

# IZLOŽENOST ELEKTROMAGNETSKIM POLJIMA

---

Čavlović, Katarina

Master's thesis / Specijalistički diplomski stručni

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Karlovac University of Applied Sciences / Veleučilište u Karlovcu**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:235239>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-23**



**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**  
Karlovac University of Applied Sciences

Repository / Repozitorij:

[Repository of Karlovac University of Applied Sciences - Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

Veleučilište u Karlovcu

Odjel Sigurnosti i zaštite

Specijalistički diplomski studij sigurnosti i zaštite

Katarina Čavlović

# **IZLOŽENOST ELEKTROMAGNETSKIM POLJIMA**

DIPLOMSKI RAD

Karlovac, 2024.

Karlovac University of Applied Sciences

Safety and Protection Department

Professional graduate study of Safety and Protection

Katarina Čavlović

# **EXPOSURE TO ELEKTROMAGNETICS FIELDS**

DIPLOMA THESIS

Karlovac, 2024.

Veleučilište u Karlovcu

Odjel Sigurnosti i zaštite

Specijalistički diplomski studij sigurnosti i zaštite

Katarina Čavlović

# **IZLOŽENOST ELEKTROMAGNETSKIM POLJIMA**

DIPLOMSKI RAD

Mentor: dr.sc. Slaven Lulić

Karlovac, 2024.



**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**  
**KARLOVAC UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES**

Trg J.J.Strossmayera 9  
HR-47000, Karlovac, Croatia



Tel. +385 - (0)47 - 843 - 510

Fax. +385 - (0)47 - 843 - 579

**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**

Stručni / specijalistički studij: : Stručni diplomski studij Sigurnost i zaštita

Usmjerenje: Zaštita na radu

Karlovac, 2024. godine

**ZADATAK ZAVRŠNOG RADA**

Student: Katarina Čavlović

Matični broj: 0420423039

Naslov: Izloženost elektromagnetskim poljima.

Opis zadatka: U diplomskom radu bit će djelomično prikazano što se događa kad su ljudi izloženi elektromagnetskim poljima.

Zadatak zadan:

Rok predaje rada:

Predviđeni datum

obrane:

02/2024.

05/2024.

07/2024.

Mentor:

Predsjednik Ispitnog povjerenstva:

dr. sc. Slaven Lulić

Ivan Štedul, v. pred.

## Predgovor

Izrada ovog diplomskog rada predstavlja krunu mog višegodišnjeg studija i rezultat je rada, truda i posvećenosti. Na ovom putu, imala sam podršku i pomoć mnogih ljudi kojima bih želio izraziti svoju iskrenu zahvalnost.

Prije svega, htjela bih se zahvaliti svom mentoru, prof. dr. Slaven Lulić na strpljenju, stručnom vodstvu i neprocjenjivim savjetima koji su me vodili kroz cijeli proces istraživanja i pisanja ovog rada. Njegova stručnost i uvidi bili su od presudne važnosti za završetak ovog rada.

Posebnu zahvalnost dugujem svojoj obitelji, prijateljima i radnim kolegama na njihovoj neizmornoj podršci i razumijevanju tokom cijelog mog obrazovanja. Bez njihove ljubavi i ohrabrenja, ovaj rad ne bi bio moguć.

Katarina Čavlović

## Sažetak

U ovome radu biti će govora o mehanizmima interakcije između elektromagnetskih polja i bioloških sustava, pružajući objašnjenje bioloških učinaka. To može pomoći u određivanju granica ljudske izloženosti elektromagnetskim poljima, prema smjericama, standardima i preporukama. Opisivanje ovih mehanizama i njihovih učinaka je kompleksno, jer uključuje nekoliko znanstvenih disciplina poput fizike, biologije i medicine. Svijest o potencijalnim rizicima i pridržavanje sigurnosnih smjernica ključni su za minimiziranje negativnih učinaka elektromagnetskih polja na zdravlje. Ovaj rad doprinosi boljem razumijevanju ovog kompleksnog pitanja.

Ključne riječi: elektromagnetsko polje, ljudski organizam, biološki učinci

## Summary

This thesis discusses the mechanisms of interaction between electromagnetic fields and biological systems, providing an explanation of biological effects. This understanding can help determine the limits of human exposure to electromagnetic fields according to guidelines, standards, and recommendations. Describing these mechanisms and their effects is complex, as it involves several scientific disciplines such as physics, biology, and medicine. Awareness of potential risks and adherence to safety guidelines are crucial for minimizing the negative effects of electromagnetic fields on health. This thesis contributes to a better understanding of this complex issue.

Keywords: electromagnetic field, human body, biological effects

## Sadržaj

Sadržaj .....	7
1. Uvod.....	7
2. Biofizički mehanizmi.....	8
2.1. Tvar izložena električnom polju .....	10
2.2. Struja .....	10
2.3. Struja pomaka, polarizacija vezanih naboja.....	12
2.4. Struja pomaka i električno polje pomaka .....	15
2.5. Dielektrički gubici .....	15
3. Materijal izložen magnetskom polju .....	19
3.1. Ne magnetska tvar izložena magnetskom polju.....	19
3.2. Magnetska tvar izložena magnetskom polju .....	21
4. Interakcija s biološkim tkivima .....	22
4.1. Električne karakteristike bioloških tkiva.....	22
4.2. Prodiranje polja u biološka tkiva .....	25
4.3. Apsorpcija valova i specifična stopa apsorpcije .....	28
4.4. Spajanje s ljudskim tijelom.....	31
4.5. Spoj s električnim poljem niske frekvencije.....	31
4.6. Spajanje s magnetskim poljem niske frekvencije .....	34
4.7. Spajanje s elektromagnetskim poljem.....	35
5. Zaključak .....	40
6. Literatura .....	41
7. Popis slika .....	42
8. Popis tablica.....	44



## 1. Uvod

Zakoni fizike nalažu da smo, htjeli mi to ili ne, svi izloženi električnim, magnetskim i elektromagnetskim poljima koja nastaju jednostavnom činjenicom korištenja električne energije. Broj elektroničkih uređaja koji zrače takva polja neprestano raste od kraja 19. stoljeća, kada se dogodila prva bežična komunikacija i počelo širenje električne energije.

Ovi uređaji radikalno su promijenili naš način života. Pružaju udobnost, olakšavaju zadatke i nude mogućnosti za medicinsku dijagnostiku i terapiju. Također su duboko promijenili način na koji komuniciramo. Svaka predložena usluga na daljinu mora postojati neovisno. Kako bi se izbjegle smetnje među njima, svaka ima vlastitu frekvenciju, tako da se zračenje proteže kroz cijeli frekvencijski spektar.

Ovaj spektar je ograničen i potpuno reguliran resurs, vlasništvo država koje odobravaju njegovo korištenje. Bit će sve više zauzet 24 sata dnevno. Neće biti slobodnih frekvencija, jer će budući prijenosi dinamički upravljati spektrom zahvaljujući dolasku softverski definiranog radija koji će pružati sve više usluga. To znači veće brzine prijenosa podataka, a time i više zauzetih frekvencija. Osim toga, broj odašiljača i prijemnika nastavit će rasti stalnom brzinom. Uz ono što se danas smatra osnovnim funkcijama (telefonski pozivi, internet i mobilni video, beskontaktna transakcije, daljinsko upravljanje), telefoni će uključivati funkcije Interneta stvari (IoT) i druge koje tek treba izmisliti.

Zabrinutost društva zbog zračenja ponovno se javlja sa svakim tehnološkim napretkom, uključujući bežični telegraf 1930-ih, televiziju 1960-ih i masovnu upotrebu bežičnih telekomunikacija od početka 1990-ih. Rasprava o dalekovodima pojavila se kasno, krajem 1970-ih.

## 2. Biofizički mehanizmi

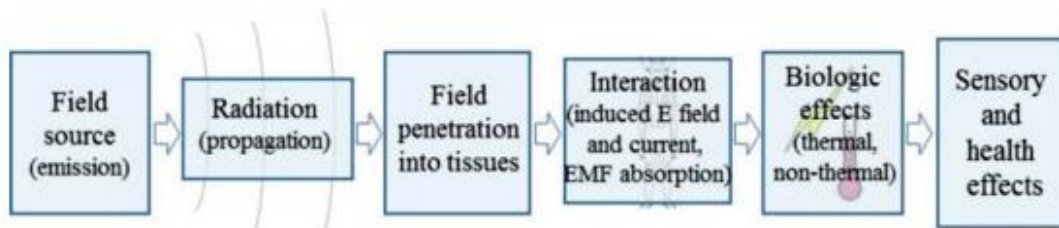
Biofizički mehanizmi objašnjavaju kako elektromagnetska polja (EMF) utječu na biološke sustave. Ovi mehanizmi uključuju nekoliko ključnih procesa:

1. Električne struje i membranski potencijali: Elektromagnetska polja mogu inducirati električne struje u tijelu, posebno u tkivima koja su dobra provodila, poput mišića i živaca. Ove inducirane struje mogu promijeniti membranske potencijale stanica, što može utjecati na signalizaciju i funkcije stanica.
2. Termalni učinci: Apsorpcija energije iz EMF može rezultirati zagrijavanjem tkiva. Ovi termalni učinci su osnova za terapijske primjene, poput diatermije u fizikalnoj terapiji, ali mogu biti štetni ako je zagrijavanje prekomjerno.
3. Ionizacija: Visokofrekventna elektromagnetska polja, kao što su rendgenski zraci i gama zraci, mogu ionizirati molekule, što može dovesti do kemijskih promjena i oštećenja DNK. Ovo može izazvati mutacije, karcinogenezu i druge biološke učinke.
4. Rezonancija i molekularna vibracija: Specifične frekvencije EMF mogu izazvati rezonanciju molekula, što može dovesti do promjena u njihovoj strukturi i funkciji. Na primjer, mikrotalasna zračenja mogu pobuditi vibracije vode i drugih polarnih molekula, što uzrokuje zagrijavanje.
5. Interakcije s radikalima: EMF može utjecati na stvaranje slobodnih radikala u tijelu. Slobodni radikali su vrlo reaktivne molekule koje mogu oštetiti stanice i tkiva te igrati ulogu u procesu starenja i razvoju bolesti poput raka.
6. Elektromagnetska osjetljivost: Neki pojedinci tvrde da su osjetljivi na elektromagnetska polja, doživljavajući simptome poput glavobolja, umora i nesanice. Iako su biofizički mehanizmi iza ove osjetljivosti još uvijek

nedovoljno istraženi i kontroverzni, moguće je da neki ljudi imaju posebnu biološku reakciju na EMF.

Razumijevanje ovih biofizičkih mehanizama ključno je za procjenu rizika i koristi izloženosti elektromagnetskim poljima te za razvoj sigurnosnih standarda i terapijskih primjena.

. Električna, magnetska i elektromagnetska polja razlikuju se jer djeluju prema različitim fizičkim fenomenima na izloženim biološkim tkivima i organizmima.



Slika 2.1. Potpuni proces mehanizama koji mogu dovesti do utjecaja na zdravlje i dobrobit

Slika 2.1. sažima potpuni proces različitih mehanizama. Glavni prepoznati fenomeni opisani su linearnim ponašanjem za frekvencije do 300 GHz. To isključuje interakcije uzrokovane optičkim i ionizirajućim zračenjem i nepovratne učinke.

Materija se sastoji isključivo od električki nabijenih čestica. Elektron je najmanja nabijena čestica, koja je negativna. Atomska jezgra, sastavljena od protona i neutrona, pozitivno je nabijen dio atoma. U svojem prirodnom stanju, tvar je općenito neutralna i miruje jer u atomu imamo jednak broj pozitivnih i negativnih naboja. U stvarnosti, to je istina samo naizgled, jer na mikroskopskoj razini čestice se kreću nasumično u svim smjerovima na vrlo malim udaljenostima pod utjecajem npr. topline. Zbroj tih pokreta iznosi nula. Materijali s mnogo slobodnih naboja nazivaju se vodičima. Oni koji nemaju dovoljno tih naboja nazivaju se dielektrici ili, češće, izolatori. Oni ne mogu provoditi električnu struju. Biološka tkiva imaju oba svojstva, što ih razlikuje od materijala obično korištenih u

elektroinženjerstvu. Kada se primijeni elektromagnetsko polje, tvar je podvrgnuta trima fenomenima:

- interakcijama zbog električnih polja niskih frekvencija;
- interakcijama zbog magnetskih polja niskih frekvencija;
- apsorpciji energije iz elektromagnetskih polja visokih frekvencija.

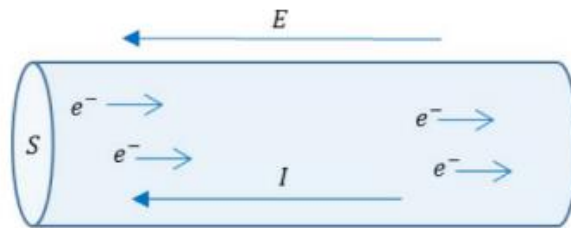
### 2.1. Tvar izložena električnom polju

Električna polja vrše silu na električki nabijene čestice prisutne u tvari. Ta sila (statistički) pomiče slobodne čestice i privlači povezane čestice, iako ih ne može premjestiti izvan atomske razine. Kad ove čestice nisu u ravnoteži, stvaraju vlastito električno i/ili magnetsko polje. Ovaj fenomen je reverzibilan, tj. u odsutnosti bilo kakvog polja, tvar je ponovno u mirnom, neutralnom električnom stanju. Stoga je tvar podložna dva glavna fenomena u prisutnosti električnog polja:

- drift slobodnih naboja, tj. vodljiva struja;
- polarizacija i/ili orijentacija vezanih naboja. Ovaj fenomen stvara struju nazvanu struja pomaka, iako nema pomicanja naboja i dielektričnih gubitaka.

### 2.2. Struja

Primjena električnog polja na medij izvršava silu na nabijene čestice. Pod njezinim djelovanjem, slobodne čestice stalno podvrgnute toplinskoj energiji statistički se kreću (ili driftaju) u smjeru polja, makroskopski stvarajući električnu struju. Ova struja potječe od elektrona u vodičima i od iona u tekućim elektrolitima (otopine molekula razdvojenih u suprotno nabijene ione).



Slika 2.2. Električna struja u provodniku kada se primijeni električno polje

$E$  predstavlja električno polje u vodiču,  $e^-$  označava elektron, a  $I$  je struja (proporcionalna protoku elektrona). Električne količine su vektorske, odnosno orijentirane u prostoru.

Električna vodljivost, označena sa  $\sigma$  (sigma), predstavlja sposobnost medija da omogući određeni broj električnih naboja da se slobodno kreću. Njena jedinica je siemens po metru ( $S \cdot m^{-1}$ ). Što su naboji brojniji i pokretniji, to je vodljivost bolja. Vodljivost metala je visoka: veća od  $10^4$ . Niža je u elektrolitima i gotovo nula u uobičajenim dielektricima ( $<10^{-10}$ ). Primjeri u Tablici 3.1 pokazuju da ova fizikalna veličina ima jedan od najširih raspona pri  $20^\circ C$ .

Tablica 2.2.1. Provodljivost različitih medija

Media	Conductivity ( $S \cdot m^{-1}$ )
Perfect conductor	$\infty$
Silver	$62.5 \times 10^6$
Copper	$58 \times 10^6$
Aluminum	$36 \times 10^6$
Carbon	$25 \times 10^3$
Electrolytes	1 to $10^2$
Biological tissues	$10^{-4}$ to $10^{+2}$
Seawater	5
Drinking water	$10^{-3}$
Semi-conductor	$10^{-4}$ to 1
Distilled water	$10^{-6}$ to $5 \times 10^{-4}$
Glass	$10^{-14}$ to $10^{-10}$
Mineral oil	$10^{-12}$
Air	$5 \times 10^{-15}$
Perfect dielectric	0

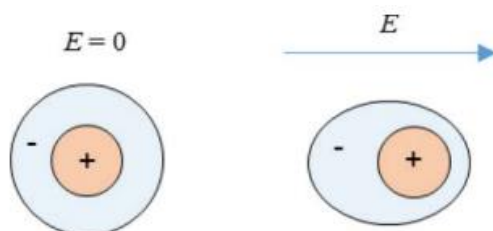
### 2.3. Struja pomaka, polarizacija vezanih naboja

Dielektrični medij ne može, prema definiciji, provoditi struju. Međutim, električna polja prodiru kroz njega i integriraju s vezanim nabojima. Ove interakcije mu daju električna svojstva.

Električni naboji pomaknu se malo dalje od svojeg ravnotežnog položaja kada se primijeni polje. Ovi ograničeni pomaci omogućuju pojavu električnih dipola. Pozitivni naboji kreću se u smjeru polja, a negativni naboji u suprotnom smjeru.

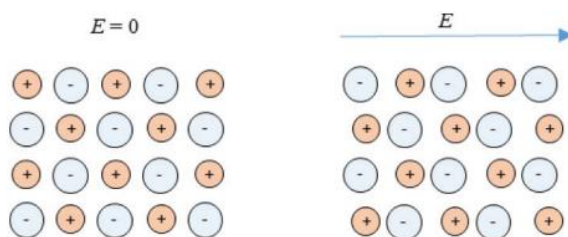
Medij postaje polariziran. Postoje tri glavna mehanizma na mikrorazini polarizacije i jedan makroskopski mehanizam polarizacije:

- Elektronička polarizacija: Pod djelovanjem električnog polja, elektronski oblak atoma postaje izobličen i ne ostaje centriran na svom jezgri (Slika 3.3). Ovaj učinak proizvodi induciranu polarizaciju, jer prestaje kad polje nestane (postoji i atomska polarizacija zbog kretanja jezgara, ali je slaba u usporedbi s elektroničkom polarizacijom).



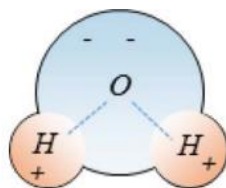
Slika 2.3.1. Prikaz elektroničke polarizacije atoma

– Ionska ili molekulska polarizacija: Ovaj fenomen uzrokovan je relativnim pomacima ionskih naboja različitog predznaka unutar jedne molekule pod djelovanjem vanjskog polja (molekule su vezane jedna za drugu i ne mogu se kretati). Ovo također proizvodi induciranu polarizaciju (Slika 3.4).



Slika 2.3.2. Prikaz ionske polarizacije

– Orijentacijska polarizacija: Ova vrsta polarizacije javlja se u prisutnosti polariziranih molekula. To su molekule koje prirodno imaju pozitivan naboj u centru, odvojen od njihovih negativnih naboja. To je slučaj s ionskim molekulama i asimetrično strukturiranim molekulama koje su sastavljene od različitih i neusmjerenih atoma. Primjer orijentacijske polarizacije je voda, dano na Slici 3.5.



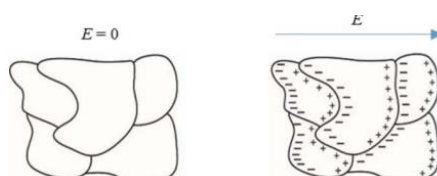
Slika 2.3.3. Voda je sastavljena od polarne molekule (H<sub>2</sub>O)

Sile koje stvara vanjsko električno polje teže usmjeriti ovu vrstu molekula, kao i elektronsku i ionsku polarizaciju. U odsustvu električnog polja, ovi dipoli su usmjereni nasumično, a ukupno rezultirajuće polje je nula (Slika 2.3.4.). Ova polarizacija ne javlja se u čvrstim medijima, gdje molekule ostaju čvrsto vezane.



Slika 2.3.4. Prikaz orijentacijske polarizacije polariziranih molekula

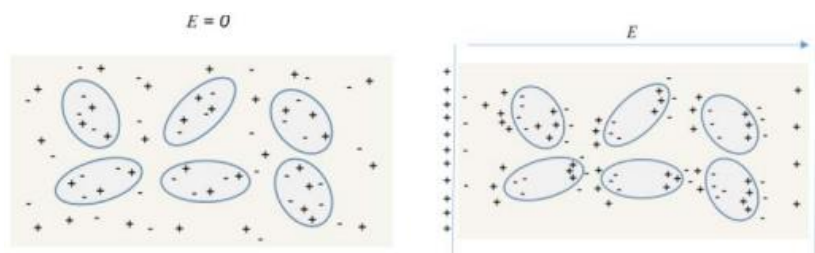
– Makroskopska polarizacija ili polarizacija prostornog naboja: Polarizacijski fenomen javlja se makroskopski u heterogeno strukturiranim medijima s izoliranim vodljivim područjima. Njihovi slobodni naboji migriraju na udaljenosti ograničene na područje kada se primijeni električno polje. Neravnoteža naboja polarizira vodič, inducirajući unutarnje električno polje suprotno vanjskom električnom polju. Ova polarizacija uspostavlja se sporije od prethodno razmatranih jer su udaljenosti koje treba prijeći duže.



Slika 2.3.5. Prikaz makroskopske polarizacije



PRIMJER POLARIZACIJE PROSTORNOG NABOJA. - Kada biološka stanica ili tkivo bude izloženo vanjskom električnom polju, njezini ioni raspoređuju se ispod izolacijske membrane. Polarizirana struktura inducira unutarnje električno mikropolje suprotno vanjskom polju. Ova stanica se ne miče jer je globalno neutralna. Naboji izvan stanice bit će privučeni prema sučeljima od strane zadržanih naboja. Inducirana električna mikro polja na taj način tvore lance kroz cijeli medij.



Slika 2.3.6. Prikaz polarizacije prostornog naboja

Mehanizmi polarizacije ovise o sastavu medija. Na najnižim frekvencijama kombiniraju se kako bi formirali ukupnu polarizaciju. Nestaju jedan za drugim kako frekvencija raste, zbog inercije čestica i viskoznosti medija. Orijentacijska i polarizacija prostornog naboja najznačajniji su mehanizmi do otprilike 20 GHz.

#### 2.4. Struja pomaka i električno polje pomaka

Kretanje naboja na beskonačno malim udaljenostima zajedno s vanjskim izmjeničnim električnim poljem proizvodi makroskopsku struju nazvanu struja pomaka, iako nijedna čestica zapravo ne mijenja položaj. Ova struja postoji samo u prisutnosti vremenski promjenjivog električnog polja. S tom strujom povezano je električno polje pomaka. To je lokalno polje, slabije od vanjskog polja, koje polarizira naboje. Ta polarizacija je proporcionalna električnom polju i nije prisutna ako nema vanjskog polja.

#### 2.5. Dielektrički gubici

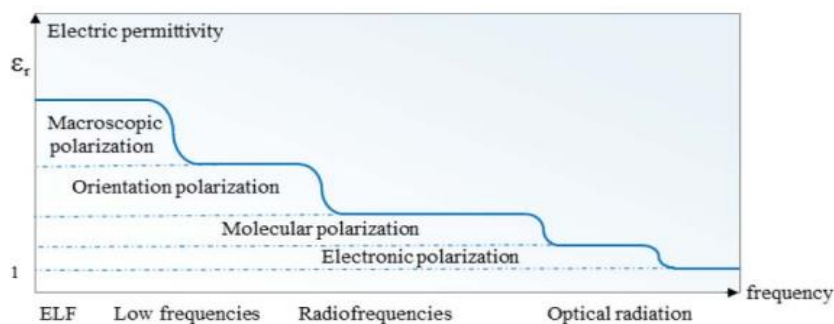
Dielektrični gubici su rezultat učinaka trenja čestica uzrokovanih viskozitetom medija. Vrlo su slabi na relativno niskim frekvencijama i visokim frekvencijama,

područjima gdje polarizacijski fenomeni nestaju. Stoga su dielektrični gubici usmjereni na rezonantnu ili relaksacijsku frekvenciju specifičnu za svaku česticu. Rezultiraju u prigušenju električnog polja koje prodiru kroz medij. Izgubljena energija pretvara se u toplinu.

Dielektrici imaju u sebi nečistoće. Stoga kroz njih također prolazi vrlo slaba struja neovisna o frekvenciji. Ta struja također uzrokuje gubitke koji se dodaju dielektričnim gubicima. Medij se naziva "dielektričnim" ako je struja pomaka znatno veća od vodljive struje. Vodljivost se definira kao "efikasna" ako predstavlja ove gubitke u cijelosti.

Ovi fenomeni objašnjavaju zašto čak i dielektrični materijali imaju električna svojstva. Fizička veličina povezana s dielektričnim svojstvima naziva se dielektrična permitivnost. To je odnos između električnog polja pomaka i električnog polja koje se primjenjuje na medij.

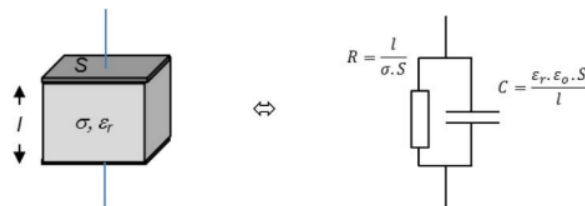
Dielektrična permitivnost mjeri se u faradima po metru ( $F \cdot m^{-1}$ ) i ima simbol  $\epsilon$ . Relativna permitivnost  $\epsilon_r$ , također nazvana dielektrična konstanta materijala, a predstavlja vrijednost normaliziranu prema vakuumu.



Slika 2.5.1. Smanjenje električne permitivnosti s frekvencijom

Čimbenik koji omogućuje kvantifikaciju dielektričnih gubitaka obično je povezan s permitivnošću. To je omjer između efektivne vodljivosti medija (predstavljajući omske gubitke i gubitke zbog trenja) i polarizacije medija. Kako bi se pojednostavila notacija izraza, fenomeni polarizacije i vodljivosti kombinirani su u jedan parametar, kompleksna permitivnost.

Ovaj fenomen može se prikazati primjenom struje na otpornik i kondenzator spojen paralelno (Slika 2.5.2.). Vodljiva struja prolazi kroz otpornik, dok struja pomaka ulazi ili napušta kondenzator. Nema prijenosa naboja kroz potonji, i on postoji samo ako je struja promjenjiva tijekom vremena. To se može ilustrirati parom paralelnih elektroda s površinom  $S$ , razdvojenih uzorcima materijala debljine  $l$ , vodljivosti  $\sigma$  i relativne permitivnosti  $\epsilon_r$ .



Slika 2.5.2. Dielektrični uzorak i ekvivalentno električno kolo sastavljeno od otpornika i kondenzatora spojenih paralelno.

Struja dominira kada frekvencija teži nuli, dok se struja pomaka može povećati pri visokim frekvencijama.

U tablici 2.5.1. sažeta je relativna dielektrična permitivnost nekoliko medija.

Tablica 2.5.1. Relativna permitivnost različitih medija

Medium	Relative permittivity at 20°C (68°F)
Vacuum	1
Mineral oil	2.2
Paper	3–7
Glass	4–7
Ethyl alcohol	24
Water ( $f < 10$ GHz)	78.4

Vakuum je savršen "dielektrik" jer nije podložan pojavi polarizacije. S makroskopskog gledišta, dielektrična permitivnost uključena je u proučavanje propagacije elektromagnetskih valova. Omogućava određivanje koeficijenata odraza i prijenosa između dva medija te karakterizira apsorpcijom uzrokovano prigušenjem valova. Polarizacija medija električnim ili elektromagnetskim poljem rezultira fizičkim skladištenjem energije. Rezultat je smanjenje brzine propagacije ( $v = c/\sqrt{\epsilon_r}$ ) i stoga imamo povećanje valne duljine. U optici i valnoj fizici, ovi učinci su ključni za razumijevanje elektromagnetskih valova u različitim medijima pri propagaciji na određenim frekvencijama, permitivnost omogućuje određivanje indeksa loma.

Tablica 2.5.2. glavne električne karakteristike materijala

Key points of materials		
Conductor	Material with lots of free electric charges	The charges are electrons and/or ions
Electrical conductivity ( $\sigma$ )	Characterizes the mobility and number of free charges in conductors	Links the electric field and the current density through Ohm's law
Dielectric	Material subject to microscopic polarization phenomena, causing displacement currents and losses	Often called insulators
Electrical permittivity ( $\epsilon$ )	Main characteristic of dielectrics	Makes it possible to calculate propagation in media (speed, wavelength, reflection coefficient) and losses through absorption
Magnetic permeability ( $\mu$ )	Relative permeability corresponds to a multiplying magnetic field factor	Magnetic permeability characterizes a material's ability to modify a magnetic field

### 3. Materijal izložen magnetskom polju

Sposobnost materijala da modificira magnetsko polje, odnosno skreće ili pojačava magnetske linije toka, karakterizira se njegovom magnetskom permeabilnošću koju označavamo s  $\mu$ . To se izražava produktom permeabilnosti vakuuma  $\mu_0$  i relativne permeabilnosti  $\mu_r$ . Vrijedi:

$$\mu = \mu_r \cdot \mu_0$$

$\mu_0$  je univerzalna fizikalna konstanta ( $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$ ). Permeabilnost praznog prostora ponekad se naziva magnetskom konstantom.

Permeabilnost fero magnetskih materijala, poput željeza, visoka je ( $\mu_r \sim 10.000$ ) i može biti znatno veća za neke legure. Može ovisiti o frekvenciji i jakosti magnetskog polja.

Magnetna indukcija i jakost magnetskog polja mogu biti povezana kroz permeabilnost.

Materijal se može podijeliti na dvije kategorije: magnetski i ne magnetski. Magnetski materijal sastoji se od magnetskih dipola (osjetljivih na magnetska polja), za razliku od ne magnetskog materijala.

#### 3.1. Ne magnetska tvar izložena magnetskom polju

Magnetsko polje interagira s ne magnetskim materijalom samo ako je vodljiv. Vanjsko magnetsko polje tada inducira električno polje, uzrokujući cirkulaciju električnih struja kroz zatvoreni krug (petlju). To su vrtložne struje, one su veće na rubu izložene površine i nula na njezinom središtu. Vrtložne struje povećavaju temperaturu kroz Jouleov učinak. To je princip indukcijskog grijanja. Ove struje ne postoje u izolacijskim materijalima ( $\sigma \approx 0$ ).

Uzrokovana struja zauzvrat generira magnetsko polje suprotno onom koje ju je stvorilo (Lenzov zakon), kao što vrijedi za sve pokretne električne naboje.

Inducirano polje je niže za nekoliko redova veličine od inducirajućeg polja u slabo vodljivim materijalima.

S mikroskopskog gledišta, jačina induciranog električnog polja je proporcionalna (Faradayev zakon):

- površini materijala izloženog magnetskom polju;
- gustoći magnetskog toka, također nazvanoj magnetska indukcija, produktu permeabilnosti materijala i jakosti magnetskog polja ( $B = \mu \cdot H$ );
- promjeni vremena magnetskog toka ili njegovoj frekvenciji za sinusoidno polje.

Inducirana struja je proporcionalna električnoj vodljivosti materijala. Električno polje doseže svoj maksimum kada je magnetska indukcija okomita na površinu.

Magnetno polje također djeluje silom na električne naboje, pod uvjetom da se naboji gibaju. Sila je proporcionalna je električnom naboju, brzini gibanja i veličini magnetske indukcije  $B$ . Ova sila je okomita na smjer brzine i smjer polja. Vrijedi:

$$\mathbf{F} = q \cdot \mathbf{v} \times \mathbf{B},$$

gdje je sila izražena u newtonima, magnetska indukcija u teslama, naboj u coulombima, a  $v$  je brzina u  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Magnetna indukcija djeluje samo na okomitu komponentu brzine. Sila je najveća kada se naboja kreće okomito na magnetsko polje i nula kada se naboja kreće paralelno s magnetskim poljem. U slučaju da je brzina čestice paralelna magnetskom polju čestica ne osjeća magnetsko polje i nastavlja se gibati kroz njega kao da ga nema, tj. brzina je konstantna.

### 3.2. Magnetska tvar izložena magnetskom polju

Neki mediji su također osjetljivi na magnetska polja jer imaju magnetske dipole. Nastali mehanizmi nisu razmatrani u ovom priručniku jer ne postoje značajno u biološkim tkivima.

Međutim, magnetske biološke mikrostrukture postoje (nastale od magnetosoma). One su prisutne u mnogim živim organizmima, uključujući ljude, ali naše opažanje njih je izgubljeno tijekom evolucije. Magnetosom je membranom obavijena struktura unutar određenih bakterija koja sadrži nanočestice magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) ili greigita ( $\text{Fe}_3\text{S}_4$ ). Ove čestice omogućuju bakterijama da se orijentiraju i kreću duž linija Zemljinog magnetskog polja, proces poznat kao magnetotaksija. Magnetosomi su najčešće pronađeni u magnetotaktičkim bakterijama, koje žive u vodenim sredinama s niskim koncentracijama kisika

## 4. Interakcija s biološkim tkivima

### 4.1. Električne karakteristike bioloških tkiva

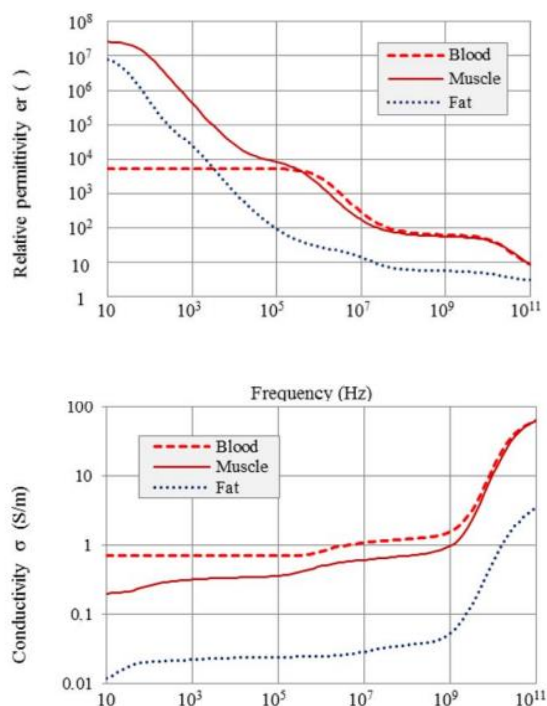
Biološka tkiva su istovremeno vodiči i dielektrici. Sastoje se od slobodnih elektrona i iona koji mogu gibati kao odgovor na primjenu električnog polja. Osim toga, imaju svojstva dielektričnih materijala s mehanizmima polarizacije. Neki ioni mogu biti zarobljeni s obje strane membrane tkiva ili organa, smanjujući količinu naboja koji su sposobni kretati se. Taj fenomen proizvodi polarizaciju prostornog naboja koje su znatno veće od onih koje se događaju na staničnoj razini. Električne karakteristike tkiva objašnjavaju njihovo ponašanje prema vanjskim poljima. Također omogućuju predviđanje jačine induciranih električnih polja i prigušenje elektromagnetskih polja koja se tamo šire. Iako je struktura tkiva složena, ona se može smatrati homogenom s makroskopskog gledišta. Stoga su vodljivost i permitivnost proučavane za svako od njih (ili gotovo svaki). To je olakšalo razvoj parametarskog modela tkiva koji vrijedi u širokom frekvencijskom rasponu. Parametri su vrlo raznoliki, jer prvenstveno ovise o udjelu vode u tkivu, a koji nije ravnomjerno raspoređen u različitim izvan staničnim medijima (tijelo odrasle osobe sadrži 70% vode, koja je glavni sastavni dio većine tkiva). Krv, cerebrospinalna tekućina, pluća i drugi tjelesni tekućine su tkiva s vrlo visokim udjelom vode (>90%). Sastoje se od stanica suspendiranih u tekućem mediju. Stanice i izvan stanični mediji sadrže ione. Mišići i unutarnji organi poput jetre, mozga i bubrega su tkiva s visokim udjelom vode (>80%), dok masno tkivo i kosti pripadaju kategoriji tkiva s niskim udjelom vode (<50%). Kost se sastoji od stanica fiksiranih u čvrstom mediju. Koža je sastavljena od susjednih stanica koje sadrže relativno malo vode.

Slike 4.1.1.(a) i 4.1.1.(b) uspoređuju električne karakteristike krvi (koja ima vrlo visok udio vode), mišića (koji ima visok udio vode) i masnog tkiva (koje ima nizak udio vode) u frekvencijskom području od 10 Hz do 100 GHz.



Električne karakteristike bioloških tkiva jasno se mogu vidjeti na tim krivuljama. Primjećuju se:

- značajne razlike u svojstvima između tkiva;
- značajna varijacija vodljivosti i permitivnosti oko određenih frekvencija. Te varijacije nazivaju se disperzijama;
- permitivnosti opadaju s porastom frekvencije;
- vodljivosti rastu s frekvencijom;
- permitivnosti puno veće od klasičnih materijala, posebno na najnižim frekvencijama;
- vodljivosti između vodiča i izolatora. One ovise o udjelu vode (vodljivost uključuje ohmsku vodljivost i dielektrične gubitke).



Slika 4.1.1. a) Električna vodljivost nekih bioloških tkiva; b) Električna permitivnost nekih bioloških tkiva

Permitivne disperzije objašnjavaju nestanak mehanizama polarizacije s frekvencijom. Tri najznačajnije disperzije mogu se jasno razlikovati u mišićima. Pri niskim frekvencijama ( $f < 100$  kHz), razumijevanje disperzije permitivnosti

tkiva niskih frekvencija ostaje nepotpuno. Ipak, ciklus je dovoljno spor da omogući nakupljanje naboja s obje strane stanične membrane. To je povezano s fenomenom ionske difuzije i polarizacijom velikih membranskih struktura. Kapacitivni učinak koji se proizvodi uzrokuje visoku relativnu permitivnost, premašujući oko 10 milijuna na 100 Hz. Ovaj dominantni fenomen pri niskim frekvencijama ne postoji u krvi, koja je tek blago strukturirano tekuće tkivo. Mnoge frekvencije disperzije mogu se preklapati, tvoreći ukupnu disperziju čiji volumen ovisi o sastavu tkiva. Disperzija u ovom području naziva se  $\alpha$ -disperzija.

Osim toga, budući da stanice ne provode struju pri niskim frekvencijama (njihova membrana djeluje kao izolator), vodljivost tkiva ovisi samo o vodljivosti izvan staničnog medija i volumnoj gustoći stanica. Stoga su tkiva s visokim udjelom tekućeg elektrolita (vode) i niskom gustoćom stanica najbolji vodiči (npr. krv).

Iako je permitivnost visoka, struja pomaka proporcionalno frekvenciji može biti zanemarivo u usporedbi s vodljivom strujom ( $\sigma \gg \omega \epsilon_r \epsilon_0$ ). Vodljiva struja proizlazi isključivo izvan staničnog medija. S prosječnom vodljivošću od gotovo  $0.2 \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$ , tkiva se mogu smatrati dobrim vodičima na ovim frekvencijama u usporedbi s zrakom.

U području radiofrekvencija (RF) od 100 kHz do 100 MHz, vodljivost se poboljšava s frekvencijom, jer struja cirkulira i u staničnom i izvan staničnom mediju, dok kapacitivni učinak koji uvode membrane opada. To također uzrokuje smanjenje permitivnosti. Mehanizmi orijentacijske polarizacije uvijek postoje zbog dipolnih elemenata, uključujući proteine i makromolekule. Disperzija u ovom području naziva se  $\beta$ -disperzija.

Izvan nekoliko GHz, relativna permitivnost tkiva konvergira vrijednosti koja odgovara vodi. To je  $\gamma$ -disperzija. Vidljiva je samo orijentacijska polarizacija molekula vode u tkivima s visokim udjelom vode, jer su ostale molekule previše inertne. Na ovom frekvencijskom području, vodljiva struja je približno jednaka struji pomaka. Tkiva se smatraju dielektricima s visokim gubicima.

Na frekvencijama iznad 20 GHz, mehanizmi orijentacijske polarizacije trnu, omogućujući postupno pojavljivanje ionskih i elektronskih polarizacija. Značajno se povećava vodljivost.

Struktura i sastav bioloških tkiva objašnjavaju disparitet njihovih električnih svojstava i varijacija. U praksi, fizički i fiziološki faktori također utječu na ova svojstva. Primjeri uključuju brzinu hidratacije, fiziološko stanje i, u manjoj mjeri, temperaturu. Strogo govoreći, orijentacija vlaknastih tkiva u odnosu na smjer polja trebala bi se uzeti u obzir (električna svojstva mnogih tkiva su anizotropna, tj. mogu varirati ovisno o smjeru vlakana).

Tablica 4. pokazuje glavna svojstva bioloških tkiva. Možemo zaključiti da interakcije između polja i ljudskog tijela ovise o frekvenciji.

Tablica 4.1.1. Električna svojstva bioloških tkiva

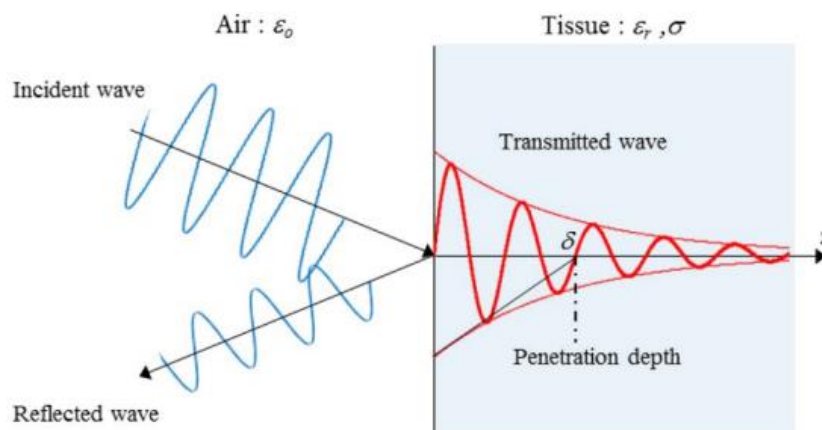
Key points of biological tissues
Biological tissues have different properties to those of the materials used in the domain of electricity or electronics.
They do not have measurable magnetic properties.
Each tissue has its own electrical properties.
Significant differences in properties exist between tissues.
Tissues vary significantly in conductivity and permittivity at certain frequencies.
Tissues are considered good conductors at low frequencies, although their permittivity can be very significant.
Tissues are therefore considered a dielectric loss medium at high frequencies.
From a microscopic point of view, tissues are formed from cells with similar electrical properties. They are therefore distinguished mainly by their extracellular medium.
From a macroscopic point of view, tissues are considered homogeneous, although their composition and structure are complex.
The electrical properties of tissues make it possible to determine how a field or wave penetrates tissues and beyond in a human body.
The electrical properties of tissues are used to precisely model the human body, for research and medical diagnoses or to assess the electromagnetic fields exposure level. This is the domain of numerical dosimetry.

#### 4.2. Prodiranje polja u biološka tkiva

Iako vodljivost i permitivnost omogućavaju karakterizaciju ponašanja tkiva izloženog električnom ili magnetskom polju niske frekvencije, također omogućuju

predviđanje kako će tkiva reagirati na elektromagnetsko polje visoke frekvencije. Kada elektromagnetski upadni val promijeni svoj medij, na sučelju se stvaraju reflektirani val i val koji se lomi.

Slika 4.2.1. ilustrira ovaj fenomen za elektromagnetski ravni val koji se širi zrakom prema ravnim dimenzijama sredstva u odnosu na valnu duljinu.

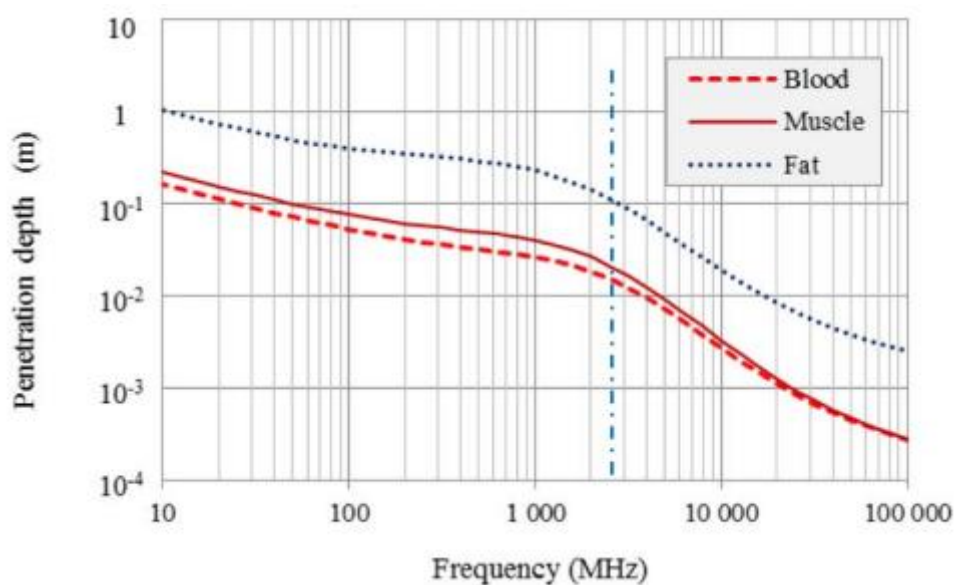


Slika 4.2.1. Prikaz vala koji se širi između dva medija s različitim dielektričnim svojstvima

Razina polja prenesena kroz sredstvo jest razlika između razine incidentnog polja i razine reflektiranog polja. Koeficijent refleksije određen je omjerom između reflektiranog vala i incidentnog vala. Ovaj koeficijent ovisi o kutu incidencije, razlici u električnim svojstvima i polarizaciji vala. Važno je napomenuti da što su karakteristike medija različitije, to je refleksija značajnija, što dovodi do slabijeg prijenosa vala. Na niskim frekvencijama, gdje su biološka tkiva suštinski vodiči, dok je zrak samo dielektričan, električno polje gotovo potpuno reflektira.

Na vrlo visokim frekvencijama, tkiva postaju dielektrična (s gubicima) i reflektiraju više od polovice vala (koeficijent refleksije  $>50\%$ ). To znači da manje od polovice incidentnog vala prodire kroz tkiva (polovica električnog polja odgovara četvrtini snage). Dubina prodora povezana je s vodljivošću i permitivnosti sredstva, kao i s frekvencijom, složenom formulom. Za savršene provodnike, dubina prodora je nula. Za druge materijale, smanjuje se s povećanjem frekvencije. Slika 13 ilustrira tu debljinu za tri prethodno spomenuta tkiva (krv, mišići i masno tkivo). Dubina

prodora zanemariva je na frekvencijama nižim od 10 MHz. Polja koja prodiru kroz tijelo dosežu sva tkiva, jer su vrlo malo prigušena. Masno tkivo apsorbira polja manje od drugih tkiva jer je manje vodljivo. Kombinirani učinak frekvencije i povećanja u vodljivosti uzrokuje brz pad dubine prodora. Njegova prosječna vrijednost je 2 cm pri 3 GHz, a apsorpcija postaje površinska.



Slika 4.2.2. Dubina prodora između 10 MHz i 100 GHz za različita tkiva (vrlo visok, visok i nizak udio vode). Vertikalna isprekidana linija odgovara frekvenciji mikrovalnih pećnica i Wi-Fi-a.

Na niskim frekvencijama, val je snažno reflektiran, ali val koji prodire jedva je prigušen tkivima. Na visokim frekvencijama, refleksija je relativno manja, ali je val koji prodire značajno prigušen. Digitalna simulacija može se koristiti za precizno kvantificiranje fenomena, uzimajući u obzir kompleksne oblike s ograničenim dimenzijama ili nehomogene medije (kao što su ljudska tijela). Ponašanje elektromagnetskog polja na granici između dva medija određeno je kontinuiranim jednadžbama izvedenim iz Maxwellovih jednadžbi. Iz toga se posebno može zaključiti da je električno polje izobličeno u blizini tijela. Ono je praktički okomito na vanjske površine, bez obzira na njegovu početnu orijentaciju. U statičkom stanju, omjer unutarnjeg polja prema vanjskom polju jednak je omjeru vodljivosti

(zrak/tkiva). Također, unutarnje polje je nula jer se vodljivost zraka smatra nulom, a nema fenomena vezanih uz permitivnost. Općenito, niskofrekventno unutarnje električno polje uvijek je niže za nekoliko redova veličine od vanjskog električnog polja. Vodljivost tkiva ih štiti u tom rasponu frekvencija. Kod viših frekvencija, dielektrični fenomeni više ne mogu biti zanemarivi, iako se vodljivost povećava. Valovi prodiru u ljudsko tijelo i tamo se kompleksno šire. Valovi se odbijaju ili prenose, u mjeri koja ovisi o dielektričnoj prirodi, oblicima i orijentacijama tkiva i organa tijela. Višestruki odrazi mogu dovesti do fenomena stajaćih valova (rezonancije) ili fokusiranja valova na ograničeni volumen, što može uzrokovati lokalnu razinu polja veću od prosječne. Samo numerička simulacija korištenjem električno reprezentativnog antropoidnog modela omogućuje određivanje energije koju apsorbiraju različiti dijelovi tijela s dovoljnom preciznošću. Ova metoda također omogućuje uzimanje u obzir nejednakih izvora zračenja. Na frekvencijama većim od nekoliko GHz, prodor valova sveden je na kožna i potkožna tkiva. Procjena apsorpcije elektromagnetskog polja od unutarnjih tkiva zanimljiva je samo za neke specifične primjene.

#### 4.3. Apsorpcija valova i specifična stopa apsorpcije

Fizikalna veličina koja karakterizira apsorpciju elektromagnetskog polja jest specifična stopa apsorpcije (SAR). Pojam stope odnosi se na količinu po jedinici vremena, apsorpcija se odnosi na apsorpciju energije, a izraz "specifična" odnosi se na masu po jedinici mase. SAR se izražava u vatima po kilogramu (W/kg). Točnije, SAR predstavlja varijaciju apsorbirane energije po jedinici mase ili, jednostavnije rečeno, snagu apsorpcije po jedinici mase:

$$SAR = d/dt(dW/dm) = d/dt(dW / \rho_m dv)$$

gdje  $\rho_m$  predstavlja masu volumena u  $kg \cdot m^{-3}$ , a  $W$  je apsorbirana energija.  $dW/dt$  je količina energije po jedinici vremena, odnosno snaga.

Apsorbirana energija pretvara se u toplinsku energiju. Rezultat pretvorbe je povišenje temperature u izloženim tkivima. Izraz za SAR koji ovisi o temperaturi jednostavniji je za konceptualizaciju:

$$\text{SAR} = C \cdot (\Delta T / \Delta t), \text{ gdje je:}$$

C je specifični toplinski kapacitet tkiva, izražena u  $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ . To je količina energije potrebna za podizanje temperature jedinične mase za jedan stupanj;  $\Delta T / \Delta t$  je promjena temperature na početku izlaganja (početni nagib), budući da se SAR mora odrediti bez uzimanja u obzir fenomena kalorijske disipacije.

SAR se također izražava kao funkcija gustoće struje J ( $\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$ ) ili električnog polja E ( $\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$ ) prisutnog u tkivima:

$$\text{SAR} = J^2 / (\sigma \cdot \rho_m) = \sigma \cdot E^2 / \rho_m \quad (\text{W} \cdot \text{kg}^{-1})$$

gdje je:

$\sigma$  je efektivna električna provodljivost tkiva ( $\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$ ), koja predstavlja ohmske i dielektrične gubitke;

$\rho_m$  je gustoća ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ).

Ove veze ukazuju da se SAR može odrediti različitim mjernim metodama (eksperimentalna dozimetrija na reprezentativnom fizičkom modelu).

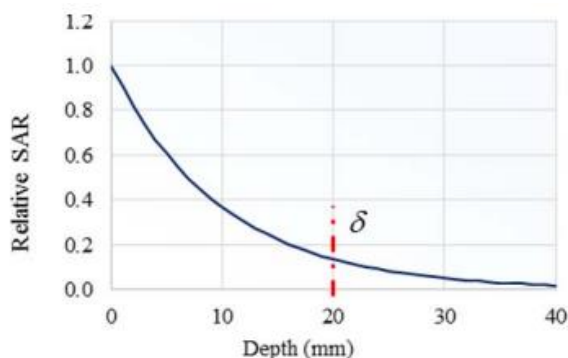
SAR je funkcija jakosti elektromagnetskog polja koje prodire u ljudsko tijelo, kao i dielektričnih svojstava bioloških tkiva. Ovo polje ovisi o konfiguraciji izlaganja (elektromagnetsko okruženje), frekvenciji, polarizaciji i dielektričnim karakteristikama tkiva.

Odnos između smanjenja apsorbirane snage i dubine može se formulirati kao što slijedi s SAR-om:

$$\text{SAR}(z) = \text{SAR}_0 \cdot e^{(-z/\delta)}$$

gdje je:

$SAR(z)$  SAR na dubini  $z$ ,  $SAR_0$  njegova vrijednost na granici ( $z = 0$ ), a  $\delta$  je "dubina prodora" u istoj jedinici kao  $z$ .



Slika 4.3.1. Smanjenje SAR-a kao funkcija dubine od unutarnje površine homogenog medija

Procjena SAR-a je tehnika koja se općenito koristi za provjeru razine izloženosti kada je osoba u blizini izvora visokofrekventnog zračenja (poput mobilnog telefona). Definirani su SAR za cijelo tijelo kao i lokalni SAR-ovi ograničeni na jedan dio tijela.

Tablica 4.3.1. Prodiranje i apsorpcija elektromagnetskih valova od strane tkiva

Key points of wave absorption
At low frequencies, the electric field does not penetrate the human body, or penetrates very little.
A large part of the electromagnetic incident field is reflected by the body due to the conductivity of the tissues.
SAR, expressed in $W \cdot kg^{-1}$ , characterizes energy absorption per unit of mass of a tissue.
SAR can be estimated from temperature elevation, absorbed power, internal electric field and current density.
The penetration depth of the electromagnetic waves in the tissues is reduced when the frequency increases.
SAR is not an appropriate value for very high frequencies ( $> a few GHz$ ), as absorption is considered superficial. Power density (power per surface unit) is the relevant physical quantity.
SAR is not an appropriate physical quantity at low frequencies ( $f < 100 kHz$ ), as the fields do not penetrate the body significantly, and the heating of tissues is therefore neither measurable nor quantifiable.



#### 4.4. Spajanje s ljudskim tijelom

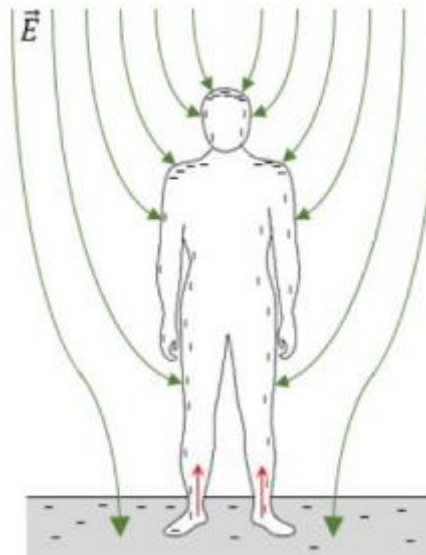
Spajanje je uključeno u mehanizme interakcije između elektromagnetskih polja i tijela izložene osobe. Tri temeljna mehanizma spajanja dobro su utvrđena:

- spajanje s električnim poljem niske frekvencije;
- spajanje s magnetskim poljem niske frekvencije;
- spajanje s elektromagnetskim poljem visoke frekvencije.

Ovi mehanizmi spoja ovise, s jedne strane, o karakteristikama polja (frekvencija, prostorna jednolikost, smjer širenja i polarizacije, itd.), a s druge strane, o tjelesnim karakteristikama osobe, poput držanja, veličine i morfologije.

#### 4.5. Spoj s električnim poljem niske frekvencije

Pri niskim frekvencijama, živi organizmi, uključujući i biljke, izobličuju prostornu distribuciju električnog polja. Slika 15. ilustrira ovaj fenomen oko ljudskog tijela.

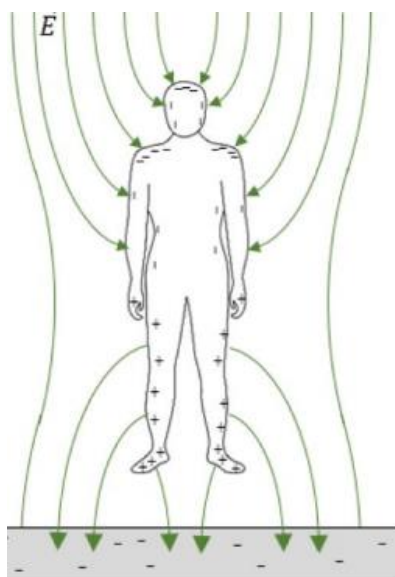


Slika 4.5.1. Tijelo izloženo električnom polju niske frekvencije

Treba primijetiti da su linije električnog polja gotovo okomite na površinu kože, zbog dobre električne provodljivosti bioloških tkiva u usporedbi s zrakom: samo normalna komponenta (okomita) na površini polja ostaje, budući da je tangencijalna komponenta nula za vodiče.

Električni naboji prisutni u organizmu bit će privučeni prema njegovoj površini ili gurnuti kako se vanjsko polje izmjenjuje. Taj fenomen uzrokuje unutarnju električnu struju u smjeru paralelnom s linijama polja. Ona trenutno slijedi varijacije u polju i prestaje kada nova distribucija naboja uravnoteži vanjsko polje (elektrostatička ravnoteža). Nova distribucija naboja kompenzira vanjsko polje i unutarnje električno polje postaje nula.

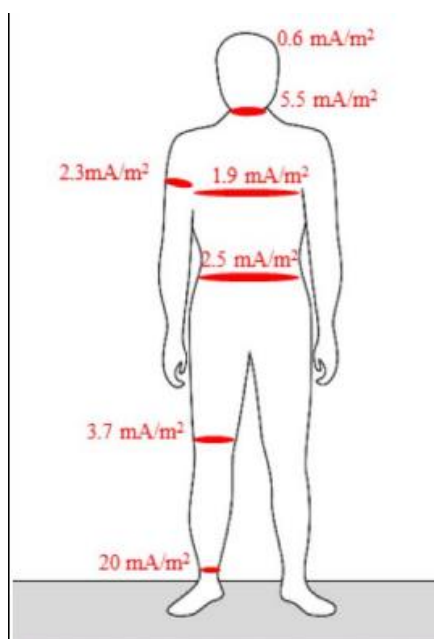
Kada je ljudsko tijelo spojeno na Zemlju ili na masu s dovoljno dostupnih slobodnih naboja, postaje električki nabijeno. Kada je tijelo izolirano, postaje polarizirano putem kapacitivnog spoja. Inducirane struje manje su značajne.



Slika 4.5.2.. Izolirano tijelo izloženo električnom polju

Veličina i položaj tijela imaju veliki utjecaj na polja i struje koje se induciraju. Gustoće struje prisutne u tijelu koje dodiruje tlo i nalazi se u homogenom vertikalnom polju od  $10 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$  pri 60 Hz prikazane su na slici 17. Nakupljanje električnih naboja na površini može lokalno pojačati vanjsko električno polje. Ono

je najveće iznad glave. Ako osoba pomakne ruku prema izvoru polja, polje može doseći vrlo visoke vrijednosti (polja se moraju mjeriti u odsutnosti bilo koje osobe, uključujući osobu koja vrši mjerenje).



Slika 4.5.3. Tijelo izloženo homogenom vertikalnom električnom polju od 10 kV/m pri 60 Hz. Gustoća struje je značajnija kada se poprečni presjek smanji.

Izmjena električnih naboja i njihova distribucija na površini tijela određuju razinu struja. One su raspoređene ovisno o provodnosti bioloških tkiva. Gustoće struja ovise o površini koja se prelazi. Stoga su također značajnije na vratu i gležnjevima, posebno kada je tijelo u dodiru s tlom (Slika 4.5.3.). Interna električna polja mogu se aproksimirati iz prosječne provodnosti tkiva niskih frekvencija,  $\sigma = 0.2 \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$ . Ove količine više nisu relevantne na frekvencijama iznad 10 MHz, gdje postaje dominantna apsorpcija valova. Ukratko, kada je ljudsko tijelo izloženo električnom polju niske frekvencije, zakoni fizike omogućuju zaključke sažete u tablici 6.

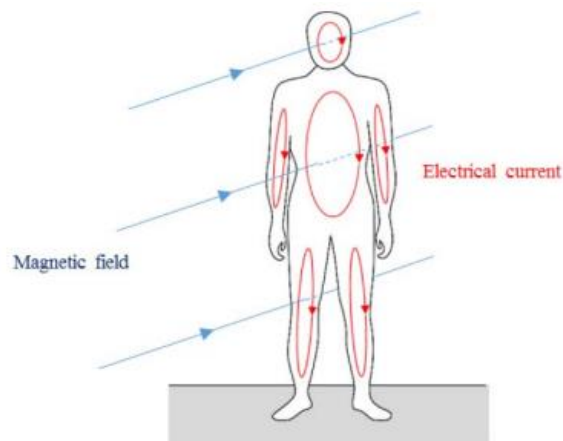
Tablica 4.5.1. Čovječje tijelo izloženo električnim poljima niske frekvencije

Key points of interactions between electric fields and human body
External electric fields attract electric charges to the surface of the body. Electric charges are concentrated more significantly on body parts that have small diameters (e.g. fingers) or that protrude.
The flow of these charges forms an induced current and electric field.
The induced current and electric field are mostly in the direction of the external field.
The current density is higher when the conductive cross-section is small (ankle, knee, neck).
The induced currents and electric fields are more significant when the body is in contact with an electrical ground.
The induced currents and electric fields are more significant when the person is standing in a vertical field.
The induced currents and electric fields depend mainly on the size, shape and position of the person.
The currents resulting from the movement of these charges are distributed in the body in a non-homogeneous way, depending on the conductivity of the tissues and their forms.
The distribution of currents in a body in electrical contact with the ground is determined by the size and shape of the body (including its posture), rather than by the conductivity of the tissues. The induced electric fields can be calculated from the current densities.
The internal electric field is $10^{-4}$ to $10^{-7}$ times less high than the undisturbed external electric field. It is zero for a static field (in a steady state).

#### 4.6. Spajanje s magnetskim poljem niske frekvencije

Prisutnost tijela u magnetskom polju ga ne ometa, za razliku od električnih polja. Budući da je magnetska permabilnost ( $\mu_r$ ) tkiva vrlo bliska 1, kao zrak, unutarnje magnetsko polje u tijelu je praktički identično vanjskom magnetskom polju, i ovo polje nije izobličeno. Magnetska polja induciraju električna polja prema Faradayevom zakonu  $\varepsilon = -d\Phi_B/dt$ .

Električne struje nastaju u petlji koja je okomita na smjer magnetskog polja, budući da se ljudsko tijelo smatra vodičem na niskim frekvencijama. To su vrtložne struje. U prisutnosti homogenog magnetskog polja, unutarnje električno polje i gustoća struje su nula u sredini izloženog područja. Oni preuzimaju sve značajniju vrijednost kako se približavaju rubovima, a najviše vrijednosti imaju u kožnim tkivima i raspoređeni nehomogeno, ovisno o električnoj vodljivosti tkiva. Ove količine nisu relevantne na frekvencijama iznad 10 MHz, jer preuzimaju fenomeni apsorpcije. Slika 18. je pojednostavljena reprezentacija vrtložnih struja u slučaju magnetskog polja koje se vremenski mijenja, čiji su tokovi usmjereni frontalno prema tijelu.



Slika 4.6.1.. Struje izazvane vremenski promjenjivim magnetskim poljem niske frekvencije u ljudskom tijelu (magnetski fluks je okomit na frontalnu ravninu.)

Ukratko, kada je ljudsko tijelo izloženo magnetskim poljima niske frekvencije, zakoni fizike omogućuju zaključke koji su sažeti u tablici 7.

Tablica 4.6.1. Ljudsko tijelo izloženo magnetskim poljima niske frekvencije

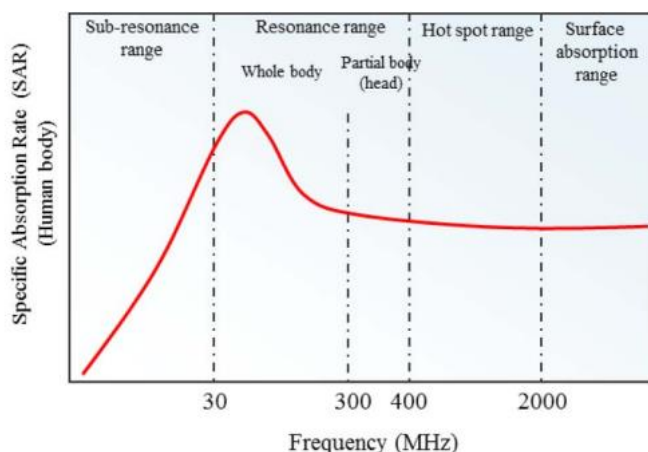
Key points of magnetic fields and human body interactions
Induced electric fields and currents are perpendicular to the magnetic flux axis.
They increase with the size of the person (more significant exposed surface area).
They are more significant for a frontal horizontal flux when the person is standing (the cross-section is larger).
They are less significant when the flux is vertical for a standing person (smaller cross-section).
They are weaker in the limbs, and especially the hands, than in the trunk.
They are more significant on the edges than at the center of the exposed surface area.
They are proportional to the time variation of the induction (magnetic flux density). For a sinusoidal waveform, they therefore increase when the frequency increases.

#### 4.7. Spajanje s elektromagnetskim poljem

Visokofrekventno elektromagnetsko incidentno polje se reflektira, apsorbira ili čak difuzno raspršuje od biološkog organizma, jer posjeduje karakteristike dielektričnih materijala s gubicima. Mehanizam spajanja s elektromagnetskim

poljem uzrokuje apsorpciju energije. Ova apsorpcija je funkcija frekvencije, snage i polarizacije polja. Apsorbirana energija potiče polarizirane čestice (putem mehanizama polarizacije) u tkivima dovoljno da ih pretvori u toplinsku energiju. Ova apsorpcija kvantificira se SAR-om. Blizina tijela izvoru zračenja može promijeniti emitiranu snagu zbog fenomena međusobnog povezivanja: objekt blizu izvora mijenja njegove karakteristike. To obično rezultira smanjenjem emitirane snage (ova blizina ponekad je potrebna za neke primjene, stoga se uzima u obzir prilikom dizajniranja izvora. Njegovo funkcioniranje je optimalno samo u ovoj situaciji).

Slika 4.7.1. prikazuje apsorpciju ovisnu o frekvenciji na gornjem dijelu spektra. Osoba stoji i potpuno je izložena vertikalno polariziranom ravnom polju.



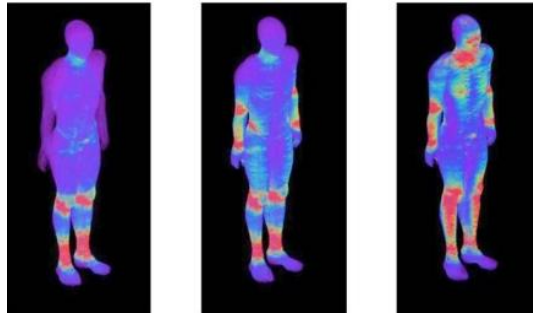
Slika 4.7.1. Apsorpcija elektromagnetskog polja u ovisnosti o frekvenciji

Apsorpcija energije od strane ljudskog tijela diferencira se u skladu s frekvencijom:

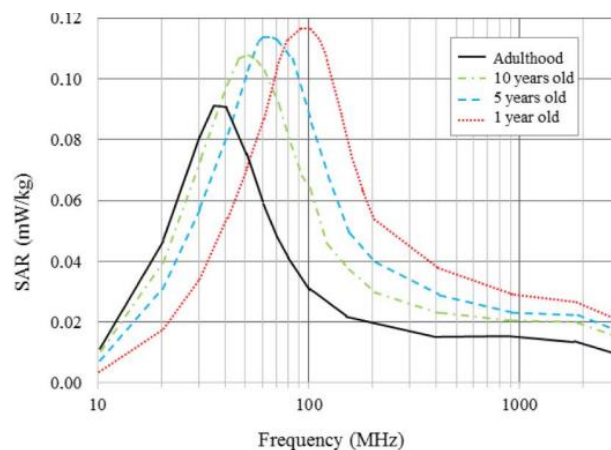
- ispod 100 kHz, apsorpcija je zanemariva i povećanje temperature nije mjerljivo. Inducirana polja i struje su dominantne;
- od 100 kHz do nekoliko MHz, tijelo je provodnije nego dielektrik. Električno polje i inducirana struja uglavnom se stvaraju putem električnog i/ili magnetskog sprežanja, ovisno o vrsti izvora (izvori s dominantnim električnim poljem: HF grijanje; izvori gdje su magnetska polja

dominantna: indukcijsko grijanje; RF antene emitiraju proporcionalno mnogo električnih polja koliko i magnetskih polja kako bi maksimizirale svoje širenje). Apsorpcija se značajno povećava do otprilike 20 MHz. Nejednakost tkiva i mala područja kroz koje su prešle inducirane struje stvaraju gušću apsorpciju u vratu i gležnjevima. Osim toga, struje su koncentrirane zbog smanjene vodljivosti kostiju i hrskavice. Apsorpcija polja postaje homogena u cijelom tijelu kako frekvencija raste;

- između 20 MHz i 300 MHz, apsorpcija je najveća, budući da su frekvencije prilagođene dimenzijama ljudskog tijela (pola valne duljine  $\approx$  veličina tijela). Apsorpcija se događa u cijelom tijelu. Visoka i lokalizirana apsorpcija može se također proizvesti rezoniranjem jednog dijela tijela (frekvencije prilagođene veličini glave, ruku, itd.). Maksimalna frekvencija apsorpcije ovisi o veličini i položaju (pozi) osobe. Kod odrasle osobe koja stoji, ta frekvencija je između 60 i 100 MHz; rezonancija je slaba kada je električno polje horizontalno polarizirano.
- od 300 MHz do 2 GHz, apsorpcija nije uniformna. Ona je lokalizirana ovisno o dielektričkim svojstvima tkiva kao i o dimenzijama tkiva.;
- Iznad 2 GHz, razina apsorpcije ostaje visoka, ali kako frekvencija raste, dubina prodiranja valova značajno se smanjuje. Na frekvencijama iznad nekoliko GHz, apsorpcija se odnosi samo na kožu i potkožno tkivo. Ona je površinska i više nije volumna..



Slika 4.7.2. Distribucija SAR-a za vertikalno polariziranu ravnu valnu na različitim frekvencijama (Dr. R. Findlay, privatna komunikacija).



Slika 4.7.3. Utjecaj veličine tijela na apsorbiranu snagu tijekom izloženosti električnom polju od  $1 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ .

Kada je ljudsko tijelo izloženo elektromagnetskim poljima, zakoni fizike dovode do sljedećih općih opažanja:

- apsorpcija elektromagnetskog polja je značajnija kada je incidentno električno polje paralelno s osi tijela;
- apsorpcija elektromagnetskog polja je slabija kada se polje širi od glave prema nogama (ili obrnuto);
- apsorpcija je maksimalna na rezonantnoj frekvenciji organizma, odnosno kada je pola valne duljine tijela usporediva s njegovom veličinom. Ova frekvencija je veća za manje osobe. Može se približno izračunati relacijom  $f_0 = 114/\text{veličina}$  ( $f_0$  u MHz, a veličina u metrima);



- apsorpcija raste kada je objekt uzak. Osoba koja stoji s rukama u zraku apsorbirat će više elektromagnetskog polja od osobe koja se saginje s prekrštenim rukama. Postoji jaka ovisnost između apsorpcije na frekvencijama nižim od 2 GHz i veličine tijela, njegove držanje i polarizacije vala;
- apsorpcija nije homogena, čak ni u prisutnosti uniformnog polja. Tkiva s visokim udjelom vode (cerebrospinalna tekućina, staklasto tijelo, itd.) apsorbiraju više elektromagnetskih polja od tkiva s niskim udjelom vode (masno tkivo, kosti, itd.);
- dubina prodiranja elektromagnetskih valova u tkivo smanjuje se kada se povećava njegova vodljivost i kada se povećava frekvencija (efekt kože);
- normalna odjeća ima vrlo malen utjecaj na apsorpciju (dobri su dielektrici i stoga relativno neprimjetni elektromagnetskim poljima).

## 5. Zaključak

Elektromagnetska polja mogu biti opasna za zdravlje i sigurnost ako su visokog intenziteta. Štetni učinci su univerzalno priznati već desetljećima, ali mogući učinci na zdravlje nakon dugotrajne izloženosti niskim razinama i dalje su predmet kontroverznih rasprava.

Izloženost elektromagnetskim poljima je kompleksno područje jer su, s jedne strane, relevantne fizikalne veličine apstraktne, a s druge strane, to je multidisciplinarna tema, s obzirom na interakcije s biološkim sustavima.

U svakodnevnom životu, opća populacija je izložena prilično slabim elektromagnetskim poljima. Polja su jača u radnim okruženjima. Elektrokemijski procesi, magnetska indukcija, zavarivanje, distribucija električne energije i telekomunikacije izlažu radnike visokim razinama polja kada su blizu izvora zračenja.

Kako bi se zaštitili radnici i javnost, postavljene su granice. One su postale dio zakonodavstva.

Vrlo malo ljudi zna kako se određuju granice izloženosti, koje mjere opreza treba poduzeti prilikom provođenja mjerenja zračenja, a još manje kako se ta mjerenja i granice trebaju uspoređivati.

Osim toga, zakonodavstvo zahtijeva da poslodavci zaštite svoje zaposlenike od jakih elektromagnetskih polja i da proizvođači proizvode usklađene proizvode koji emitiraju samo ograničenu količinu zračenja ili pružaju ograničenja u upotrebi.

## 6. Literatura

- [1] Staebler, P. (2018). Human Exposure to Electromagnetic Fields: From Extremely Low Frequency (ELF) to Radiofrequency. John Wiley & Sons.
- [2] ARPANSA, Australian Radiation Protection And Nuclear Safety Agency, "Maximum Exposure Levels to Radiofrequency Fields – 3 kHz to 300 GHz", available at: [www.arpana.gov.au](http://www.arpana.gov.au), March 2002.
- [3] BERNHARDT J.H., "The establishment of frequency dependent limits for electric and magnetic fields and evaluation of indirect effects", Radiation and Environmental Biophys., no. 27, pp. 1–27, 1988.
- [4] BMAS-Forschungsbericht FB 400-E, Electromagnetic fields at workplaces, 2011.
- [5] BOLOMEY J.C., GARDIOL F.E., Engineering Applications of the Modulated Scatterer Technique, Artech House, London, 2001.
- [6] Directive 2013/35/EU of the European Parliament and of the Council on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (electromagnetic fields), (20th individual Directive within the meaning of Article 16(1) of Directive 89/391/EEC) and repealing Directive 2004/40/EC, Official Journal of the European Union, no. L 179, p. 21, 2013.
- [7] Council of the European union, Legislative acts and other instruments: Corrigendum/ Rectificatif, subject: see [EC 001], 13359/2/13 REV 2, 17 October 2013.

## 7. Popis slika

Slika 2.1. Potpuni proces mehanizama koji mogu dovesti do utjecaja na zdravlje i dobrobit.....	9
Slika 2.2. Električna struja u provodniku kada se primijeni električno polje .....	11
Slika 2.3.1. Prikaz elektroničke polarizacije atoma .....	13
Slika 2.3.2. Prikaz ionske polarizacije .....	13
Slika 2.3.3. Voda je sastavljena od polarne molekule (H <sub>2</sub> O).....	14
Slika 2.3.4. Prikaz orijentacijske polarizacije polariziranih molekula.....	14
Slika 2.3.5. Prikaz makroskopske polarizacije .....	14
Slika 2.3.6. Prikaz polarizacije prostornog naboja .....	15
Slika 2.5.1. Smanjenje električne permitivnosti s frekvencijom.....	16
Slika 2.5.2. Dielektrični uzorak i ekvivalentno električno kolo sastavljeno od otpornika i kondenzatora spojenih paralelno. ....	17
Slika 4.1.1. a) Električna vodljivost nekih bioloških tkiva; .....	23
Slika 4.1.1. b) Električna permitivnost nekih bioloških tkiva.....	23
Slika 4.2.1. Prikaz vala koji se širi između dva medija s različitim dielektričnim svojstvima.....	26
Slika 4.2.2. Dubina prodora između 10 MHz i 100 GHz za različita tkiva (vrlo visok, visok i nizak udio vode). Vertikalna isprekidana linija odgovara frekvenciji mikrovalnih pećnica i Wi-Fi-a.....	27
Slika 4.3.1. Smanjenje SAR-a kao funkcija dubine od unutarnje površine homogenog medija.....	30
Slika 4.5.1. Tijelo izloženo električnom polju niske frekvencije .....	31
Slika 4.5.2. Izolirano tijelo izloženo električnom polju.....	32
Slika 4.5.3. Tijelo izloženo homogenom vertikalnom električnom polju od 10 kV/m pri 60 Hz. Gustoća struje je značajnija kada se poprečni presjek smanji.	33
Slika 4.6.1. Struje izazvane vremenski promjenjivim magnetskim poljem niske frekvencije u ljudskom tijelu (magnetski fluks je okomit na frontalnu ravninu.) .	36
Slika 4.7.1. Apsorpcija elektromagnetskog polja u ovisnosti o frekvenciji.....	37
Slika 4.7.2. Distribucija SAR-a za vertikalno polariziranu ravnu valnu na različitim frekvencijama (Dr. R. Findlay, privatna komunikacija). ....	39

Slika 4.7.3. Utjecaj veličine tijela na apsorbiranu snagu tijekom izloženosti električnom polju od  $1 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$ ..... 39

## 8. Popis tablica

Tablica 2.2.1. Provodljivost različitih medija .....	12
Tablica 2.5.1. Relativna permitivnost različitih medija.....	18
Tablica 2.5.2. glavne električne karakteristike materijala .....	19
Tablica 4.1.1. a) Električna vodljivost nekih bioloških tkiva; b) Električna permitivnost nekih bioloških tkiva .....	26
Tablica 4.3.1. Prodiranje i apsorpcija elektromagnetskih valova od strane tkiva .....	31
Tablica 4.5.1. Čovječe tijelo izloženo električnim poljima niske frekvencije .....	35
Tablica 4.6.1. Ljudsko tijelo izloženo magnetskim poljima niske frekvencije ....	36