tkiva oko testisa sa naglaskom na mrežoliki pletter, kremasterni mišić (musculus cremaster), testikularnu arteriju i sjemenovod..... | 6 |
| Slika 5. Sazrijevanje spermatogonije u spermij | 8 |
| Slika 6. Sazrijevanje spermatogonije u spermij mitozom i mejozom | 8 |
| Slika 7. Građa spermija | 9 |
| Slika 8. Sastav sjemene plazme..... | 11 |
| Slika 9. Funkcije i sastav sjemene plazme | 12 |
| Slika 10. Spektar elektromagnetskog zračenja..... | 14 |
| Slika 11. Udjeli izloženosti čovjeka različitim izvorima zračenja | 15 |
| Slika 12. Prirodno zračenje nalazi se svugdje oko nas | 16 |
| Slika 13. Različiti izvori elektromagnetskog zračenja koji djeluju na organizam | 17 |
| Slika 14. Vidljivi spektar zračenja..... | 18 |
| Slika 15. Shema elektromagnetskog spektra..... | 19 |
| Slika 16. Učinci elektromagnetskih polja na staničnoj razini | 23 |
| Slika 17. Simptomi različitih organskih sustava prouzrokovani zračenjem mobilnog telefona .. | 25 |
| Slika 18. Učinak radiofrekvencijskog elektromagnetskog zračenja na mozak štakora..... | 26 |
| Slika 19. Učinak radiofrekventnog elektromagnetskog polja mobilnog telefona na hipotalamus, prednji režanj hipofize i testise | 33 |
| Slika 20. Sažeti prikaz učinaka elektromagnetskih polja na mušku plodnost..... | 33 |
| Slika 21. Učinak elektromagnetskih valova na tkivo testisa i spermije | 37 |

SADRŽAJ

| | |
|---|----|
| 1. UVOD | 1 |
| 2. MUŠKI SPOLNI SUSTAV | 3 |
| 2.1. Anatomija muškog spolnog sustava..... | 3 |
| 2.2. Spermatogeneza i spermiogeneza | 7 |
| 2.3. Ejakulat i sjemena tekućina..... | 9 |
| 3. ELEKTROMAGNETSKO ZRAČENJE | 13 |
| 3.1. Ionizirajuće zračenje | 15 |
| 3.2. Neionizirajuće zračenje..... | 17 |
| 3.2.1. Radiovalno i mikrovalno zračenje | 19 |
| 4. UČINCI RADIOFREKVENCIJSKOG ZRAČENJA | 21 |
| 4.1. Toplinski učinci radiofrekvencijskog zračenja | 21 |
| 4.2. Netoplinski učinci radiofrekvencijskog zračenja..... | 21 |
| 5. UČINCI RADIOFREKVENCIJSKOG ZRAČENJA NA MUŠKI SPOLNI SUSTAV | 24 |
| 5.1. Biofizički pokazatelji radiofrekvencijskog zračenja..... | 28 |
| 5.2. Učinci radiofrekvencijskog zračenja na ejakulat | 30 |
| 5.2.1. Broj spermija..... | 30 |
| 5.2.2. Gibljivost i morfologija spermija..... | 31 |
| 5.3. Učinci radiofrekvencijskog zračenja na spolne hormone | 32 |
| 5.4. Učinci radiofrekvencijskog zračenja na biokemijske pokazatelje sjemene plazme..... | 34 |
| 5.5. Učinci radiofrekvencijskog zračenja na krvno-testisnu barijeru..... | 35 |
| 5.6. Učinci radiofrekvencijskog zračenja na oksidativni stres i muški spolni sustav | 36 |
| 6. ZAKLJUČAK..... | 38 |
| 7. LITERATURA | 39 |
| 8. Sažetak | 47 |
| 8. Summary | 48 |
| 9. ŽIVOTOPIS..... | 49 |

1. UVOD

U današnjem svijetu u kojem živimo sastavni dio naše svakodnevice je upotreba moderne tehnologije kao načina komunikacije. Naime, ljudi su u modernom društvu izloženi sve većem broju radiofrekvencijskih elektromagnetskih polja nastalih proizvodnjom i opskrbom električne energije, televizijskih uređaja, osobnih računala, radijskih i mobilnih uređaja te bežične internetske tehnologije kao što su Wi-Fi i 5G ruteri / modemi (GYE i PARK, 2012., OKECHUKWU, 2020.). Razvitkom tehnologije sve je veća izloženost zračenjima koji interferiraju sa načinom funkcioniranja organizama u njihovoj okolini. Samim time opravdana je zabrinutost šire javnosti za ljudsko i životinjsko zdravlje s obzirom na činjenice koje ukazuju na koje smo sve načine izloženi te na koji način sve snosimo posljedice takvog načina života. Čimbenici okoliša, kao što su radiofrekvencijski elektromagnetski valovi, uzrokuju biološke i genetske učinke, a njihovi štetni učinci dijele se na toplinske i netoplinske.

Mobiteli 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 i kreće se u rasponu od 800 do 2200 MHz. Međutim, iako odašilju nisku frekvenciju 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 elektromagnetskim poljima je spolni sustav (ASGHARI i sur., 2016.). Naime, testisi kao organi muškog spolnog sustava u kojim se proizvode spermiji i testosteron, vrlo su osjetljiv na razne vanjske i unutarnje čimbenike kao što su hipertermija, upala, zračenje te izlaganje agensima koji dovode do apoptoze zametnih stanica (BAHAODINI i sur., 2015.).

Radiofrekvencijsko elektromagnetsko zračenje uzrokuje smanjeno stvaranje i lučenje melatonina (hormona epifize), što dovodi do smanjenog lučenja gonadotropnih hormona adenohipofize (AL-AKHRAS i sur., 2006., CIANI i sur., 2021.), odnosno smanjenu proizvodnju testosterona i spermatogenezu (ADAH i sur., 2018., KESARI i sur., 2018., OKECHUKWU, 2020.)

Nadalje, radiofrekvencijsko elektromagnetsko zračenje povećava zastupljenost apoptoze zametnih stanica i oksidacijskog stresa te smanjenje antioksidacijske zaštite u muškom spolnom sustavu (KESARI, 2010. ADAH i sur., 2018.). Osim navedenog, produljeno izlaganje testisa i sekundarnih spolnih organa radiofrekvencijskih elektromagnetskih valova ima štetan učinak na spermije te može izazvati genetska oštećenja odnosno oštećenje DNK spermija (YILDIRIM i sur., 2015.). Tako, dugotrajna izloženost radiofrekvencijskom elektromagnetskom zračenju utječe na stanični metabolizam spermija što se odražava na smanjenu gibljivost, broj i preživljavanje spermija te povećanje 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.).

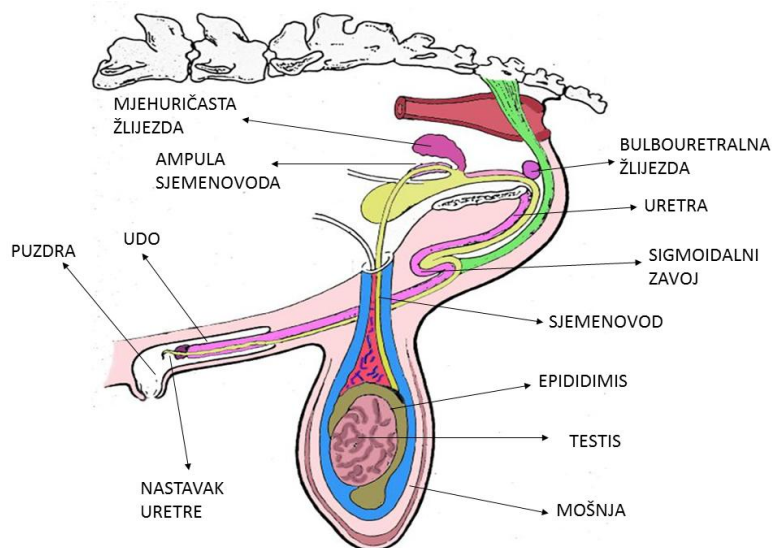
Ovaj rad će više obratiti pozornost na učinke elektromagnetskog zračenja nižih frekvencija na muški spolni sustav o čijim se posljedicama djelomično zna dok posljedice koje prouzrokuje izloženost elektromagnetskim valovima koje emitiraju novi modeli mobilnih telefona u sadašnjem digitalnom okruženju nisu još istražena.

2. MUŠKI SPOLNI SUSTAV

2.1. Anatomija muškog spolnog sustava

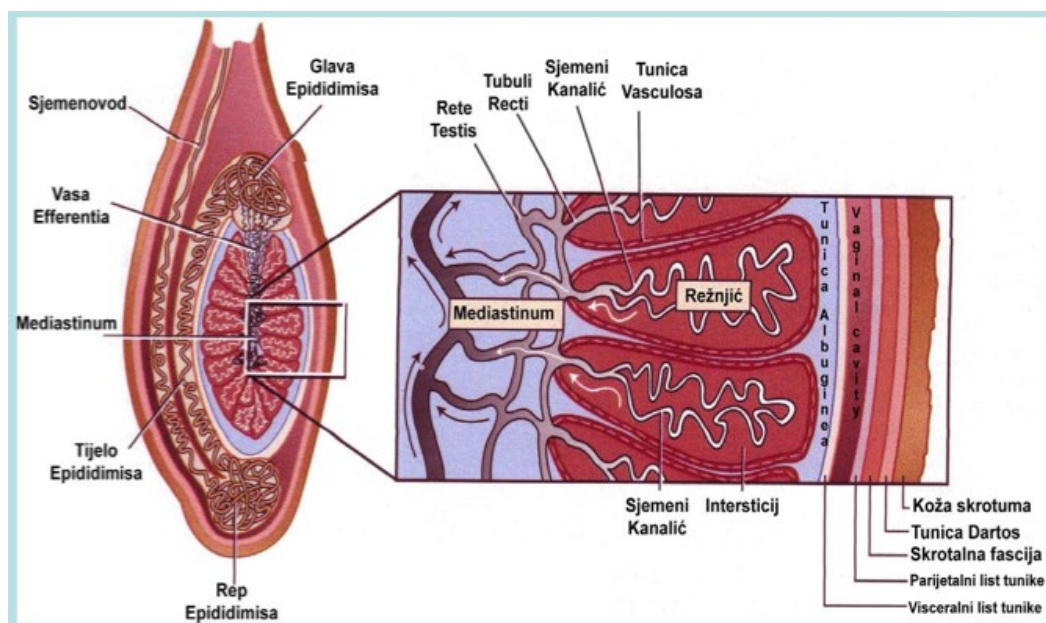
Uloga muškog spolnog sustava je stvaranje velikog broja spolnih stanica (spermija). Nakon stvaranja spermija potrebno je da dođe do ejakulacije spermija u odgovarajuće mjesto u ženskom spolnom sustavu dok je ženka u odgovarajućem vremenu spolnog ciklusa. (CAMPBELL i sur., 2003.). Muški spolni hormoni imaju tri funkcije, a to su regulacija spermatogeneze, ponašanje mužjaka i razvoj sekundarnih spolnih obilježja (NOAKES i sur., 2019.).

Muški se spolni organi sastoje od parnih testisa koji se nalaze u mošnji, sjemenovoda, muške mokraćnice, uda (penis), prepucija i akcesornih spolnih žlijezda. Akcesorne spolne žlijede su mjehuričaste žlijezde, prostata, bulbouretralne (Cowperove) žlijezde i uretralne žlijezde. (CERGOLJ i SAMARDŽIJA, 2006.) (Slika 1.).



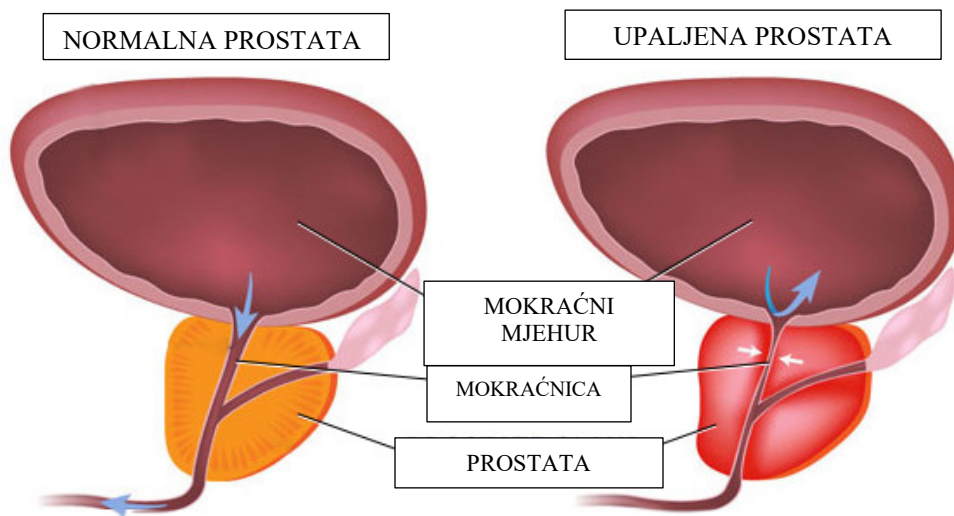
Slika 1. Muški spolni sustav malih preživača (<https://zir.nsk.hr/islandora/object/vef:310/preview>)

Sjemenici (testisi) su parni organi koji se nalaze u mošnji, a također se nazivaju i muške gonade. Sjemenici su obavijeni vezivnotkivnom čahurom (tunica albuginea) koja je građena od kolagenih vlakana te sadrži krvne žile. (Slika 2.) Spermatogeneza je proces stvaranja i sazrijevanja spermija i započinje u sjemenicima. Leydigove stanice koje se nalaze u sjemenicima glavni su izvor muških steroidnih hormona. Nuzsjemenik (epididimis) je zavijena cijev koja je spojena duž testisa. Nuzsjemenik se sastoji od sjemenih kanalića koje zajedno drži splet vezivnog tkiva (NOAKES i sur., 2019.). U nuzsjemeniku dolazi do sazrijevanja spermija, resorpcije dijela tekućine, fagocitoze staničnih fragmenata te izlučivanja tvari koji su potrebni za sazrijevanje spermija. Nuzsjemenik ima četverostruku ulogu, a to su prijenos spermija, sazrijevanje spermija, skladištenje zrelih i za oplodnju sposobnih spermija te regulacija ejakulacije. (CERGOLJ i SAMARDŽIJA, 2006.)



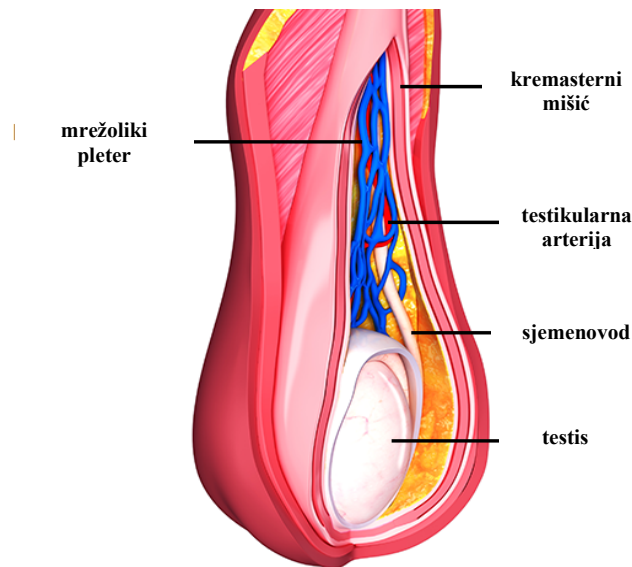
Slika 2. Histološki presjek testisa (Preuzeto iz knjige Veterinarska andrologija)

Sjemenovod je nastavak repa nuzjemenika, a proteže se medijalno sa živcima, krvnim žilama i mišićima. Na mjestu anulus vaginalisa, sjemenovod ulazi u trbušnu šupljinu (KONIG i LIEBICH, 2009.). Mišići sjemenog užeta su glatke muskulature, ti mišići svojim refleksnim kontrakcijama podižu testise prema ingvinalnom kanalu, a relaksacijom izdužuju skrotum te spuštaju testise pritom ih udaljujući od tijela. Ovim mehanizmima refleksnih kontrakcija zajedno sa venoznim pletežom omogućena je termoregulacija testisa koja je neophodna za normalnu spermatogenezu (CERGOLJ i SAMARDŽIJA, 2006.). Mošnja je dvodijelna kožna vreća i u njoj se nalaze sjemenici, nuzsjemenici i dijelom sjemenovodi. Penis se sastoji se od korijena, trupa i glavića penisa. Korijen penisa se sastoji od dva kraka koji se približavaju i spajaju u korijen penisa. Korijen prelazi u trup penisa koji zahvaća većinu organa te završava glavićem penisa. Puzdra je kožni nabor koji prekriva slobodni kraj penisa kada nije u erekciji. Prostata je žlijezda tubuloalveolarnog tipa, jako razvijena u muškaraca i pasa te izlučuje bistar, vodenastoserozni sekret (CERGOLJ i SAMARDŽIJA, 2006.) (Slika 3.).



Slika 3. Prostata normalne veličine i građe te promijenjena prostata za vrijeme upalnog procesa. Anatomski položaj prostate uz mokraćni mjehur i mokraćnicu u jedinki s zdravom i bolesnom prostatom (<https://sperlingprostatecenter.com/new-hope-diagnosing-trea>)

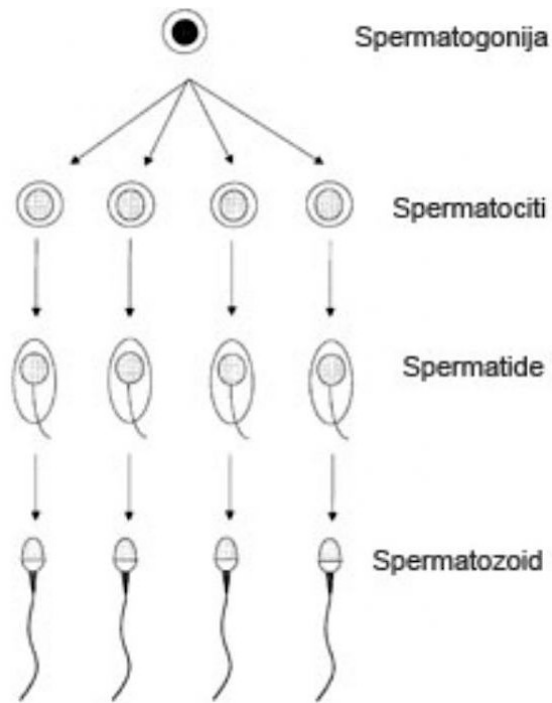
Testise vaskulariziraju dvije krvne žile, a to su testikularna arterija i vena. Testikularna arterija je grana abdominalne aorte i ona daje ogranke za nuzsjemenske i za sjemenovod. Testikularna vena stvara mrežoliki pleter (plexus pampiniformis) oko zavoja arterije (Slika 4.). Iz ovog pleteža izlazi jedna testikularna vena koja se ulijeva u venu cavu caudalis. Brojni kontakti između krvnih žila u sjemenoj vrpci hlade krv u arteriji na njenom putu do testisa (BUTKOVIĆ, 2021.).



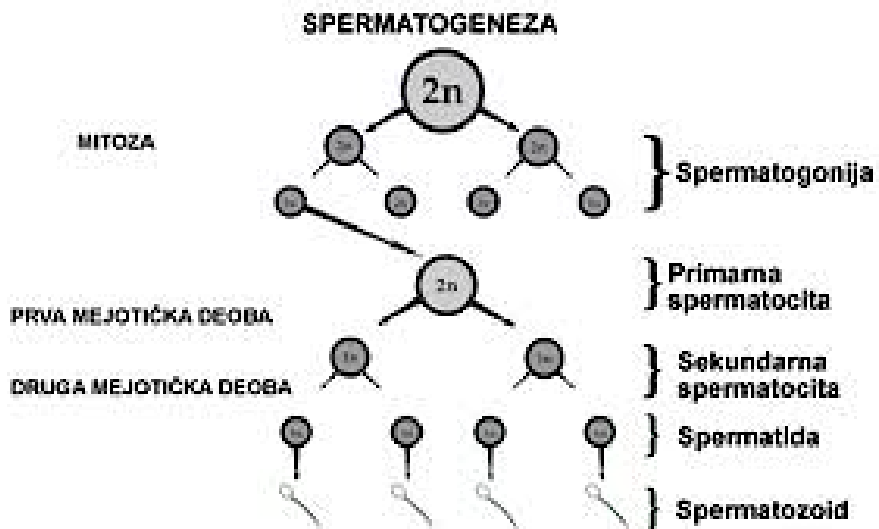
Slika 4. Presjek tkiva oko testisa sa naglaskom na mrežoliki pleter, kremasterni mišić (*musculus cremaster*), testikularnu arteriju i sjemenovod (<https://teachmeanatomy.info/pelvis/the-male-reproductive-system/spermatic-cord/>)

2.2. Spermatogeneza i spermiogeneza

Stvaranje i sazrijevanje spermija se sastoji od mejoze, mitoze, spermiogeneze i spermatogeneze (PARRISH i sur., 2017., MCGLONE i sur., 2020.). Spermatogeneza je početni proces stvaranja spermija, a odvija se u zavijenim kanalićima testisa, to je proces proizvodnje i diferencijacije spermija iz stanica zametnog epitela mužjaka. Završni dio spermatogeneze je spermiogeneza, dok je spermatogeneza cjelokupni proces proizvodnje funkcionalnih, muških gameta. Spermiogeneza je diferencijacija i sazrijevanje spermatida u pokretne spermije (spermatozoide) (Slika 6.). Spolne stanice u mužjaka prvo prolaze niz mitotičkih dioba, a nakon niza mitotičkih dioba slijede mejoza i spermiogeneza što rezultira morfološki prepoznatljivima spermijima (Slika 5.). Dvije osnovne stanice testisa koje sudjeluju u nastanku spermija su Sertolijeve i Leydigove stanice. S približavanjem spolne zrelosti ove stanice postaju više osjetljive na luteinizirajući hormon (LH) koji potiče izlučivanje testosterona i drugih promotora rasta. Sertolijeve stanice sadrže receptore za testosteron i folikulostimulirajući hormon (FSH) (FRANCA i sur., 2016.). U razdoblju prije spolne zrelosti FSH regulira proliferaciju Sertolijevih stanica. Konačni broj Sertolijevih stanica za vrijeme spolne zrelosti određuje ukupan broj spermija koje testis može proizvesti (FRANCA i sur., 2000.). FSH je hormon koji stimulira spermiogenezu, a LH je hormon koji potiče izlučivanje spolnih hormona.



Slika 5. . Sazrijevanje spermatogonije u spermij (<https://hr.ellas-cookies.com/obrazovanie/82748-chno-takoe-spermatogenez-opredelenie-periody.html>)

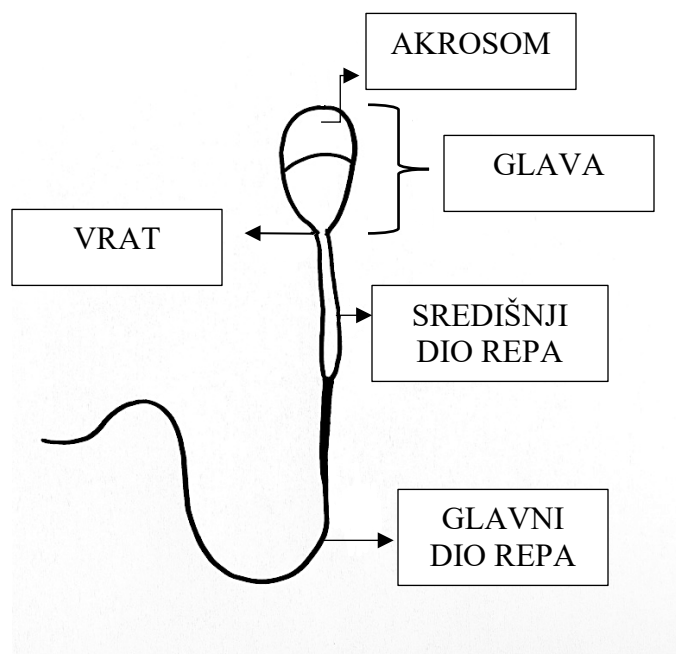


Slika 6. Sazrijevanje spermatogonije u spermij mitozom i mejozom (<https://millymimmy.wordpress.com/gametogeneza/spermatogeneza/>)

2.3. Ejakulat i sjemena tekućina

Ejakulat ili sjemena tekućina je tekućina mliječno-bijele boje čiji sastojci potiču iz različitih dijelova muškog spolnog sustava, odnosno nastaje miješanjem produkata akcesornih spolnih žlijezda, testisa, epididimisa i sjemenovoda.. Do izbacivanja ejakulata dolazi prilikom njegovog izlaska kroz vanjski otvor mokraćne cijevi. Ejakulat se sastoji od korpuskularnih elemenata, koje čine spermiji i epitelne stanice, i tekućeg dijela odnosno sjemene plazme (CERGOLJ i SAMARDŽIJA, 2006.).

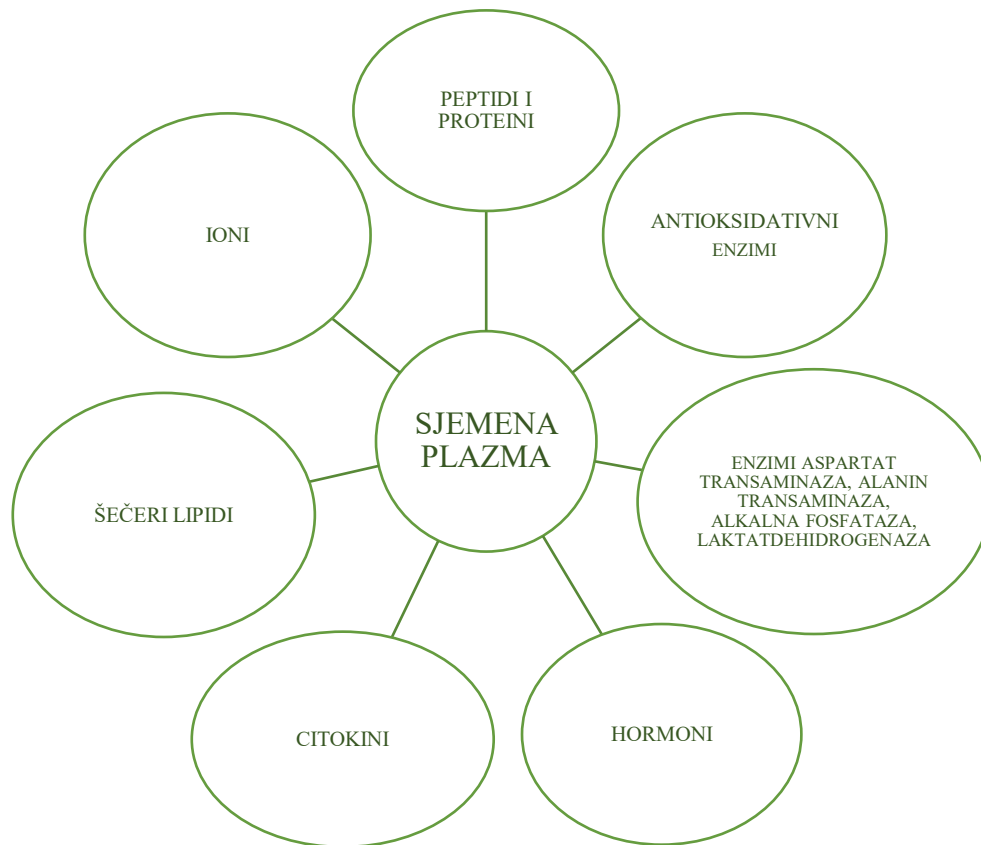
Spermiji su muške spolne stanice koje imaju sposobnost samostalnog gibanja i preživljavanja izvan organizma u uvjetima sa prisutnošću i bez prisutnosti kisika. Spermiji su izrazito osjetljivi na temperaturne promjene i na izloženost sunčevim zrakama. Spermiji se sastoje se od glave, središnjeg dijela koji čine vrat i tijelo te repa (Slika 7.). Glava se sastoji od dva dijela, a to su jezgra i akrosom. Genetski materijal koji sadrži DNK, RNK, kromatin i bjelančevine se u spermija nalazi u jezgri. Strukturnu građu tijela čine bjelančevine, ugljikohidrati i masti (YASTE OLIVER, 2008.). Tijekom ejakulacije spermiji prolaze kroz sjemenovod, mokraćnicu te se spajaju sa sekretom akcesornih spolnih žlijezda te se pritom tvori ejakulat (DABROVICH i sur., 2014.).



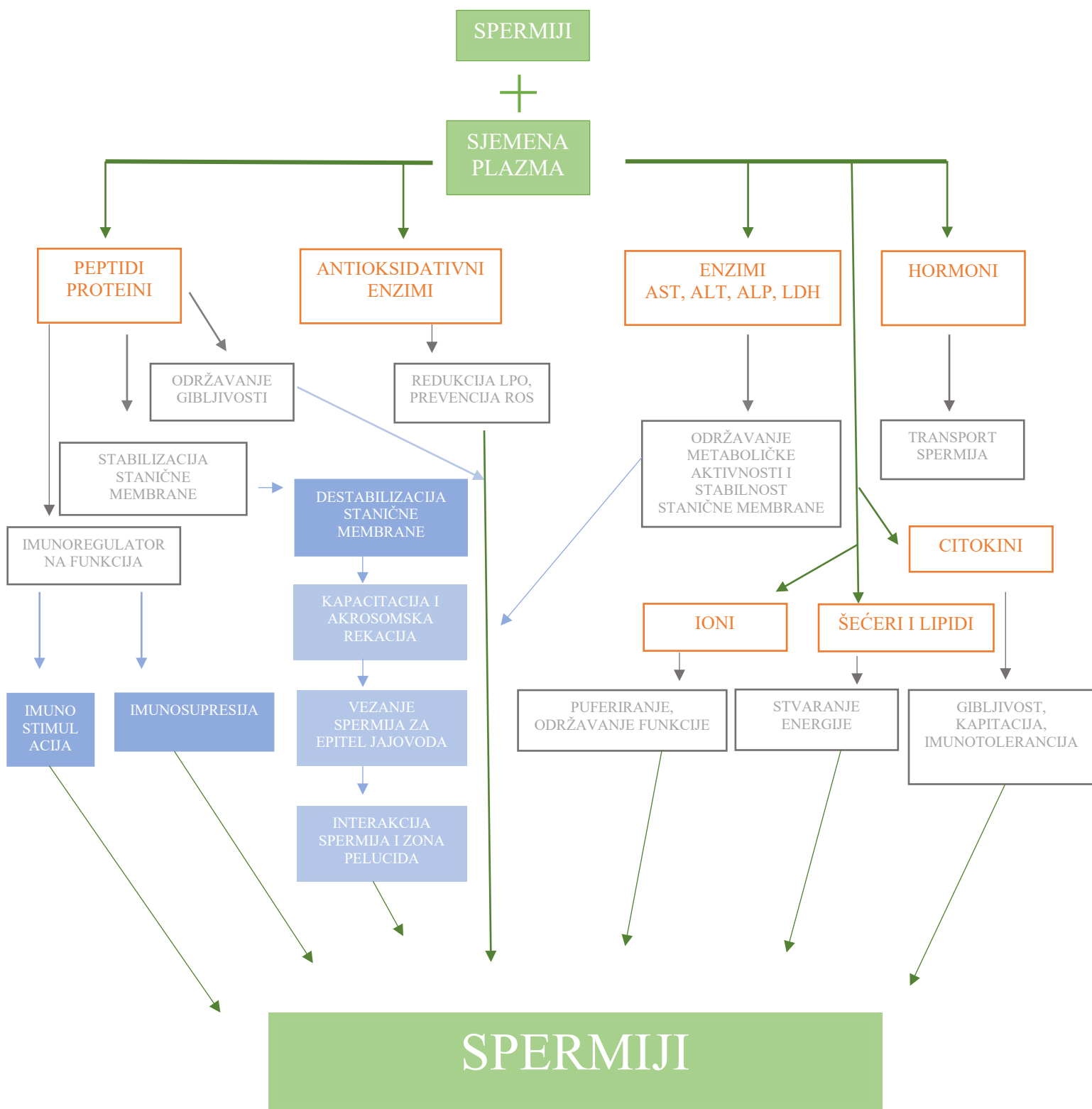
Slika 7. Građa spermija

Biokemijski sastav i volumen sjemene plazme razlikuje se među različitim životinjskim vrstama. Sastav je sjemene plazme teško definirati za sva živa bića. Svaka vrsta ima svoje značajke, a dolazi i do znatnih razlika u sastavu sjemene plazme i na individualnoj razini jedinke. Razlike u biokemijskom sastavu i volumenu sjemene plazme između životinjskih vrsta prisutne su prvenstveno zbog različite zastupljenosti i razvoja određenih akcesornih spolnih žlijezda te time i do različitih aktivnosti pojedinih enzima te koncentracije i prisutnosti pojedinih tvari. Nadalje, razlike se javljaju unutar vrste i pasmine, a također utjecaj vanjskih čimbenika poput hranidbe, mikroklimatskih uvjeta, smještaja te razdoblja u godini. Također, ista jedinka nema uvijek isti biokemijski sastav i volumen sjemene plazme. Općenito u sastavu sjemene plazme se nalazi glukoza, fruktoza, kolesterol, bjelančevine, metaboliti, antioksidativni enzimi te minerali i vitamini (Slika 9.). U sjemenjnoj plazmi se također i nalaze dušikovi spojevi, kao što su amonijak, ureja, mokraćna kiselina i kreatinin te askorbinska kiselina i hipotaurin (RODRIGUEZ-MARTINEZ i sur., 2011., ŽURA ŽAJA, 2015.). Takav je sastav sjemene plazme nužan za održivost i gibljivost spermija, njihovu zaštitu, transport i preživljavanje u ženskom spolnom sustavu kako bi bili sposobni za oplodnju (Slika 8.).

Na temelju biokemijskih pokazatelja u sjemenjnoj plazmi možemo procijeniti funkcionalnost odnosno disfunkcionalnost testisa i akcesornih spolnih žlijezda. Također po sastavu u sjemenjnoj plazmi možemo procijeniti kakvoću sjemena i rasplodnu učinkovitost ili neplodnost jedinki (ŽURA ŽAJA, 2015.). Upravo zbog svega navedenog su biokemijski pokazatelji u sjemenjnoj plazmi jasni pokazatelj promjena u muškoj plodnosti.



Slika 8. Sastav sjemene plazme

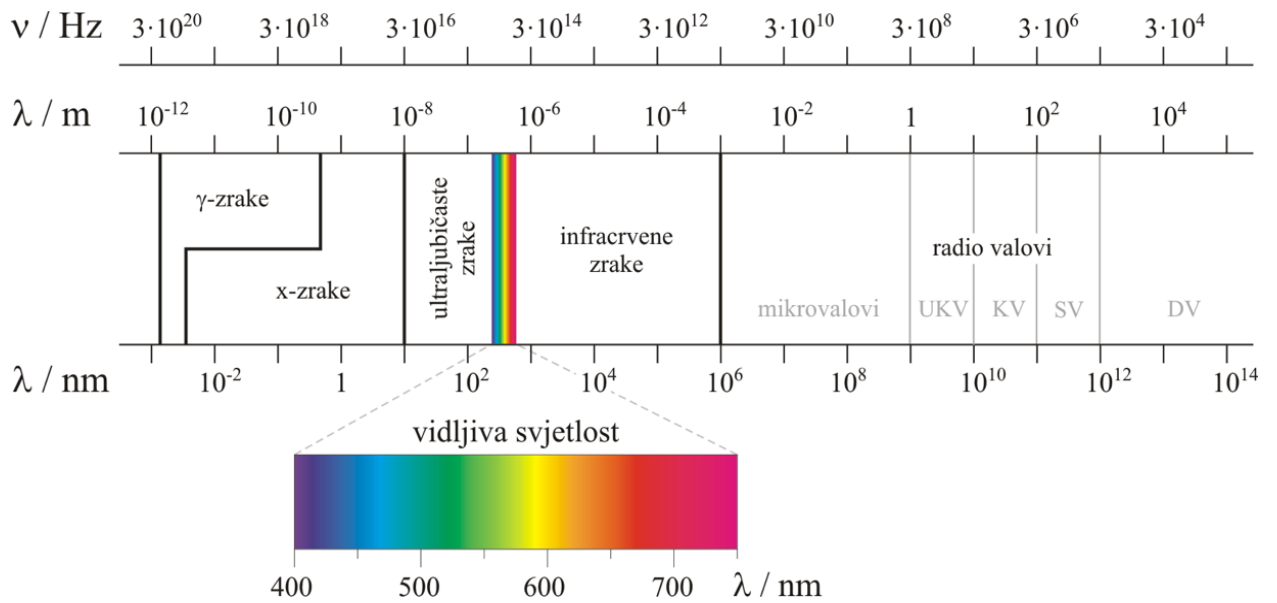


Slika 9. Funkcije i sastav sjemene plazme (<https://hrcak.srce.hr/file/326424>). Kratice: aspartat-aminotransferaza (AST), alanin-transaminaza (ALT), alkalna-fosfataza (ALP), laktat-dehidrogenaza (LDH), lipidna peroksidacija (LPO), slobodni kisikovi radikali (ROS)

3. ELEKTROMAGNETSKO ZRAČENJE

Elektromagnetsko zračenje se može definirati kao prijenos energije u obliku elektromagnetskih valova koji se šire zrakopraznim prostorom brzinom svjetlosti. Elektromagnetski spektar predstavlja raspon i opseg frekvencija elektromagnetskog zračenja te pripadajućih valnih duljina fotona, a dijeli se na neionizirajuće i ionizirajuće zračenje. Zračenje koje ima dovoljnu energiju da ionizira molekule ili atome tvari pri njihovom međudjelovanju nazivamo ionizirajućim zračenjem, a čine ga alfa, beta, gama zračenje, X zrake, kozmičko zračenje i neutronske zračenje. Najmanja energija koja je potrebna za ionizaciju i ispuštanje elektrona iz molekule ili atoma smatra se 10eV (MARJANOVIĆ i sur., 2012).

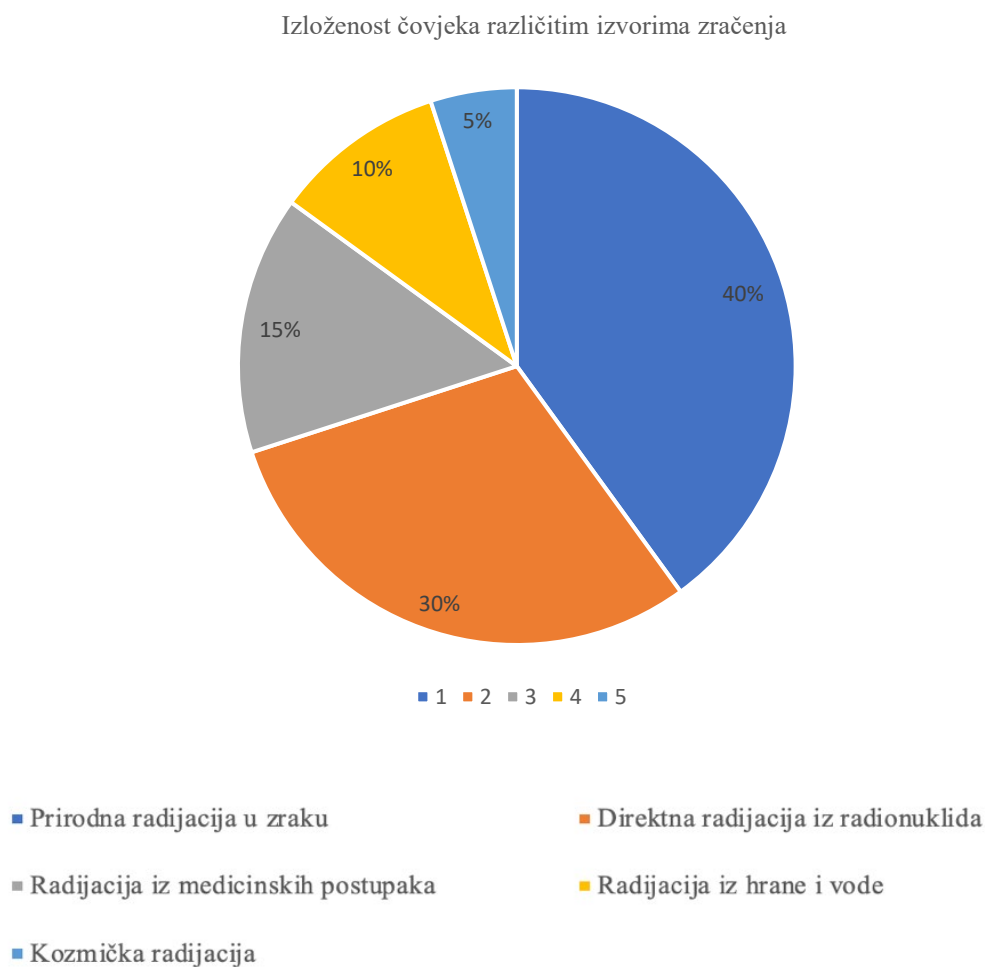
Elektromagnetsko ionizirajuće zračenje čine x i γ -zrake koje se od svjetlosti, infracrvenog zračenja ili radio-valova razlikuju samo većom frekvencijom i energijom. X-zrake identične su γ -zrakama odnosno jedina je razlika što γ -zrake potječu iz jezgre, a x-zrake iz elektronskog omotača. One su bez električnog naboja i bez mase pa zbog toga lako prodiru kroz stvari i kroz njih prolaze s malo međudjelovanja. Ionizacijska sposobnost im je slaba, čak oko tisuću puta slabija od α -čestica i oko 100 puta slabija od β -čestica. Prema tome, γ -zrake su zbog svoje velike prodornosti jednako opasne za ljude i životinje i kao vanjski i kao unutrašnji izvor zračenja. No, kao unutrašnji izvor zračenja znatno su manje opasne od α -čestica (VILIĆ, 2014.). Neionizirajuće elektromagnetsko zračenje je zračenje nižih frekvencija te nema dovoljnu energiju za ionizaciju atoma, a sastoji se od vidljive svjetlosti, niskoenergetskog ultraljubičastog (Ultraviolet - UV) zračenja, infracrvenog (Infrared – IR) zračenje, radiovalnog (Radiofrequency – RF) i mikrovalnog (Microwave – MW) polja te polja ekstremno niskih frekvencija (Extremely Low Frequency – ELF) (ITU, 2008.) (Slika 10.).



Slika 10. Spektar elektromagnetskog zračenja (valne duljine elektromagnetskih valova). Spektar elektromagnetskog zračenja podijeljen je od zračenja vrlo kratkih valnih duljina i velike energije do radiovalova valnih duljina i preko 1 000 m (<https://glossary.periodni.com/glosar.php?hr=spektar+elektromagnetskog+zračenja>)

3.1. Ionizirajuće zračenje

Ionizirajuće zračenje nosi veliku energiju te može ionizirati atome i molekule pri prolasku kroz tvari. Spontano pak pretvaranje jednih kemijskih elemenata u druge popraćeno odašiljanjem ionizirajućih zračenja naziva se radioaktivnost. Također zračenje se može podijeliti u niskofrekventno zračenje (60Hz) i radiofrekvencijsko zračenje koje dolazi od bežičnih uređaja. Ionizirajuće zračenje je puno opasnije za ljudsko i životinjsko zdravlje od neionizirajućeg zračenja. Primjer prirodnog ionizirajućeg zračenja je raspadanje uranija u zemlji, kozmičke zrake i sunce (Slika 12.), a najznačajniji primjeri umjetnih izvora ionizirajućeg zračenja jesu radioaktivni otpad i rendgensko snimanje tijekom medicinskih indikacija (Slika 11.). (VILIĆ, 2014., KESARI i sur., 2018.)



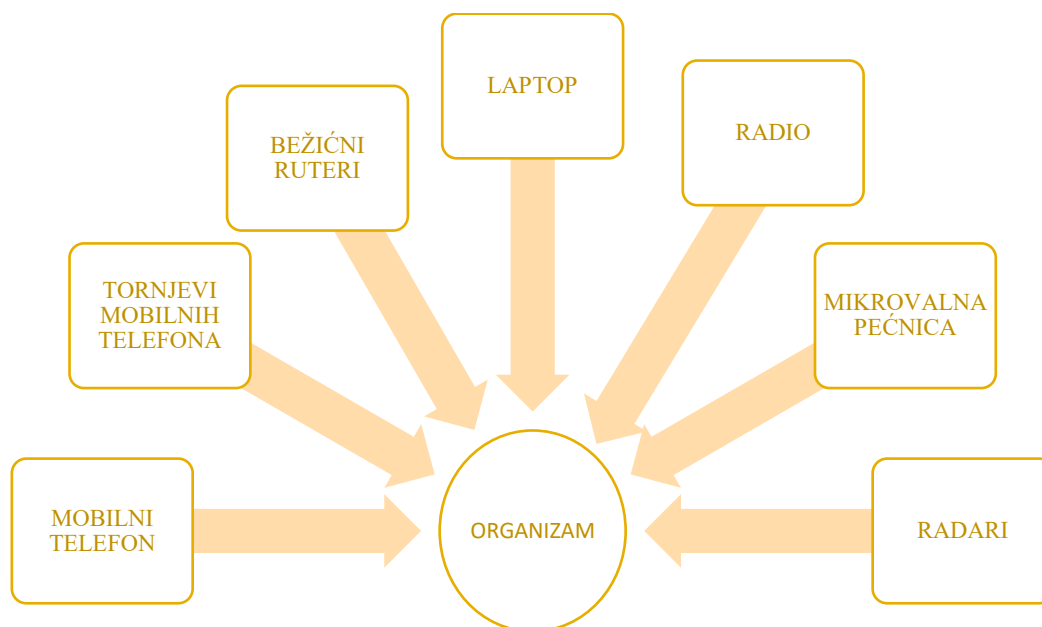
Slika 11. Udjeli izloženosti čovjeka različitim izvorima zračenja



Slika 12. Prirodno zračenje nalazi se svugdje oko nas
(<http://nuclearsafety.gc.ca/eng/resources/radiation/introduction-to-radiation/types-and-sources-of-radiation.cfm>)

3.2. Neionizirajuće zračenje

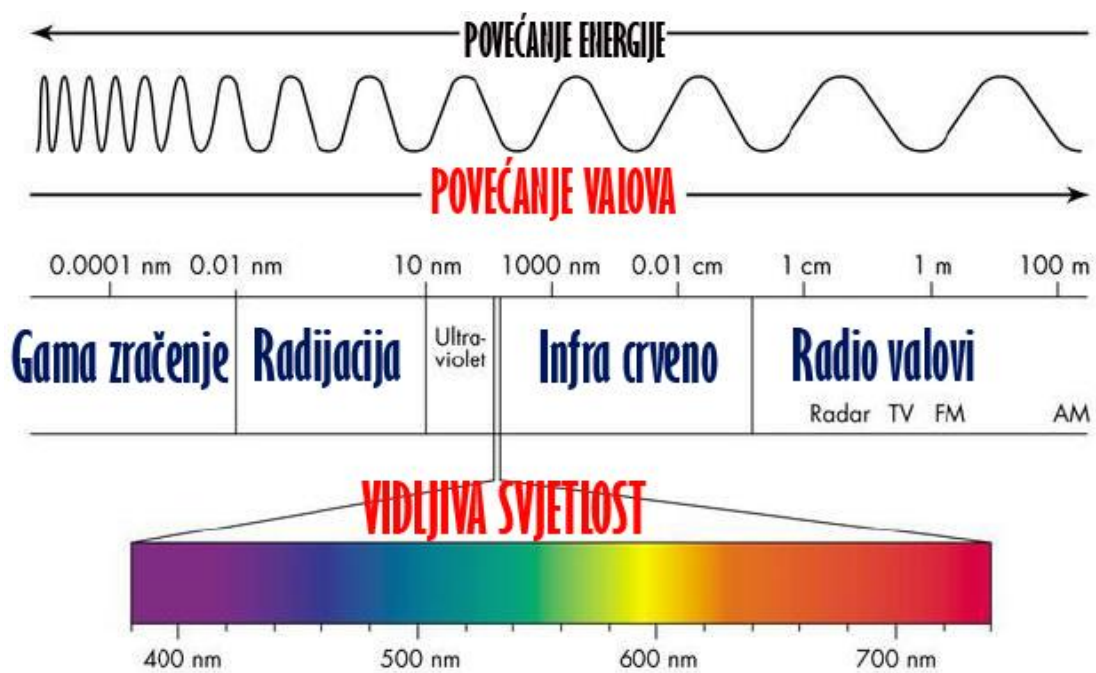
Neionizirajuće zračenje različitih frekvencija koje su ljudi stvorili (radiokomunikacijski sustavi, mobilni telefoni, mikrovalne pećnice, izvori iz područja bežičnog komunikacijskog sustava u okolišu) u prekomjernim količinama naziva se elektromagnetski smog ili elektrosmog (SAEFL, 2005., POLJAK, 2006.) (Slika 13.). Elektromagnetska polja vrlo niske frekvencije mogu proizvesti veća oštećenja tjelesnih sustava iz nekoliko razloga. Smatra se da najčešći razlog većih oštećenja nastao zbog djelovanja elektromagnetska polja je taj da su frekvencije vrlo bliske onima fiziološkog raspona pa samo preklapanje frekvencija može narušiti biološke procese koji su u tijeku. Naši organizmi su svakodnevno izloženi neionizirajućem zračenju. Na primjer mikrovalne pećnice služe se mikrovalovima za zagrijavanje hrane dok s druge strane tosteri koriste infracrvene valove. Također izloženi smo neionizirajućem zračenju gledanjem televizije i korištenjem mobilnog uređaja. U izvore neionizirajućih zračenja spadaju svi uređaji koji proizvode jednu ili više vrsta neionizirajućih zračenja (KESARI i sur., 2018., SANTINI i sur., 2018.). Osim uređaja koji proizvode neionizirajuće zračenje postoji i zračenje prirodnih izvora (ZIRDUM, 2016.).



Slika 13. Različiti izvori elektromagnetskog zračenja koji djeluju na organizam

U neionizirajuće zračenje ubrajamo (Slika 14.):

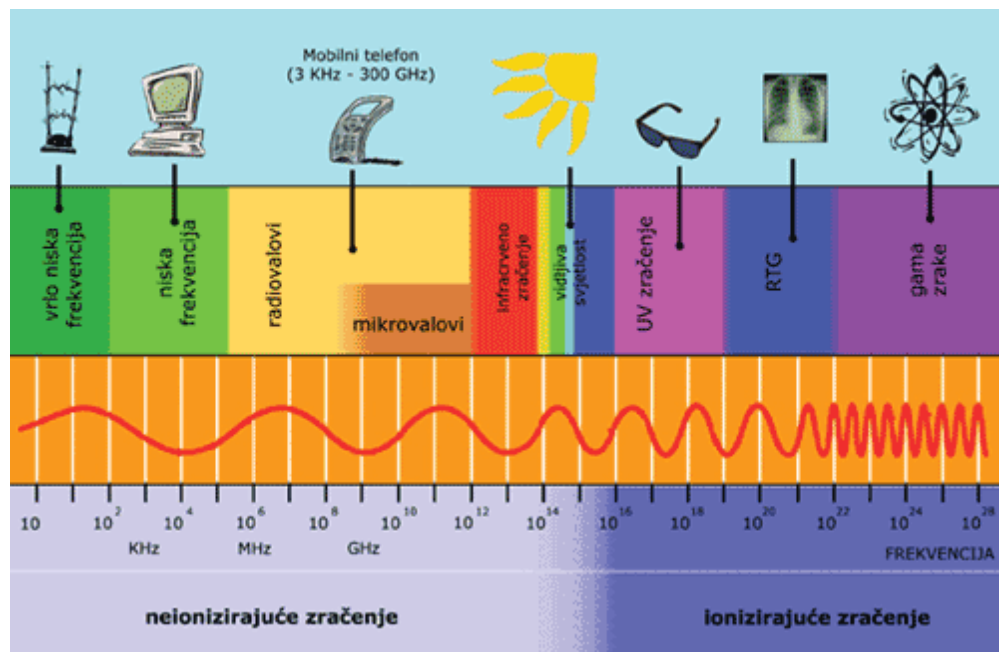
- vidljivu svjetlost
- niskoenergetsko ultraljubičasto zračenje
- infracrveno zračenje
- radiovalna polja
- polja ekstremno niskih frekvencija (KESARI i sur., 2018.).



Slika 14. Vidljivi spektar zračenja (<https://matrixworldhr.com/2012/05/03/dnk-prirodni-svjetlosni-internet-i-bioenergetsko-polje-ljudi/>.)

3.2.1. Radiovalno i mikrovalno zračenje

Radiovalno zračenje i mikrovalno zračenje zauzimaju frekvencijsko područje od 3 kHz do 300 GHz. Mikrovalno se zračenje nalazi u području frekvencije od 300 MHz do 300 GHz, dok radiovalovi zauzimaju područje od 3 kHz do 300 MHz. Smatra se da je mikrovalno zračenje dio radiovalnog zračenja, no, navode se češće kao zasebna. Mikrovalno i radiovalno zračenje prodire dublje u tkiva od optičkog zračenja te na taj način može negativno utjecati na unutarnje organe. (Slika 15.) Iako se radiovalno zračenje ne smatra opasnim, to ne isključuje mogućnost da opasnost ipak postoji (KOTTOU i sur., 2014.). Učinak na organizam odnosno tkiva ovisi o frekvencija, modulaciji, usmjerenosti te lokaciji izvora (ZELIĆ, 2017., KESARI i sur., 2018.).



Slika 15. Shema elektromagnetnog spektra
(http://www.megon.net/docs/1_tko_to_tamo_zraci/osnove_o_zracenju.htm)

Izvori radiovalnog i mikrovalnog zračenja su:

- mobilni uređaji
- radio i tv odašiljači
- mikrovalne pećnice
- velike satelitske antene

4. UČINCI RADIOFREKVENCIJSKOG ZRAČENJA

Radiofrekvencijsko elektromagnetsko zračenje može uzrokovati dvije vrste učinaka, a to su toplinski i netoplinski učinak (CHALLIS, 2005.).

4.1. Toplinski učinci radiofrekvencijskog zračenja

Toplinski učinak tj. zagrijavanje tkiva povezan je s lokalnim povećanjem temperature. (CHALLIS, 2005.; POURLIS, 2009.). Na lokalno povećanje temperature i na sam toplinski učinak djeluje nekoliko čimbenika. Neki od tih čimbenika su površina izloženog tkiva, frekvencija samog zračenja i vrijeme izloženosti tkiva zračenjem. Potrebno je uzeti u obzir i da li je moguće odvođenje topline od tijela. Upravo slabija sposobnost odvođenja topline testisa zbog slabe prokrvljenosti je razlog osjetljivosti na radiofrekvencijsko zračenje. Nadalje, toplinski se učinci manifestiraju na cijelo tijelo preko glavobolje, osjećaja topline ili peckanjem oko uha, osjećajem peckanja na koži lica i promjenama krvno-moždane barijere (OTZURAN i sur. 2002., KHULLAR, 2012.).

4.2. Netoplinski učinci radiofrekvencijskog zračenja

Mobilni telefoni svojim odašiljanjem i primanjem mikrovalnog zračenja na frekvencijama koji potiču rotaciju molekula vode i nekih organskih molekula, povezani su s toplinskim i netoplinskim učincima. Zapravo većina svih bioloških posljedica elektromagnetskih valova mobitela može se objasniti „netoplinskim učinkom“.

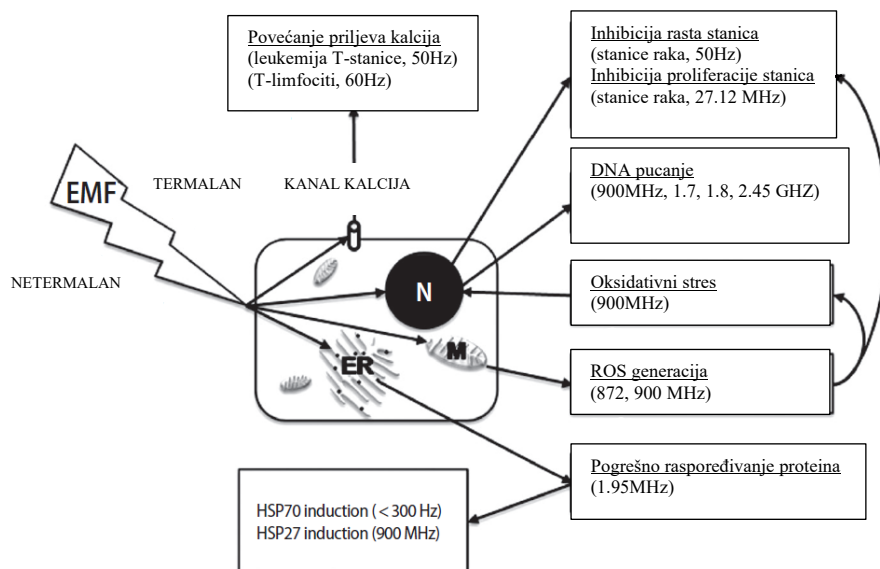
Netoplinski učinci uključuju sve interakcije bioloških tkiva sa elektromagnetskim valovima bez proizvodnje topline ili bez mjerljivog porasta temperature (Slika 16.). Najštetniji potencijal na žive organizme ima magnetsko polje zbog svoje sposobnosti da prodire u ljudska i životinjska tijela, dok s druge strane električno polje elektromagnetskih valova ima slabu sposobnost prodiranja kroz ljudsku kožu pa i samim time manje štetan potencijal (CLEVELAND i sur., 1997., KHULLAR, 2012.).

Inducirane izmjenične struje u našim tijelima koje proizlaze iz izloženosti elektromagnetskim valovima mobitela mogu objasniti biološke netoplinske učinke na tkivnoj, staničnoj i substaničnoj razini. Netoplinski učinci uključuju poremećaj spavanja, učinak na kognitivne funkcije, povećanje krvnog tlaka te imaju potencijalne kancerogene učinke mobilnih telefona (OTZURAN i sur., 2002., KHULLAR, 2012.).

Istraživanja pokazuju kako će vrlo niskofrekventna elektromagnetska polja prouzročiti veću štetu u tjelesnim sustavima iz nekoliko razloga. Prvi razlog je taj da su te frekvencije bliske onima fiziološkog raspona te iz tog razloga svako njihovo preklapanje može dovesti do promjena u biološkim procesima. Kada su izvori vrlo niskofrekventnih elektromagnetskih polja u bliskom kontaktu sa tijelom dolazi do pojave stvaranja vrtložnih struja i zagrijavanja (KESARI i sur., 2013.). U stvarnom životu, životinje su izložene promjenjivim količinama elektromagnetskog zračenja upravo iz razloga jer su često daleko od samih stanica za mobilne baze te ih od zračenja često odvajaju pasivne strukture (metalne strukture) (HYLAND, 2000., BALMORI, 2005.). Kada dođe do toga da elektromagnetsko zračenje presretne tijelo koje ima sposobnost vodljivosti ono izaziva stvaranje električnih polja i cirkulirajuću električnu struju, koja se istovremeno natječe sa endogenom strujom i naponima organizma te na taj način narušava normalnu fiziološku ravnotežu (LOSCHER, KAS, 1998., ADAH i sur., 2018.). Životinje izložene elektromagnetskom zračenju mogu razviti pogoršanje zdravlja, promjene u ponašanju (MARKS i sur., 1995.) i pad plodnosti (FERNIE i sur., 2000., ADAH i sur., 2018.).

Dubina prodora zračenja unutar tijela ovisi o njegovoj frekvenciji i svojstvima izloženog dijela tijela tom zračenju (OBUKHAN, 1998; MAKKER i sur., 2009.). Ako gustoća struje prelazi određenu graničnu vrijednost, postoji mogućnost da dođe do pobuđivanja mišića i živaca zbog depolarizacija membrana (ADAH i sur., 2018.).

U našem okolišu postoje brojni izvori neionizirajućeg elektromagnetskog polja koja odašilju zračenja, koja su pak u interakciji s ljudskim i životinjskim tijelima. Poznato je da uporaba elektroničkih kućanskih uređaja i mobitela uzrokuje smanjenje plodnosti ili čak neplodnosti u muškaraca (EROGUL i sur., 2006.). Muški spolni sustav jedan od najosjetljivijih na elektromagnetsko zračenje (LIU i sur., 2015.).



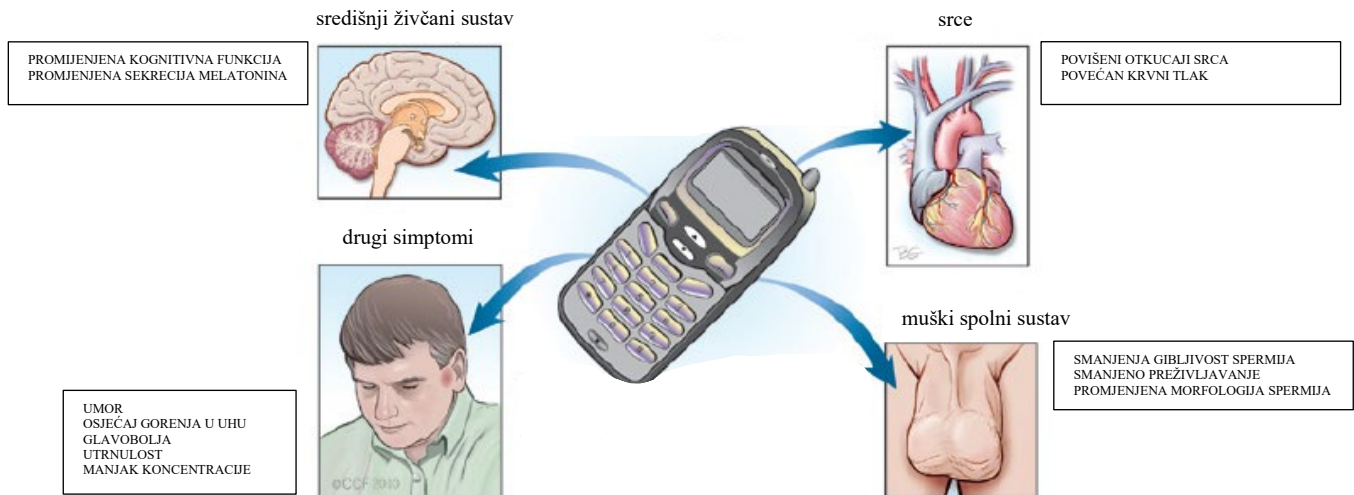
Slika 16. Učinci elektromagnetskih polja na staničnoj razini. EMF-elektromagnetno polje; N-jezgra; ER-endoplazmatski retikulum; M-mitohondrije, ROS-slobodni kisikovi radikali, HSP70, HSP27-srčani šok proteini 70 i 27 (Preuzeto od GYE i PARK, 2012.)

5. UČINCI RADIOFREKVENCIJSKOG ZRAČENJA NA MUŠKI SPOLNI SUSTAV

S povećanjem broja ljudi izloženih radiofrekvencijskim elektromagnetskim poljima stvorenih uređajima koje proizvode i opskrbljuje električna energija (uključujući uređaje u medicinskoj dijagnostici), zabrinutost šire javnosti raste obzirom na koji način radiofrekvencijsko elektromagnetsko polje utječe na naš organizam te na zdravlje životinja koje žive u našoj neposrednoj blizini (Slika 17.) (WDOWIAK i sur., 2017., MARJANOVIC i sur., 2012.). Uz prirodno zračenje kroz godine i antropološki učinak došlo je do velikog skoka u razvoju moderne tehnologije odnosno odašiljanju radiofrekvencijskog elektromagnetskog zračenja (ADAH i sur., 2018.). Upravo brzi tehnološki napredak dovelo je do stanja da je zračenje iz umjetnih izvora premašilo količinu zračenje prirodnog podrijetla, a ljudi i životinje izloženi su svakodnevno velikoj količini zračenja osobito radiofrekvencijskog elektromagnetskog zračenja.. Mobiteli, koji su najčešće korišteni uređaji i u najvećem broju u populaciji, rade koristeći frekvencije koje se razlikuju ovisno o proizvođaču i zemlji, no, najčešće korišteni mobiteli rade na frekvenciji od 850 do 1800 MHz. Negdje tijekom Drugog svjetskog rata započela su intenzivnija istraživanja vezana za biološki utjecaj mikrovalnih zračenja. Zapravo su istraživanja potaknuta razvojem radara odnosno istraživao se učinak radiofrekvencijskih elektromagnetskih valova koje oni emitiraju na ljudsko i životinjsko zdravlje (KESARI, 2018.).

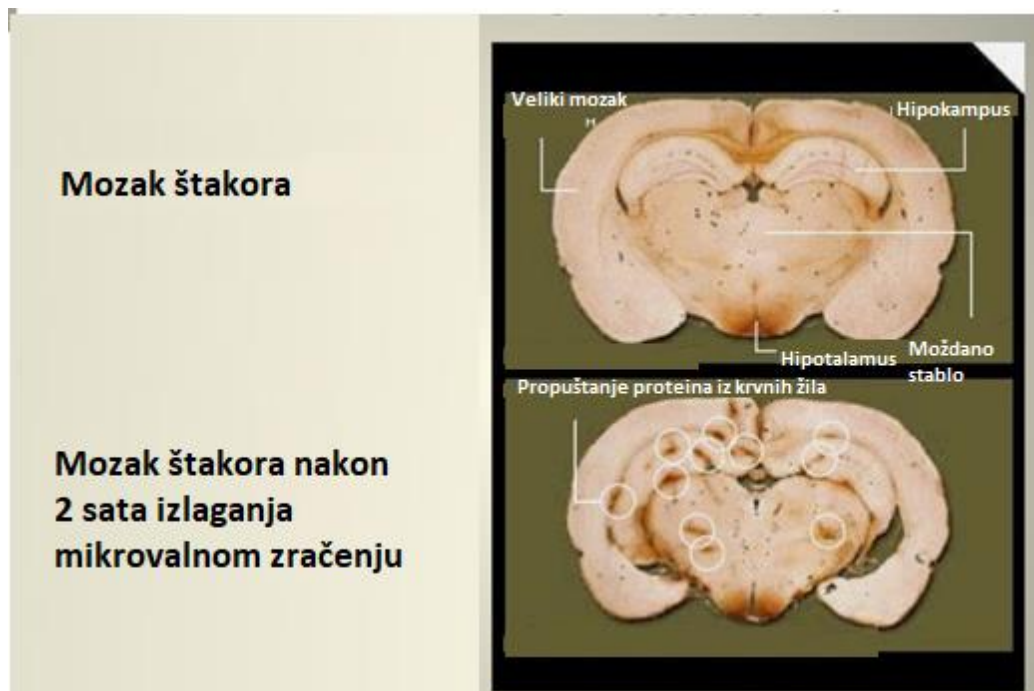
Utjecaj elektromagnetskog zračenja na ejakulat ljudi već se dogledno vrijeme istražuje. Naime, PRAUSNITZ i SUSSKIND su prvi istražili učinke radiofrekvencijskog elektromagnetskog zračenja na testise već 1962. godine (PRAUSNITZ i SUSSKIND, 1962.). Znanstveni interes učinka radiofrekvencijskog elektromagnetskog polja na spolni sustav muškaraca je veći jer je plodnost muškaraca u 20. stoljeću smanjena. Utvrđeno je da je broj spermija u muškaraca 1940. godine bio je gotovo dvostruko veći u odnosu na broj spermija 1990. godine (GIWEREMAN i sur., 1993.). Nadalje, smatra se da muškarci koji nose mobilne telefone u džepu hlača kroz dulje vremensko razdoblje, svakodnevno povećavaju mogućnost posljedica radiofrekvencijskog elektromagnetskog zračenja, a osobito su mladići rizičnija skupina (OH i sur., 2018.). Dosadašnja saznanja nam ukazuju kako upravo glava i reproduktivni organi su najviše pogođeni zračenjima upravo iz razloga nošenja mobilnih telefona u blizini tih organa (AL-BAYYARI, 2017.).

Izlaganje ejakulata radiofrekvencijskog elektromagnetskog zračenja stvorenog radom mobitela smanjenju koncentraciju, gibljivost, preživljavanje spermija te povećava udio spermija s patološkom morfologijom (EROGUL i sur., 2006., AGARWAL i sur., 2008., OKECHUKWU, 2020.).



Slika 17. Simptomi različitih organskih sustava prouzrokovani zračenjem mobilnog telefona (<https://www.scielo.br/j/ibju/a/Rg9yjCFyL3bHTwcLy8nGMsp/?lang=en#>)

Životinje su vrlo osjetljivi elektrokemijski kompleksi koji komuniciraju sa svojim okolišem putem električnih impulsa. Ionske struje i razlike u električnim potencijalima prolaze kroz stanične membrane i tjelesne tekućine (MARKS i RATKE, 1995.). Unutarnja elektromagnetska polja iz bioloških struktura karakteriziraju određene specifične frekvencije koje mogu ometati elektromagnetsko zračenje. Do ometanja elektromagnetskog zračenja dolazi indukcijom i izazivanjem modifikacija njihovih bioloških odgovora (HYLAND, 2000., WDOWIAK i sur., 2007.). Životinje izložene elektromagnetskoj frekvenciji mogu pretrpjeti pogoršanje zdravlja i promjene u ponašanju (MARKS i sur., 1995.) i promjene u plodnosti (FERNIE i sur., 2000.). Drugi zahvaćeni sustavi uključuju živčani (Slika 18.), srčani, endokrini, imunološki i spolni sustav (Slika 20.) (DASDAG i sur., 1999.).



Slika 18. Učinak radiofrekvencijskog elektromagnetskog zračenja na mozak štakora (<http://www.popsoci.com/scitech/article/2004-02/fresh-fears-over-cellphones>)

Što se tiče dosadašnjih istraživanja na životinjama vezanih za utjecaj radiofrekvencijskog elektromagnetskog zračenja poznato je da štakori izloženih radiofrekvencijskom zračenju frekvencije od 10 GHz dva sata dnevno tijekom 35 dana imaju smanjenu proizvodnju spermija (KESARI i sur., 2011.). Neplodnost štakora se dovodi u vezu sa stvaranjem prevelike količine ROS-a, smanjenom aktivnosti antioksidacijskih enzima, pucanjem DNK-a lanca, patološkom morfologijom spermija i smanjenom koncentracijom testosterona (KESARI i sur., 2011.). Također ejakulat bika *in vitro* ozračena frekvencijom od 1800 GHz očituje značajan porast gibljivosti spermija kratkotrajnim izlaganjem, dok duža izloženost ejakulata navedenom radiofrekvencijskom elektromagnetskom zračenju uzrokuje pad gibljivosti spermija (LUKAC i sur., 2011.).

Reaktivni kisikovi spojevi (ROS) su nestabilne reaktivne molekule koje se kontinuirano proizvode u nekoliko tipova stanica, a uključene su između ostalog u regulaciju ekspresije gena koja određuje protuupalni odgovor, rast stanica, diferencijaciju, proliferaciju i odgovor na stres (KARTAŠEV, 1992., SIMKO i MATTSON, 2004.). S druge strane, u izloženih stanica radiofrekvencijskom elektromagnetskom zračenju stvaraju se u prevelikim količinama te uz smanjenu količinu ili aktivnost antioksidansa, dovode do oštećenja spermija koje utječu na membrane stanica i organela, lipide, proteine pa čak i deoksiribonukleinske kiseline (DE IULIIS i sur., 2009., KIM i sur., 2021.).

5.1. Biofizički pokazatelji radiofrekvencijskog zračenja

Biofizički pokazatelji opisuju fizičke i biološke čimbenike, koji određuju staničnu radio osjetljivost nakon izlaganja radiofrekvencijskom zračenju, mjerenjem brzine apsorpcije zračenja. Elektromagnetsko polje mora prodrijeti u izloženi biološki sustav i potaknuti unutarnje elektromagnetsko polje koji će tada potaknuti biološki odgovor. Dubina prodiranja ili apsorpcija radiofrekvencije zračenja ovisi o pokazateljima polja koji prodire u tkivo (poput intenziteta i gustoće snage), zoni izloženosti, obliku, orijentaciji objekta i konfiguraciju zračenja (koliko je objekt blizu izvora) (SHARMA i sur., 2017.). Navedeni čimbenici izravno i neizravno sudjeluju u stvaranju slobodnih radikala za koje je utvrđeno da izravno oštećuju DNK-a spermija štakora nakon izlaganja 3G mreži mobilnog telefona (KUMAR i sur., 2014.). Oštećenje DNK-a ukazuje na ozbiljnost promjena i opravdanu zabrinutost te povezanosti radiofrekvencijskog elektromagnetskog zračenja i neplodnosti ili raka testisa. Postavlja se pitanje na koji način tako niskofrekventno radiofrekvencijsko elektromagnetsko zračenje može dovesti do oštećenja DNK-a. Jasno je da fotoni u neionizirajućem zračenju nemaju dovoljno energije da uzrokuju pucanje kemijskih veza u molekulama te da uzrokuju izravno ioniziranje bioloških molekula (SHARMA i sur., 2017.). Naime, opće je prihvaćena teorija da do oštećenja dolazi indirektnim putem stvaranjem velike količine slobodnih radikala, koji oštećuju DNK-a (LAI i SINGH, 2004., SIMKO, 2007., KESARI, 2017.). Mobiteli i prijenosni tornjevi podjednako su odgovorni za zdravstvene učinke, jer mobiteli emitiraju zračenje obližnjim baznim stanicama ili antenama. Naša tijela su poput antena koje apsorbiraju zračenje i pretvaraju ga u izmjeničnu vrtložnu struju (BHAT, 2013.). Zračenje mobitela nastaje u odašiljaču, a emitira se kroz antenu u obliku radio valova (SHARMA i sur., 2017.). 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 apsorpiranja energije po jedinici mase biološkog tkiva, a izražava se u vatima po kilogramu (W/kg). Kada je tkivo izloženo elektromagnetskom polju, radiofrekvencijska energija se raspršuje i slabi dok prodire u tjelesna tkiva. SAR je veći tijekom telefonskog poziva ili korištenja elektromagnetskih uređaja. Testisi su vrlo osjetljivo na zračenje, jer se u njima odvija proces stvaranja i sazrijevanja spermija. Smatra se da su radiofrekvencijska elektromagnetska polja dovoljno jaka da prodiru dublje u samo tkivo testisa i mozga (DIMBYLOW i MANN, 1994., KESARI, 2017.).

Tijekom razvoja testisa, osim dubine penetracije koja je bitan čimbenik oštećenja testisa bitno je vrijeme i trajanje izlaganja zračenju, broj izlaganja u danu, količina nezrelih stanica izloženih zračenju i količina vode u organu koji je izložen. Veća količina vode u organizmu povećava učinak zračenja. Također se smatra da morfološke promjene uzrokovane elektromagnetskim poljem također ovise o vrsti, dozi, načinu i trajanju izlaganja elektromagnetskom polju (TÜREDI i sur., 2015., KESARI, 2017.).

5.2. Učinci radiofrekvencijskog zračenja na ejakulat

Prema istraživanjima iz 2005. godine nešto manje od 10% parova u Sjedinjenim Američkim Državama bilo je neplodno, te se već tada predviđalo povećanje tog broja i do 15% u industrijaliziranim državama (CHANDRA i sur., 2005., HOMAN i sur., 2007.). Smatra se da je povećana upotreba mobitela ili Wi-Fi-ja, koja odašilje radiofrekvencijskog zračenje usko povezana s neplodnošću na način da uzrokuje oštećenje spermija (KESARI i sur., 2018., ADAH i sur., 2018.) Naime, osim radiofrekvencijskog zračenje na plodnost muškaraca utječu i drugi čimbenici poput konzumacije opijata, pušenje cigareta i način života koji se uvelike mijenja i ubrzava, a hrana koja se konzumira je sve manje kvalitetna. No, dokazno je da je upotreba mobilnih telefona povezana sa smanjenjem broja gibljivih i progresivno gibljivih spermija, smanjuje preživljavanje spermija te povećava broj spermija patološke morfologije kao i stvaranje ROS-a, a to u kombinaciji sa drugim štetnim čimbenicima zasigurno dovodi do smanjene plodnosti u ljudi i životinja (AGARWAL i sur., 2008., KUMAR i sur., 2011.). Osim mobitela nedavna istraživanja ukazuju kako je moguć utjecaj i Wi-Fi mreže na kakvoću ejakulata (AVENDANO i sur., 2012., ADAH i sur., 2018., KESARI i sur., 2018.).

5.2.1. Broj spermija

Izloženost mobitelu odnosno radiofrekvencijskim elektromagnetskim poljima negativno utječe na potencijal plodnosti spermija. Značajno smanjen udio spermija te 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.). Smanjenje broja i gibljivosti spermija utvrđena je također u štakora su bili izloženi prijenosnim računalima povezanim Wi-Fi mrežom. Štakori su bili izloženi radiofrekvencijskom elektromagnetskom zračenju 7 sati dnevno tijekom 1 tjedna (MORTAZAVI i sur., 2010.). Štetni učinak radiofrekvencijskog elektromagnetskog zračenja posebice mobitela na testise utvrdila su brojna istraživanja na ljudima i životinjama, a dobiveni se učinak pripisuje nastanku oksidativnog stresa zbog prekomjernog stvaranja slobodnih radikala u mitohondrijima spermija (DE IULIIS i sur., 2009., GHANBARI i sur., 2013., GORPINCHENKO i sur., 2014., JONWAL i sur., 2018.). Također je poznato da elektromagnetska zračenja visokog intenziteta imaju učinak zagrijavanja tkiva što može prouzročiti toplinski učinak testisa.

Za normalno funkcioniranje testisa životinja neophodna je određena temperatura, odnosno 2 °C niža temperatura od normalne tjelesne temperature. Povećanje temperature testisa ili tjelesne temperature pri izlaganju elektromagnetskom zračenju može uzrokovati nepovratni poremećaj spermatogeneze (KANDEL i SWERDLOF, 1988., JUNG i SCHILL, 2000., ADAH i sur., 2018.).

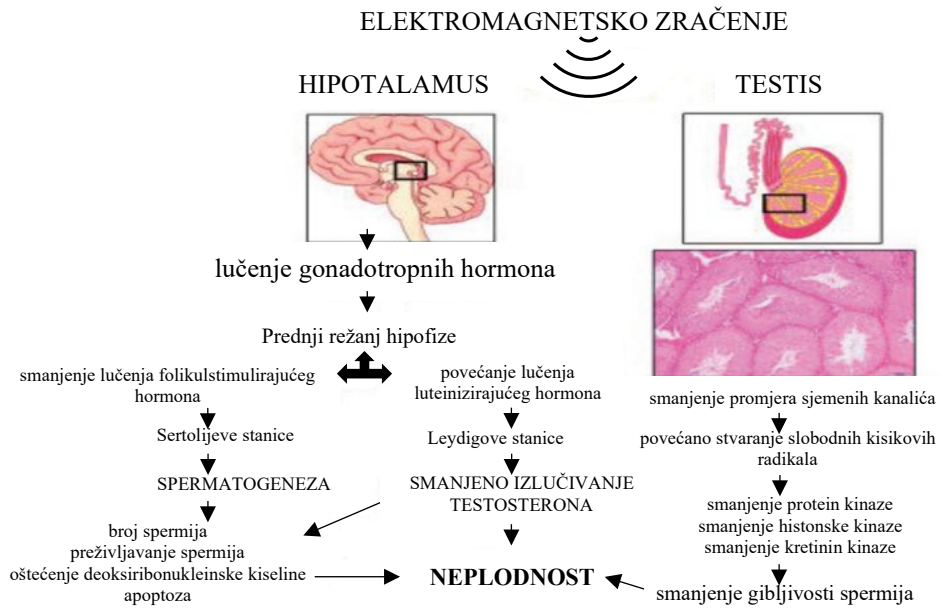
5.2.2. Gibljivost i morfologija spermija

Nošenje mobitela u džepu hlača smanjuje progresivnu gibljivost spermija u muškaraca (AL-BAYYARI i sur., 2017.) te veći udio spermija patološke morfologije (KESARI i BEHARI, 2012.). Radiofrekvencijsko elektromagnetsko zračenje posebice mobitela kod duljeg izlaganja ljudi i životinja uzrokuje smanjenu koncentraciju, gibljivost i održivost spermija te smanjeni udio spermija normalne morfologije (KESARI i BEHARI, 2012., LA VIGNERA i sur., 2012.). Nadalje, također je dokazano da izloženost radiofrekvencijskom elektromagnetskom zračenju izravno utječe na testise uzrokujući značajno smanjenje promjera i težine sjemenih kanalića testisa, odnosno patoloških i fizioloških promjena u tkivu testisa (LUO i sur., 2013., KUMAR i sur., 2014., BHAODINI i sur., 2015.).

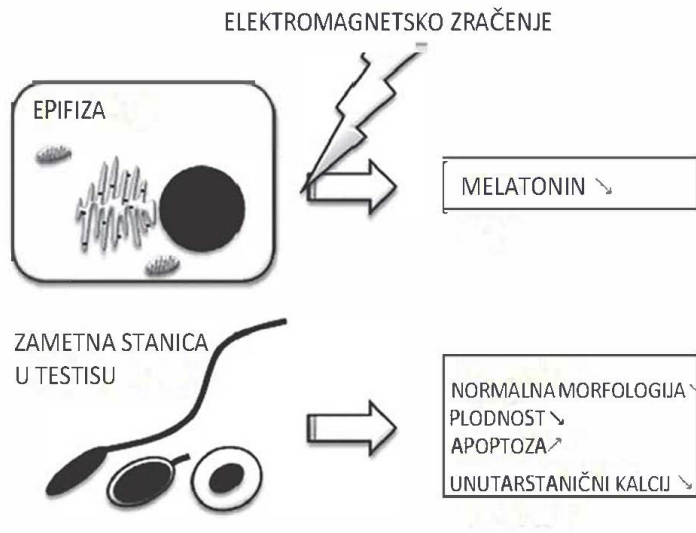
Mehanizam negativnog učinka radiofrekvencijskog elektromagnetskog zračenja na testise i smanjenja kakvoće ejakulata najvjerojatnije je povezan sa nastankom oksidativnog stresa i prekomjernog stvaranja ROS-a. Smanjenje gibljivosti i vitalnosti spermija uzrokovano je povećanjem koncentracije superoksidnog aniona (AGARWAL i sur., 2009.) Slobodni radikali oksidiraju fosfolipide u izvanstaničnom dijelu membrane spermija te tako uzrokuju smanjenu membransku fluidnost i vitalnost spermija što uzrokuje njihovu smanjenu gibljivost (KESARI i sur., 2018.). Izloženost elektromagnetskom zračenju potiče stvaranje ROS-a i time uzrokuje negativne učinke na različite stanične organele spermija poput DNK i mitohondrije (AGARWAL i PRABAKARAN, 2005., ADAH i sur., 2018.).

5.3. Učinci radiofrekvencijskog zračenja na spolne hormone

Izloženost radiofrekvencijskom elektromagnetskom zračenju u životinja može utjecati na aktivnost epifize i hipofize (RODRIGUEZ i sur., 2004., CUCURACHI i sur., 2013., OKECHUKWU, 2020.). Naime, elektromagnetsko zračenje može utjecati na smanjeno izlučivanje melatonina odnosno smanjenje biološkog učinka melatonina u ljudi i životinja (YELLON, 1994., JARUPAT i sur., 2003., KESARI i sur., 2018.) (Slika 19). Primjerice štakori koji su bili izloženi elektromagnetskom zračenju 50 Hz tijekom 6 tjedana, imali su smanjenu koncentracija melatonina u epifizi i perifernoj krvi (RODRIGUEZ i sur., 2003.). Naime, melatonin regulira oslobađanje hormona iz hipotalamusa (Slika 20.), gonadotropnog oslobađajućeg hormona (GnRH), utječući pritom na prednji režanj hipofize odnosno na oslobađanje folikulo stimulirajućeg hormona (FSH) i luteinizirajućeg hormona (LH). Nadalje LH stimulira Leydigove stanice na stvaranje testosterona, a testosteron je neophodan za spermatogenezu, stvaranje spermija te za normalnu morfologiju i fiziologiju sjemenih kanalića. Dokazano je da su Leydigove stanice miša i štakora osobito osjetljive na elektromagnetsko zračenje, a to se odražava na smanjenu koncentraciju testosterona i spermatogenezu (WANG i sur., 2003., KUMAR i sur., 2013.). Stoga je pri smanjenom lučenju hormona epifize (melatonina) zbog negativnog učinka radiofrekvencijskog elektromagnetskog zračenja smanjeno lučenje gonadotropnih hormona adenohipofize (AL-AKHRAS i sur., 2006., CIANI i sur., 2021.), smanjenom proizvodnjom testosterona te spermatogenezom (ADAH i sur., 2018., KESARI i sur., 2018., OKECHUKWU, 2020.)



Slika 19. Učinak radiofrekventnog elektromagnetskog polja mobilnog telefona na hipotalamus, prednji režanj hipofize i testise (ALTUN i sur., 2018., OKECHUKWU, 2020.)



Slika 20. Sažeti prikaz učinaka elektromagnetskih polja na mušku plodnost. povećanje: □, smanjenje ili inhibicija (Preuzeto od GYE i PARK, 2012.)

5.4. Učinci radiofrekvencijskog zračenja na biokemijske pokazatelje sjemenske plazme

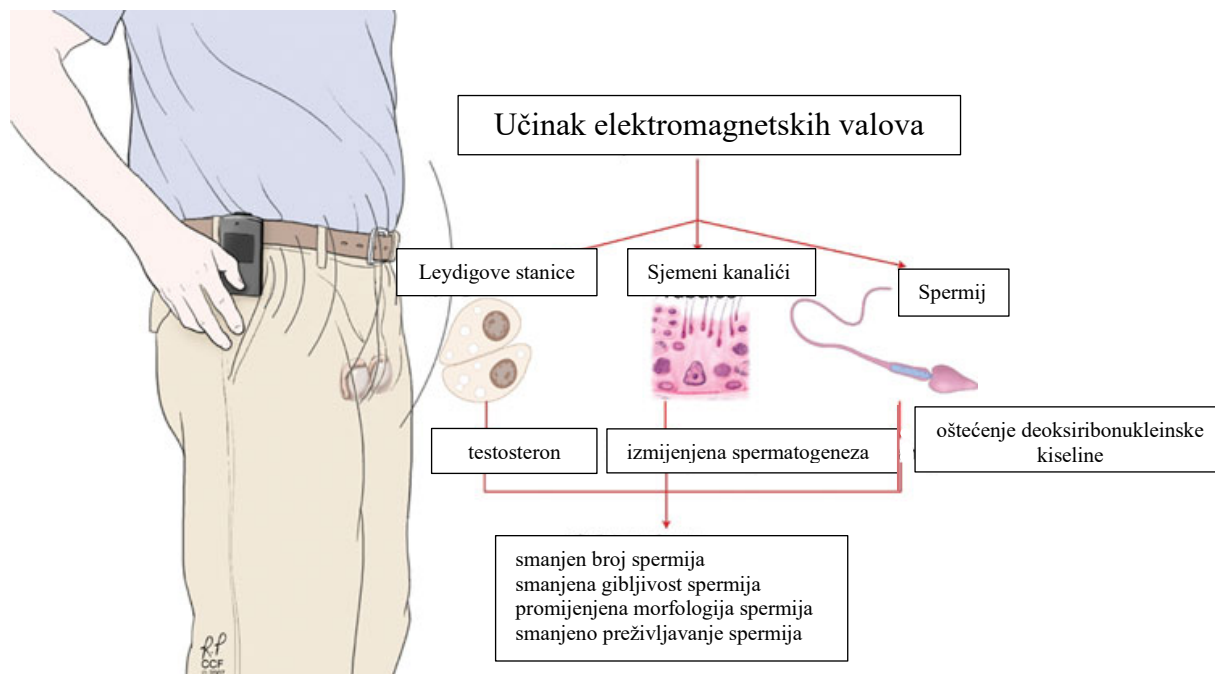
Izocitrat dehidrogenaza je jedan od važnih enzima u ciklusu limunske kiseline, a koji je pod utjecajem neionizirajućeg elektromagnetskog polja (SIMKO i MATTSON, 2004.). NYLUND i LESZCZYNSKI, (2004.) su dokazali da promjene u aktivnosti enzima dovode do smanjene proizvodnje adenozin trifosfata (ATP) u stanicama sisavaca, a budući da gibljivost spermija ovisi o ATP-u, takav mehanizam može uzrokovati smanjenje gibljivosti spermija tijekom izlaganja takvom zračenju. Spermiji gube citoplazmu u procesu sazrijevanja, što dovodi do i gubitka antioksidativnog zaštitnog mehanizma (koji se nalaze u citoplazmi) te ih taj proces čini podložnim oštećenju DNK (LAI i SING, 1996.). 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.). Također tijekom procesa sazrijevanja dolazi do odvajanja spermija od Sertolijevih stanica, stanica koje ih prehranjuju (KESARI i sur., 2013.). 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.). Nadalje, poznato je da elektromagnetsko zračenje uzrokuje poremećaje u mehanizmima membrane stanica spermija koji reguliraju prolaz iona, posebno natrija i kalija, a posljedično i udio vode što negativno utječe na preživljavanje spermija (AYRAPETYAN, 2006.). Smatra se da je posljedica izravnog učinka elektromagnetskog zračenja apoptoza i smanjenje broja stanica u sjemenim kanalićima (FAEGI i sur., 2015., ADAH i sur., 2018.).

5.5. Učinci radiofrekvencijskog zračenja na krvno-testisnu barijeru

Krvna barijera testisa je osjetljiva na stimulaciju okoliša, što može utjecati na njezinu propusnost i utjecati na stvaranje protutijela protiv spermija, što je ključno za mušku plodnosti. Tkivo nakon izlaganja elektromagnetskom zračenju 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.). Nadalje, vanjski je sloj tkiva pokusnih uzoraka tkiva testisa bio tanji od kontrolnih uzoraka tkiva testisa u muškaraca te je također bio 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.). Nadalje, također je utvrđeno da većina mitohondrija nema kriste, nedostaju veze između mioidnih stanica. Epitelno tkivo se počelo oporavljati nakon prestanka izlaganja elektromagnetskom zračenju. Prethodno navedeno ukazuje da izlaganje elektromagnetskom zračenju može uzrokovati duboke promjene u epitelnom tkivu sjemenih kanalića. Stoga izloženost elektromagnetskom zračenju može prouzročiti patološke promjene koje dovode do subfertiliteta i neplodnosti (CARL i sur., 2006., ADAH i sur., 2018.).

5.6. Učinci radiofrekvencijskog 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. „lanacu prijenosa elektrona“ fiziološki se stvaraju superoksidni radikali. Poznato je da elektromagnetsko zračenje može utjecati na mitohondrijske membrane te na taj način utjecati na proizvodnju velike količine ROS-a (PEI i sur., 2015.). Elektromagnetsko zračenje može poremetiti metabolizam ROS-a povećanjem stvaranja ROS-a ili smanjenjem aktivnosti antioksidacijskih enzima (OKSAY i sur., 2014.). Tkivo testisa jako ovisi o kisiku za normalni proces spermatogeneze, a istovremeno je vrlo osjetljivo na toksične učinke ROS-a, te ja stoga optimalna aktivnosti antioksidativnih enzima neophodna za normalnu spermatogenezu (OKSAY i sur., 2014.). Prekomjerne količine ROS-a kao što su superoksidni anioni (O^{\ominus}), hidroksilni radikali (OH^{\ominus}) 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 staničnim membranama sadrže veliki udio višestruko nezasićene masne kiseline i membranski vezanu NADPH oksidazu (D'AUTREAUX i TOLEDANO, 2007.). Povećano stvaranje ROS-a uzrokuje oksidacijsko oštećenje lipida stanične membrane spermija (HUGHES i sur. 1996., DIEM i sur., 2005.) te korelira sa smanjenom muškom plodnošću (IWASKI i GAGNON, 1992., ADAH i sur., 2018.) (Slika 21).



Slika 21. Učinak elektromagnetskih valova na tkivo testisa i spermije
 (<https://www.renalandurologynews.com/home/departments/on-the-forefront/cleveland-clinic/cell-phone-use-by-men-may-decrease-fertility/>)

6. ZAKLJUČAK

Rezultati dostupnih istraživanja pokazuju da izloženost mobitelima, mikrovalnim pećnicama, prijenosnim računalima ili Wi-Fi-ju koji emitiraju radiofrekvencijske elektromagnetske valove uzrokuje štetne učinke na testise ljudi i životinja. Tako navedeni učinci mogu smanjiti broj i gibljivost spermija, uzrokovati veći udio spermija s patološkom morfologijom, povećano oštećenje DNK-a (uzrokujući stvaranje mikronukleusa i genomsku nestabilnost), kao i poremećaje u vrijednostima te funkciji protein kinaza, hormona i antioksidativnih enzima. Utvrđeno je da su takvi učinci odgovorni za neplodnost zbog prekomjerne proizvodnje ROS-a u izloženim stanicama. Smatra se da navedeni učinci i posljedice istih izlaganja radiofrekvencijskom elektromagnetskom polju ovise o fizikalnim pokazateljima kao što su trajanje izlaganja, udaljenost do izvora zračenja, gustoća snage i dubina prodiranja. Može se očekivati i da postoje doze energije koje djeluju neutralno ili pozitivno, a samo njihovo prekoračenje može uzrokovati opasne učinke. Dostupna znanstvena istraživanja ne pružaju dostatne dokaze kako bi se s sigurnošću moglo tvrditi o količini i obliku energije koja se prenosi u obliku elektromagnetskog vala koji je opasan za ljudsko i životinjsko zdravlje. Stoga bi trebalo provesti istraživanja u kojima će se pratiti vrijednosti intenziteta polja, te izvršiti numeričke analize apsorpcije energije.

Zaključno, postoje brojni dokazi da elektromagnetsko zračenje ima štetne učinke na muški reproduktivni sustav, kao što je povećana temperatura testisa koja ometa proces spermatogeneze, histološke aberacije u testisima i ponekad smanjenje mase testisa. Stoga se preporuča da se izloženost zračenju svede na najmanju moguću mjeru te redovita uporaba antioksidansa kako bi se smanjio negativan učinak prevelike količine stvorenog ROS-a. S druge strane, potrebno je razjasniti moguće zaštitne učinke pojedinih antioksidansa, što bi u konačnici riješilo problem samo na simptomatskoj razini.

7. LITERATURA

1. ADAH, A. S., D. I ADAH, K. T. BIOBAKU, A. B. ADEYEMI (2018): Effects of electromagnetic radiations on the male reproductive system. *Anatomy Journal of Africa* 7, 1152-1161.
2. AGARWAL, A., F. DEEPINDER, R. K. SHARMA, G. RANGA, J. LI (2007): Effect of cell phone usage on semen analysis in men attending infertility clinic: an observational study. *Fertil. Steril.* 89, 124-8.
3. AGARWAL, A., N. R. DESARI, K. MAKKER, A. VARGHESE, R. MOURADI, E. SABANEGH, 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, 1318-25.
4. AGARWAL A, S. A. PRABAKARAN (2005): Mechanism, measurement and prevention of oxidative stress in male reproductive physiology. *Indian J Exp Biol.* 43, 963-974.
5. AL-AKHRAS, M., H. DARMANI, A. ELBETIEHA (2006): Influence of 50 Hz magnetic field on sex hormones and other fertility parameters of adult male rats. *Bioelectromagnetics* 27, 127-131.
6. AL-BAYYARI, N. (2017): The effect of cell phone usage on semen quality and fertility among Jordanian males. *Middle East Fertil Society J.* 22, 178-82.
7. ALTUN, G., Ö. G. DENIZ, K. K. YURT, D. DAVIS, S. KAPLAN (2018): Effects of mobile phone exposure on metabolomics in the male and female reproductive systems. *Environ Res.* 167, 700-7.
8. ASGHARI, A., A. A. KHAKI, A. RAJABZADEH, A. KHAKI (2016): A review on Electromagnetic fields
9. AYRAPETYAN, S. (2006): Cell Aqua Medium as a Primary Target for the Effect of Electromagnetic Fields, In: *Bioelectromagnetics*, Ayrapetyan, S.N. and Markov, M (Eds) Springer, Netherlands, str. 31-63.
10. BAHADINI, A., M. OWJFARD, A. TAMADON, 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.

11. BHAT, M. A. (2013): Effects of Electromagnetic Waves Emitted by Mobile Phones on Male Fertilit. *Computer Engineering and Intelligent Systems* 4, 51-64.
12. BUTKOVIĆ, I. (2021): Učinak radiofrekvencijskog elektromagnetskog zračenja na pokazatelje kakvoće, antioksidacijski status i oštećenje DNK-a in vitro ozračenog sjemena rasplodnih nerasta. *Veterinarski fakultet Sveučilišta u Zagrebu. Doktorska disertacija.*
13. CARL, A.B., ASHWOOD, E.R., AND BURNS, D.E. (2006). *Tietz text book of clinical chemistry and molecular diagnostics*. St. Louis, MO: Elsevier/Sanders, str. 191-218.
14. CHALLIS, L.J. (2005): Mechanisms for Interaction Between RF Fields and Biological Tissue. *Bioelectromagnetics* 7, 98-106.
15. CHANDRA, A., G. M. MARTINEZ, W. D. MOSHER, J. C. ABMA, 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.
16. CIANI, E., T. M. HAUG, G. MAUGARS, F.A. WELTZIEN, J.FALCÓN, R. FONTAINE (2021): Effects of Melatonin on Anterior Pituitary Plasticity: A Comparison Between Mammals and Teleosts. *Front. Endocrinol.* 11, 1-20.(EMFs) and the reproductive system. *Electronic physician*, 8, 2655 - 2662.
17. CLEVELAND, R. F. S., M. U. DAVID, L. JERRY (1997): Evaluating compliance with FCC guidelines for human exposure to radiofrequency electromagnetic fields. *OST Bulletin* 65, 97-101.
18. CUCULLO, L., E. OBY, J. M. HALLENBECK, B. AUMAYR, E. RAPP, D. JANIGRO (2005): Artificial blood-brain barrier. In: *Blood–brain interfaces: from ontogeny to artificial barriers*. R. Dermietzel, D. C. Spray, M. Nedergaard, (Eds). Wiley Press, Hoboken, NJ, str. 375-402.
19. D'AUTREAU, B., M. B. TOLEDANO (2007): ROS as signaling molecules: Mechanisms that generate specificity in ROS homeostasis. *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, 8, 813-824.
20. DE IULIIS, G. N., R. J. NEWAY, B. V. KING, R. J. AITKEN (2009): Mobile phone radiation induces reactive oxygen species production and DNA damage in human spermatozoa in vitro. *PLoS One.* 4:e6446.

21. DIMBYLOW, P. J., S. M. MANN (1994): SAR calculations in an anatomically realistic model of the head for mobile communication transceivers at 900 MHz and 1.8 GHz. *Phy. Med. Biol.* 39, 1537-4.
22. CARPENTER D. O. (2013.): "Human disease resulting from exposure to electromagnetic fields," *Reviews on Environmental Health* 28, 159-172.
23. EROGUL, O., E. OZATES, I. YILDIRIM, T KIR, E. AYDUR, G. KOMESLI, H. C. IRKILATA, M. K. IRMAK, A. F. PAKER (2006): Effects of electromagnetic radiation from a cellular phone on human sperm motility: an in vitro study. *Archives of Medical Research* 37, 840-3.
24. EVENDANO, C., A. MATA, C. S. SARMIENTO, 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.
25. FAEGHI, P., M. M. NARIMANI-RED, E. R. POUR (2015): Electromagnetic Fields and its effect on Chicken Embryo. *Biological Forum*, 7, 559-563.
26. FRANÇA, L. R., G. F. AVELAR, F. F. L. ALMEIDA (2005): Spermatogenesis and sperm transit through the epididymis in mammals with emphasis on pigs. *Theriogenology* 63, 300-318.
27. FERNIE, K. J., D. M. BIRD, R. D. DAWSON, P. C. LAGUE (2000): Effects of electromagnetic fields on the reproductive success of American Kestrels. *Physiological and Biochemical Zoology*. 73, 60-65.
28. GHANBARI, M., S. B. MORTAZAVI, A. KHAVANIN, 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, 21-8.
29. GIWEREMAN, A., E. CARLSON, N. KEIDING (1993): Evidence for increasing incidence of abnormalities of the human testis: a review. *Environmental Health Perspective* 101, 65-97.
30. GORPINCHENKO, I., O. NIKITIN, O. BANYRA, A. SHULYAK (2014): The influence of direct mobile phone radiation on sperm quality. *Central Europ. J. Urol.* 67, 65-71.
31. GRIVEAU, J. F., P. RENARD, D. LE LANNOU (1994): An in vitro promoting role for hydrogen peroxide in human sperm capacitation. *Int. J. Androl.* 17, 300-307.

32. GYE, M. C., C. J. PARK (2012): Effect of electromagnetic field exposure on the reproductive system. *Clin. Exp. Reprod. Med.* 39, 1-9.
33. HOMAN, G. F., M. DAVIES, 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, 209-23.
34. ITU, International Telecommunication Union (2008): Radio Regulations. International Telecommunication Union 1, 1-429.
35. JARUPAT S., A. KAWABATA, H. TOKURA, A. BORKIEWICZ (2003): Effects of the 1900 MHz electromagnetic field emitted from cellular phone on nocturnal melatonin secretion. *J. Physiol. Anthropol.* 22, 61-3.
36. JONWAL, C., R. SISODIA, V. K. SAXENA, K. K. KESARI (2018): Effect of 2.45 GHz microwave radiation on the fertility pattern in male mice. *Gen. Physiol. Biophys.* 37, 453-460.
37. KESARI, K. K., A. AGARWAL, R. HENKEL (2018): Radiations and male fertility. *Reprod. Biol. Endocrinol.* 16, 118.
38. KESARI, K. K., J. BEHARI (2012): Evidence for mobile phone radiation exposure effects on reproductive pattern of male rats: role of ROS. *Electromagn. Biol Med.* 31, 213-22.
39. KESARI K. K., S. KUMAR, J. BEHARI (2010): Mobile phone usage and male infertility in Wistar rats. *Indian J. Exp. Biol.* 48, 987-92.
40. KHAKI, A. A., R. S. TUBBS, N. M. SHOJA, J. S. RAD, R. M. FARAHANI, 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.
41. KHULLAR, S. (2012): Impact of Electromagnetic Waves Generated by Cellular Phones on Male Fertility: A Review. *Asian Journal of Biomedical and Pharmaceutical Sciences*, 2, 9-14.
42. KILAGALLON, S. J., L. W. SIMMONS (2005): Image content influences men's semen quality. *Biol. Lett.* 1, 253-5.
43. KIM, S., D. HAN, J. RYU, K. KIM, 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.

44. KONIG, H. E., H. G. LIEBICH (2009): Anatomija domaćih sisavaca. Naklada Slap, Zagreb, str. 417-435.
45. KOPPERS, A. J., L. A. MITCHELL, P. WANG, M. LIN, 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, 687-98.
46. KORDIĆ, A. (2020): Biološki učinci elektromagnetskog zračenja u urbanom okruženju. str. 19-31. Dostupno na:
<https://repositorij.fpz.unizg.hr/islandora/object/fpz%3A1995/datastream/PDF/view>
47. KUMAR, S., J. P. NIRALA, J. BEHARI, 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, 890-7.
48. KUMAR S, K. K. KESARI, 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, 1237-45.
49. KUMAR S, BEHARI J, SISODIA R (2013). Influence of electromagnetic fields on reproductive system of male rats. *Int. J. Rad. Biol.* 89(3):147.
50. LA VIGNERA, S, CONDORELLI RA, VINCARI E, D'AGATA R, CALOGERO AE (2012): Effects of the exposure to Mobile phones on male reproduction: a review of the literature. *J. Androl.* 33, 350-6.
51. LAI, H., N. P. SINGH (1996): Single- and double-strand DNA breaks in rat brain cells after acute exposure to radiofrequency electromagnetic radiation. *International Journal of Radiational Biology* 69, 513-521.
52. LIU, Y., W. B. LIU, K. J. LIU, L. AO, J. L. ZHONG, J. CAO, J. Y. LIU (2015): Effect of 50Hz Extremely Low-Frequency Electromagnetic Fields on the DNA Methylation and DNA Methyltransferases in Mouse Spermatoocyte-Derived Cell Line GC-2 *BioMed Research International Article ID237183*.
53. LUO, Y., X. WANG, Y. CHEN, S. XU, G. DING, C. SHI (2013): Effects of electromagnetic radiation on morphology and TGF- β 3 expression in mouse testicular tissue. *Toxicology* 310, 8-14.

54. MARJANOVIĆ, A. M., I. PAVIČIĆ, I. TROŠIĆ (2012): Biological indicators in response to radiofrequency/microwave exposure. *Arhiv za Higijenu Rada i Toksikologiju*. 63, 407-41.
55. MARKS, T.A., RATKE, C.C., ENGLISH, W.O. (1995) Stray Voltage and developmental, reproductive and other toxicology problems in dogs, cats and cows: a discussion. *Veterinary and Human Toxicology* 37, 163-172.
56. MCGLONE J. J., E. O. AVILES-ROSA, C. ARCHER, M. M. WILSON, K. D. JONES, E. M. MATTHEWS, A. A. GONZALEZ, E. REYES (2020): Understanding Sow Sexual Behavior and the Application of the Boar Pheromone to Stimulate Sow Reproduction. In: *Animal Reproduction in Veterinary Medicine*. (Aral, F., R. Payan-Carreira, M. Quaresma), IntechOpen. Dostupno na: <https://www.intechopen.com/chapters/71105>
57. MORTAZAVI, S. M. J., A. R. TAVASSOLI, F. RANJBARI, P. MOAMMAIEE (2010): Effects of laptop computers electromagnetic field on sperm quality. *J. Reprod. Infertil.* 11, 251-258.
58. NOAKES, D. E., T. J. PARKINSON, G. C. W. ENGLAND (2019): *Veterinary Reproduction and Obstetrics*. 10th ed., Elsevier, Edinburgh, London, New York, Oxford, Philadelphia, St. Louis, Sydney, Toronto, str. 35-54.
59. OKSAY, T., M. NAZIROGLU, S. DOGAN, A. GUZEL, N. GUMRAL, 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.
60. OZTURAN, O., T. ERDEM, M. C. MIMAN, M. T. KALCIOGLU, S. ONCEL (2002): Effects of electromagnetic field of mobile phones on hearing. *Acta Otolaryngol.* 122, 289-293.
61. PARRISH, J. J., K. L. WILLENBURG, K. M. GIBBS, K. B. YAGODA, M. M. KRAUTKRAMER, T. M. LOETHER, F. C. S. A. MELO (2017): Scrotal insulation and sperm production in the boar. *Mol. Reprod. Dev.* 84, 969-978.
62. PEI, X. GU, Q. YE, D. WANG, Y. ZOU, X. HE, L., JIN Y. AND YAO, Y. (2015). Effect of computer radiation on weight and oxidant-antioxidant status of mice *Nutricion Hospitalaria* 31, 1183-1186.
63. POLJAK, D. (2006): *Izloženost ljudi neionizacijskom zračenju*. Kigen, Zagreb.

64. POURLIS, A. F. (2009): Reproductive and developmental effects of EMF in vertebrate animal models. *Pathophysiology* 16, 179-189.
65. PRAUSNITZ, S., C. SUSSKIND (1962): Effects of chronic microwave irradiation on mice. *Ire Trans. Biomed. Electron* 9, 104-8.
66. SAEFL (2005): *Electrosmog in the environment*. Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape (SAEFL), Bern. Švicaraska.
67. SHARMA, A., K. K. KESARI, H. N. VERMA, R. SISODIA (2017): Neurophysiological and behavioral dysfunctions after electromagnetic field exposure: a dose response relationship. U: *Perspectives in environmental toxicology*. (Kesari K, ed.), Basel, Switzerland: Springer International Publishing. str. 1-30.
68. SIMKO, M., (2007): Cell type specific redox status is responsible for diverse electromagnetic field effects. *Curr. Med. Chem.* 14, 1141-52.
69. KOTTOU, S., D. NIKROPOULOS, E. VOGGIANNIS, D. KOULGLIOTIS, E. PETRAKI P. H. YANNAKOPOULOS (2014.): "How safe is the environmental electromagnetic radiation? *Journal of Physical Chemistry & Biophysics*, 4:3.
70. TUREDI, S., H. HANCI, Z. TOPAL, D. UNAL, T. MERCANTEPE, I. BOZKURT, H. KAYA, 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(4):390.
71. VILIĆ, M. (2014): Radijacijska higijena - Odabrana poglavlja iz radioekologije, radiobiologije i radijacijske higijene. 3-43. DOSTUPNO NA: https://lms.vef.hr/pluginfile.php/18530/mod_resource/content/2/Rad.%20higijena%20%200WEB%20PREDAVANJE.pdf
72. WANG, S. M., D. W. WANG, R. Y. PENG, Y. B. GAO, Y. YANG, W. H. HU, ET AL. (2003): Effect of electromagnetic pulse irradiation on structure and function of Leydig cells in mice. *Zhonghua Nan Ke Xue.* 9, 327-30.
73. WDOWIAK, A., A. PAWEL, A. MAZUREK, I. B. WDOWIAK (2017): Effect of electromagnetic waves on human reproduction. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine* 24, 13-18.
74. YILDIRIM, M. E., M. KAYNAR, H. BADEM, M. CAVIS, O. F. KARATAS, E. CIMENTEPE (2015): What is harmful for male fertility: Cell phone or the wireless internet? *Kaohsiung Journal of Medical Sciences* 31, 480-484.

75. ZELIĆ, D. (2017): Utjecaj antena, radara i odašiljača na zdravlje čovjeka. Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti. Završni rad. Dostupno na: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:119:689537>
76. ZIRDUM, L. (2016): Karakteristike i zaštita od neionizirajućeg zračenja. University of Applied Sciences. Veleučilište u Karlovcu. Završni rad.
77. ŽURA ŽAJA, I., M. VILIĆ, I. TOMULIĆ, A. SHEK VUGROVEČKI, K. MALARIĆ, P. TUCAK, I. TLAK GAJGER (2021): Učinak radiofrekvencijskog zračenja na ljude i životinje, s posebnim osvrtom na zajednice medonosne pčele (*Apis mellifera*). Vet. Stanica 52, 347-357.
78. ŽURA ŽAJA, I., M. SAMARDŽIJA, S. VINCE, M. VILIĆ, I. MAJIC-BALIĆ, D. ĐURIČIĆ, S. MILINKOVIĆ TUR (2016): 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.

8. Sažetak

UČINCI RADIOFREKVENCIJSKOG ZRAČENJA NA MUŠKU PLODNOST

Elektromagnetsko zračenje emitira se iz prirodnog okruženja, kao i upotrebom industrijskih i svakodnevnih uređaja za bežičnu komunikaciju, te su na taj način stalno izloženi ljudski i životinjski organizmi. Tijekom posljednjih godina, zbog brzog tehnološkog napretka, elektromagnetsko zračenje iz umjetnih izvora premašilo je vrijednosti zračenje prirodnog podrijetla. Opća zabrinutost zbog sve većeg broja uređaja (mobiteli, prijenosna računala, Wi-Fi-ja i mikrovalnih pećnica), koji koriste radiofrekvencijsko / mikrovalno zračenje opravdana je radi sve brojnijih dokaza o njihovoj štetnosti po živi organizam. Suvremeni uređaji moderne tehnologije emitiraju radiofrekventne elektromagnetske valove malih frekvencija koje ljudsko i životinjsko tijelo apsorbira te može imati potencijalne štetne učinke na mozak, srce, endokrini sustav i reproduktivnu funkciju. Smatra se da je muški reproduktivni sustav jedan od najosjetljivijih tkiva na elektromagnetsko zračenje. Tako primjerice, iz trenutno dostupnih *in vitro* i *in vivo* studija jasno je da radiofrekvencijska elektromagnetska polja imaju štetne učinke na spermatogenezu odnosno kakvoću ejakulata ljudi i životinja (poput broja spermija u ejakulatu, preživljavanje te morfologiju i gibljivost spermija), utječu na stanični metabolizam i endokrini sustav te uzrokuju genotoksičnost, genomsku nestabilnost i oksidativni stres, što može prouzročiti neplodnost. Štetni učinci radiofrekvencijskih elektromagnetskih valova dijele se na toplinske i netoplinske. Većina negativnih bioloških učinaka pripisuje se netoplinskim učincima te se smatra se da su toplinski učinci nastali zračenjem mobitela manje štetni. No, hipertermija skrotuma i povećani oksidativni stres zbog stvaranja prevelike količine reaktivnih kisikovih spojeva u muškom spolnom sustavu mogu biti ključni mehanizmi putem kojih elektromagnetsko zračenje utječe na plodnost muškaraca. Međutim, navedeni su negativni učinci povezani s vremenom korištenja ponajprije mobilnog telefona. Stoga je cilj ovog preglednog diplomskog rada opisati neke od učinaka radiofrekvencijskog elektromagnetskog zračenja na muški spolni sustav.

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

8. Summary

EFFECTS OF RADIO FREQUENCY RADIATION ON MALE FERTILITY

Electromagnetic radiation is emitted from the natural environment, as well as through the use of industrial and everyday devices for wireless communication, and in that way are constantly exposed human and animal organisms. Over the 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), which use radio frequency / microwave radiation is justified due to the increasing number of evidence of their harm to the living organism. Modern devices of modern technology emit radio frequency electromagnetic waves of small frequencies which are then absorbed by the human and animal bodies and can have potential 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 on electromagnetic radiation. For example, it is clear from currently available studies that radio frequency electromagnetic fields have harmful effects on ejaculate quality indicators (such as spermatozoa count in ejaculate and spermatozoa morphology and motility), affect cellular metabolism and endocrine system and cause genotoxicity, genomic instability and oxidative stress, which may cause infertility. The adverse effects of radiofrequency electromagnetic waves are divided into thermal and non-thermal. Most of the negative biological effects are attributed to non-thermal effects and the thermal effects from cell phone radiation are considered to be less harmful. But, scrotum hyperthermia and increased oxidative stress because of the formation of too much reactive oxygen compounds in the male reproductive system can be key mechanisms through which electromagnetic radiation affects male fertility. However, the negative effects associated with the time of use of the mobile phone are listed above all. Therefore, the goal of this graduate thesis is to describe some of the effects of radiofrequency electromagnetic radiation on the male reproductive system.

Keywords: electromagnetic radiofrequency radiation, male reproductive system, ejaculate quality, endocrine systems, oxidative stress

9. ŽIVOTOPIS

Paulina Martinec, rođena 25. listopada, 1995. godine u Zagrebu. Svoje obrazovanje započela sam u osnovnoj školi Ivana Filipovića u Zagrebu. Nakon završenog osnovnoškolskog obrazovanja, nastavila sam svoj put u privatnoj klasičnoj gimnaziji u Zagrebu. Nakon srednje škole upisujem studij veterinarske medicine, nakon redovno završenih 6 godina studija upisujem 2 apsolventske godine kako bi stekla potrebno znanje na klinikama Veterinarskog fakulteta.