# Fizikalne pojave u primjeni kratkovalne i mikrovalne dijatermije

**Gradinšćak, Ognjen**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2016**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:105:556156

*Rights / Prava:* In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-03-28**

*Repository / Repozitorij:*

Dr Med - University of Zagreb School of Medicine Digital Repository

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
MEDICINSKI FAKULTET

**Ognjen Gradinšćak**

# Fizikalne pojave u primjeni kratkovalne i mikrovalne dijatermije

**DIPLOMSKI RAD**

**Zagreb, 2016.**

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
MEDICINSKI FAKULTET

Ognjen Gradinšćak

# Fizikalne pojave u primjeni kratkovalne i mikrovalne dijatermije

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, 2016.

Ovaj diplomski rad izrađen je na Katedri za fiziku i biofiziku pod vodstvom doc.dr.sc. Sanje Dolanski Babić i predan je na ocjenu u akademskoj godini 2015./2016.

**Sadržaj**

**Sažetak**

**Summary**

1 Uvod....1
2 Povijesni pregled....2
3 Elektroterapija....3
4 Elektrostatika....4
4.1 Električni naboj....4
4.2 Električno polje....6
4.2.1 Homogeno električno polje....7
4.3 Potencijal i napon....7
4.3.1 Napon u homogenom električnom polju....9
4.4 Kapacitet....9
4.4.1 Kapacitet izoliranog vodiča....9
4.4.2 Kondenzatori....10
4.4.3 Pločasti kondenzator....10
4.4.4 Energija pohranjena u kondenzatoru....11
5 Elektromagnetizam....13
5.1 Magnetsko polje....13
5.2 Elektromagnetska indukcija....16
6 Tvari u stalnom električnom polju....17
6.1 Slobodni naboji u električnom polju....17
6.2 Vezani naboji u električnom polju....17
6.3 Polarizacija tvari u električnom polju....18
6.4 Polarizacija u izmjeničnom električnom polju....21
7 Tvari u magnetskom polju....22
8 Elektromagnetski valovi....23
9 Biološki efekti pri primjeni elektromagnetskog zračenja....25
9.1 Tkiva u elektromagnetskom polju....25
9.2 Biološki učinci....25
9.2.1 Elektromagnetsko zračenje iznimno niske frekvencije....25
9.2.2 Radiofrekventno zračenje....26
9.3 Toplinski i netoplinski učinci....26
9.4 Specifična apsorpcijska vrijednost (SAR)....27
10 Kratkovalno i mikrovalno zračenje....29

10.1 Kratkovalna dijatermija ..... 29
10.2 Mikrovalna dijatermija ..... 31
10.3 Primjena kratkovalne i mikrovalne dijatermije ..... 32
10.4 Doziranje kratkovalne i mikrovalne dijatermije ..... 32
10.5 Klinička primjena dijatermije ..... 33
10.5.1 Indikacije za primjenu dijatermije ..... 33
10.5.2 Hipertermija inducirana mikrovalnom dijatermijom u liječenju mišićno- tetivnih ozljeda ..... 34
10.5.2.1 Toplinski učinci ..... 35
10.5.2.2 Netoplinski učinci ..... 35
10.5.2.3 Značajke mišićno- tetivnih ozljeda ..... 35
10.6 Opasnost od kratkovalne i mikrovalne dijatermije ..... 36
10.6.1 Mjere opreza i kontraindikacije ..... 36
10.6.2 Opekline ..... 37
10.6.3 Ostale mjere opreza i kontraindikacije ..... 38
11 Zahvale ..... 40
12 Literatura ..... 41
13 Životopis ..... 42

**Sažetak**

**Fizikalne pojave u primjeni kratkovalne i mikrovalne dijatermije**

**Ognjen Gradinšćak**

Svaki uređaj koji proizvodi električnu energiju stvara električno i magnetsko polje. Ovisno o kemijskom sastavu tkiva ovisi je li će tkivo apsorbirati više energije električnog ili magnetskog polja. Masno tkivo je izolator i zbog toga daje jaki otpor prolasku električne struje, te će zbog toga doći do porasta temperature u tkivu. S druge strane, masno tkivo je propusnije magnetskom polju. Ukoliko se tkiva koja sadržavaju puno elektrolita izlože visokofrekventnom magnetskom polju, dolazi do vibriranja molekula tkiva, što dovodi do zagrijavanja tkiva. Dakle, apsorpcija energije električnog i magnetskog polja dovodi do povišenja temperature tkiva, što pak uzrokuje poboljšanje cirkulacije, opuštanje mišića i ublažavanje boli. Također, ubrzava se metabolizam, kao difuzija iona kroz staničnu membranu.

Uređaji za kratkovalnu dijatermiju koriste dvije ploče kondenzatora, koje se stavljaju s obje strane dijela tijela koje se liječi. Alternativno, mogu se koristiti i indukcijske zavojnice. Elektromagnetski valovi, prolazeći kroz tkivo, dovode do zagrijavanja. Stupanj zagrijavanja i dubina penetracije ovise o fizikalnim svojstvima tkiva.

Smatra se da je mikrovalna dijatermija najlakša za uporabu. Fiziološki učinci su slični kao kod kratkovalne dijatermije, ali mikrovalovi imaju malu dubinu prodiranja u tkivo. Mikrovalovi mogu uzrokovati hipertermiju u tkivu, koja posljedično dovodi do porasta temperature tkiva na vrijednosti između 41 °C i 45 °C, što pak ublažava bol.

**Ključne riječi:** električno polje, magnetsko polje, elektromagnetski valovi, temperatura, dijatermija, hipertermija, bol

**Summary**

**Physical phenomena in the application of short- wave and microwave diathermy**

**Ognjen Gradinšćak**

Each device that produces electric current produces both electric and magnetic field. Tissues will absorb more energy of electric or magnetic field, depending on chemical composition of tissue. Adipose tissue is an insulator and because of that it resists to electric current. This resistance will cause temperature rise of tissue. Adipose tissue offers no resistance to the magnetic field. If tissues, which contain many electrolytes, are subjected to the high-frequency magnetic field, it causes molecules in tissue to vibrate and produce heat. Consequently, absorption of the electric and magnetic field leads to increased temperature of the tissue, which leads to the increased blood circulation, muscle relaxation and pain relief. It also speeds up metabolism and the rate of ion diffusion across cellular membranes.

Short wave diathermy machines use two condenser plates that are placed on either side of the body part to be treated. Another mode of application is by induction coils. When electromagnetic waves travel through the body tissues, they are converted into heat. The degree of heat and depth of penetration depend in part on the absorptive and resistance properties of the tissues.

Microwave diathermy is considered to be the easiest to use. Physical effects are similar as those in short wave diathermy, but the microwaves have a relatively poor depth of penetration. Microwaves can cause hyperthermia in tissues. Hyperthermia induced by microwave diathermy raises the temperature of deep tissues from 41 °C to 45 °C, which produces short- term pain relief.

**Keywords:** electric field, magnetic field, electromagnetic waves, temperature, diathermy, hyperthermia, pain

# 1 Uvod

Dijatermija je terapijski postupak kod kojeg se koristi elektromagnetsko zračenje za induciranje topline u ljudskome tijelu. Jednostavnije se može reći da je dijatermija terapijska metoda kojom se, lokaliziranim grijanjem tkiva, ublažavaju bolovi. Dijatermija se uglavnom primjenjuje u fizikalnoj medicini za zagrijavanje tkiva. Neke od indikacija za primjenu su: iščašenja i uganuća, ozljede mišića i tetiva, kronični reumatoidni artritis, tenosinovitis, burzitis i sinovitis. Postoje dva oblika dijatermije: terapijska i kirurška. Terapijska dijatermija se primjenjuje za zagrijavanje tkiva, a kirurška se primjenjuje za uništavanje neoplazmi, inficiranog tkiva i za kauterizaciju krvnih žila radi sprječavanja pretjeranog krvarenja.

# 2 Povijesni pregled

Primjena električne energije u terapijske svrhe vezana je uz otkriće elektriciteta. Razvojem znanosti razvijale su se razne metode primjene elektriciteta u terapijske svrhe. 1646. godine, liječnik sir Thomas Browne prvi je u literaturi upotrijebio riječ elektricitet. 1780. godine razvijeni su uređaji za proizvodnju statičkog elektriciteta, a 1786. godine liječnik Luigi Galvani započinje istraživanje u kojem je, statičkim elektricitetom, podraživao mišiće i živce. Naime, Galvani je izveo pokus sa žabljim krakovima. Ishijadični živac je stavio između dvije ploče (bakar i cink), stražnji ekstremitet žabe se kontrahirao. 1894. godine Nikola Tesla je otkrio visokofrekventne struje, a 1899. godine otkriva da visokofrekventna struja može ubiti mikobakterij tuberkuloze, pa je na temelju svog otkrića i predložio liječenje tuberkuloze spomenutom metodom. Francuski liječnik d`Arsonval je, 1892. godine, prvi upotrijebio te struje u terapijske svrhe. Svojim istraživanjem je dokazao da se živi mišić ne kontrahira ako je izložen visokofrekventnoj struji (više od 10 kHz). Između 1900. godine i 1910. godine, Zeynek i Nagelschnidt (Njemačka) i F. de Krafta (New York) otkrivaju dijatermiju. Schereschewsky i Whitney (SAD) i Schliephake (Njemačka) razvijaju kratkovalnu dijatermiju. Sir A. Tisdala (Engleska) razvija magnetotronsku cijev, a na temelju njegovih radova se razvila mikrovalna dijatermija. (Ivo Jajić i suradnici, 2000) Nakon drugog svjetskog rata ubrzano se razvija mikrovalna tehnologija. Ubrzo se te nove spoznaje počinju primjenjivati u istraživanjima dielektričnih svojstava bioloških tkiva. Kasnih 1940.- ih više istraživača istražuje dielektrična svojstva bioloških tkiva pri primjeni mikrovalnog zračenja. (Charles Polk & Elliot Postow, 1996)

# 3 Elektroterapija

Elektroterapija označava primjenu električne struje u terapijske svrhe. Dva su oblika elektroterapije: 1. direktna elektroterapija, kod koje se koristi električna struja u terapijske svrhe - galvanizacija, impulsna galvanizacija, dijadinamičke struje, ultrapodražajne struje i interferentne struje. 2. indirektna elektroterapija, kod koje se električna energija pretvara u drugi oblik energije, koji se potom koristi u terapijske svrhe. Podjela struja u elektroterapiji prema frekvenciji:

1. Istosmjerna ili galvanska struja

2. Dijadinamičke ili modulirajuće struje frekvencije 50-100 Hz (niskofrekventne struje)

3. Ultrapodražajne struje frekvencije 140 Hz (niskofrekventne struje)

4. Interferentne ili endogene struje frekvencije 4000 Hz (srednjofrekventne struje)

5. Visokofrekventne struje frekvencije od 0,5 do 4000 MHz čija energija se u organizmu pretvaraju u toplinu

6. Elektrostimulacija, koja se koristi za izazivanje mišićne kontrakcije i uklanjanje boli, a čini ju struja različitih impulsa (vremena propuštanja)

7. Elektromagnetska, kod koje elektromagnetski valovi izazivaju biološki učinak.

(Ivo Jajić i suradnici, 2000)

# 4 Elektrostatika

## 4.1 Električni naboj

Električni naboj je glavno svojstvo osnovnih gradivnih jedinica atoma: protona i elektrona. Osnovno svojstvo električnih naboja je da su ili pozitivni ili negativni. Električni naboji istog predznaka se međusobno odbijaju, dok se naboji različitog predznaka međusobno privlače. Daljnja svojstva električnih naboja su:

1. očuvanost naboja

2. sila između naboja je proporcionalna njihovom umnošku, a obrnuto proporcionalna kvadratu njihove udaljenosti

3. električni naboj je kvantiziran.

(Michael E. Browne, 1999)

Naboj je očuvan i to se iskazuje zakonom o očuvanju naboja:

Ukupni električni naboj zatvorenog sustava ostaje stalan bez obzira na to kakva se električna međudjelovanja događaju unutar sustava.

(Nada Brković & Planinka Pećina, 2010)

Električni naboji elektrona i protona najmanje su količine elektriciteta koje postoje u prirodi i zato se zovu elementarni električni naboji. (Šporer& Kuntarić, 1995)

*e* označava osnovnu količinu naboja (elementarni naboj), gdje je $e = 1.6 \cdot 10^{-19}\ C$. Jedinica električnog naboja je coulomb (*C*). (Michael E. Browne, 1999) Kulon je izvedena jedinica i jednak je produktu ampera i sekunde: *C*= *As*.(Nada Brković & Planinka Pećina, 2010) Naboj na elektronu iznosi –*e*, a na protonu +*e*. Vodiči su tvari u kojima se električni naboji mogu slobodno gibati i u kojima se nalaze slobodni naboji. Dobri vodiči su metali, ionizirani plinovi, tekućine u kojima se nalaze ioni, kao što je npr. krv. S druge strane, izolatori su tvari u kojima se električni naboji ne mogu slobodno gibati, kao što su primjerice vakuum, destilirana voda, guma. Postoje i poluvodiči, a to su tvari koje imaju svojstva i vodiča i izolatora, kao npr. silikon. (Michael E. Browne, 1999) Budući su tvari sastavljene od atoma, naboj svakog tijela jednak je cjelobrojnom višekratniku elementarnog naboja $e$. Označimo li naboj tijela $Q$, tada će za svako tijelo vrijediti:

$$Q = (N_p - N_e)e$$

pri čemu su $N_p$ i $N_e$ broj protona i elektrona koje tijelo sadrži. Broj $N$ pripada skupu prirodnih brojeva, pa je općenito $N$ = 1, 2, 3, . . . .

Ako je $N_p = N_e$ tada je tijelo električki neutralno, pa je naboj tijela $Q = 0$ .
Ako je $N_p > N_e$ tada je tijelo pozitivno nabijeno, pa je naboj tijela $Q > 0$ .
Ako je $N_p < N_e$ tada je tijelo negativno nabijeno, pa je naboj tijela $Q < 0$ .

Elektriziranje je proces kojim se u (na) tijelu stvara višak naboja jednog predznaka. Primjeri takvih procesa su: trenje, dodir i elektrostatska indukcija. U tim procesima dolazi do prijelaza elektrona s jednog tijela na drugo, pa jedno tijelo postaje negativno a drugo pozitivno.
Slobodni naboji su naboji koji nisu vezani za atome i mogu se pomicati djelovanjem električnog polja. U metalima su to elektroni koji čine tzv. elektronski plin, a potječu iz vanjskih elektronskih ljuski atoma. Kod elektrolita su to pozitivni i negativni ioni. Kod razrijeđenih plinova ioni i elektroni, a kod poluvodiča elektroni ili šupljine.
Vezani naboji su vezani za atome tvari koji se ne mogu kretati djelovanjem električnog polja. (Nada Brković & Planinka Pećina, 2010)

Pod točkastim nabojima podrazumijevamo naboje čije dimenzije možemo zanemariti prema njihovim međusobnim udaljenostima. Sila ($F$) između dva točkasta naboja u vakuumu, $Q_1$ i $Q_2$, koji se nalaze na udaljenosti $r$ je opisana Coulombovim zakonom, koji glasi:

$$F = k\frac{Q_1 Q_2}{r^2} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Q_1 Q_2}{r^2}$$

gdje su

$$k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} = 8{,}99 \cdot 10^9 \frac{Nm^2}{C^2} \cong 9 \cdot 10^9\ Nm^2/C^2$$

$$\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-11} C^2/Nm^2$$

$\varepsilon_0$ je permitivnost vakuuma.

(Michael E. Browne, 1999)

Permitivnost sredstva može se napisati kao $\varepsilon = \varepsilon_0\varepsilon_r$, gdje je $\varepsilon_r$ relativna permitivnost koja pokazuje koliko je puta sila između nabijenih tijela u sredstvu manja od one u vakuumu. (Brnjas- Kraljević & Krilov, 2009)

Ako se između točkastih naboja nalazi neko sredstvo relativne permitivnosti $\varepsilon_r$, Coulombov zakon glasi:

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon_r}\frac{Q_1 Q_2}{r^2}$$

(Šporer& Kuntarić, 1995)

Sila između dva naboja je usmjerena duž linije koja ih spaja. Kada su prisutna više od dva naboja, tada se rezultantna sila opisuje kao vektor, koji je zbroj vektora sila koje djeluju između pojedinih naboja.

(Michael E. Browne, 1999)

## 4.2 Električno polje

Polje se može definirati kao prostor u kojem djeluje sila. Polje je određeno tako da je svakoj točki prostora pridijeljena određena vrijednost nekog fizikalnog parametra. Polje može biti skalarno ili vektorsko. Skalarna polja se prikazuju karakterističnim plohama, koje čine skupovi točaka s jednakim vrijednostima parametra. Vektorska polja se prikazuju silnicama. Možemo ih shvatiti kao putanju slobodne čestice u polju sila. Smjer vektorskog polja u nekoj točki je smjer tangente na silnicu u toj točki. (Brnjas- Kraljević & Krilov, 2009)

Svaki električni naboj je okružen električnim poljem. Električno polje se može opisati kao polje sila, koje se prikazuje zamišljenim silnicama. Električno polje je vektorsko polje, što znači da u svakoj točki u prostoru ima određenu jačinu i smjer. Ako je u prostoru prisutno više električnih naboja, ukupno električno polje se opisuje kao zbroj vektora svih pojedinih električnih polja svih električnih naboja u prostoru. Dosljedno tome, električno polje se može definirati kao:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$$

Gdje je $F$ sila koja djeluje na probni naboj $q$, koji se nalazi u određenoj točki u prostru. Jakost električnog polja ($E$) u nekoj točki jednaka je sili kojom to polje djeluje na jedinični pozitivni naboj. (Michael E. Browne, 1999)

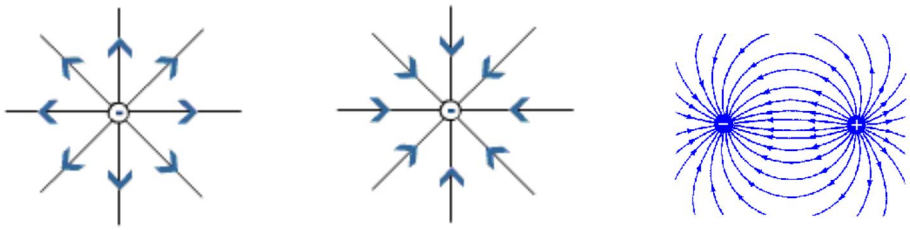
Probni naboj *q* je točkasti pozitivni električni naboj tako malen da njegovo električno polje ne mijenja vanjsko polje, niti uzrokuje promjene u prostornom razmještanju naboja koji su izvor vanjskog polja. Jakost električnog polja iskazuje se jedinicom njutn po kulonu tj. N/C ili volt po metru (V/m). Te jedinice su ekvivalentne tj. vrijedi: N/C = V/m.

(Nada Brković & Planinka Pećina, 2010)

Električno polje točkastog naboja $Q$ može se prikazati:

$$E = k\frac{Q}{r^2} \qquad \text{ili} \qquad E = \frac{1}{4\pi\varepsilon}\frac{Q}{r^2}$$

(Nada Brković & Planinka Pećina, 2010)



**Slika 1. Silnice električnog polja kuglastog nabijenog tijela ili točkastog naboja**
**a)** pozitivno nabijeno tijelo je izvor polja **b)** negativno nabijeno tijelo je ponor polja. Električno polje točkastog naboja je radijalno simetrično. **c)** električno polje dipola.

**Prema:** (Brnjas- Kraljević & Krilov, 2009, str. 66)

Silnice su prikaz električnog polja, ali ne postoje. Silnice su usmjerene od pozitivnog prema negativnom naboju, što znači da su pozitivni naboji izvori električnog polja, a negativni naboji su ponori električnog polja. Silnice počinju i završavaju na naboju, nigdje se ne sijeku, a tangente u svakoj točki silnice podudaraju se sa smjerom električnog polja u toj točki. Smjer silnica određuje i smjer električnog polja. (Šporer& Kuntarić, 1995)

Povećanjem udaljenosti između naboja povećava se razmak između silnica, a time se smanjuju gustoća i jakost polja.

(Michael E. Browne, 1999)

### 4.2.1 Homogeno električno polje

Ako u svakoj točki prostora na probni naboj djeluje sila jednake jakosti i smjera dobivamo homogeno električno polje. Takva se polja primjerice pojavljuju između dviju usporednih metalnih ploča nabijenih jednakim količinama naboja suprotna predznaka. Silnice kojima prikazujemo polje su usporedne i jednako razmaknute. (Nada Brković & Planinka Pećina, 2010)

## 4.3 Potencijal i napon

Potencijal $\varphi$ jednak je radu $W$ koji je potrebno obaviti da se probni naboj $q$ iz beskonačnosti, gdje je sila jednaka nuli, dovede u neku točku električnog polja:

$$\varphi = \frac{W_{\infty \to r}}{q}$$

Potencijal iskazujemo jedinicom volt (1V = 1 J/C) .

Napon *U* između dviju točaka električnog polja je jednak radu koji je potrebno obaviti da se probni naboj *q* dovede iz jedne točke (koordinate $r_1$ ) električnog polja u drugu (koordinate $r_2$ ):

$$U = \frac{W_{r_1 \to r_2}}{q}$$

Napon *U* možemo iskazati kao razliku potencijala: $U = \varphi_1 - \varphi_2$. Napon također mjerimo jedinicom volt.

Potencijal točkastog naboja $Q$ jednak je:

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\varepsilon}\frac{Q}{r} \qquad \text{ili} \qquad \varphi = k\frac{Q}{r}$$

gdje je $k = \frac{1}{4\pi\varepsilon}$.

Iz definicijske jednadžbe za napon možemo izračunati rad *W* koji je potrebno uložiti da naboj *q* premjestimo iz točke *A* u točku *B* u električnom polju točkastog naboja $Q$:

$$W = kQq\left(\frac{1}{r_a} - \frac{1}{r_b}\right)$$

Budući da se rad može prikazati kao razlika električnih potencijalnih energija

$$\Delta E_p = -W$$

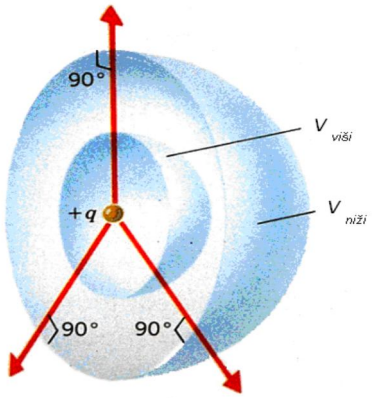
slijedi da je električni napon $U$ između dviju točaka električnog polja jednak:

$$U = \frac{\Delta E_p}{q}$$

(Nada Brković & Planinka Pećina, 2010)

Skup svih točaka u električnom polju koje imaju jednaki potencijal tvori ekvipotencijalnu plohu. Raspodjela ekvipotencijalnih ploha je zorni skalarni prikaz električnog polja. Plohe su okomite na silnice polja. Naboj se po ekvipotencijalnoj plohi pomiče bez utroška energije, a za prijelaz naboja s jedne na drugu ekvipotencijalnu plohu potreban je rad jednak razlici potencijalnih energija naboja na tim plohama. Rad uložen za prijelaz jediničnog pozitivnog naboja s plohe potencijala $\varphi(A)$ na plohu potencijala $\varphi(B)$ je napon izmenu točaka A i B.

$$\frac{W_{AB}}{Q} = \frac{E_{pot}(A) - E_{pot}(B)}{Q} = \varphi_A - \varphi_B = U_{AB}$$




**Slika 2. Ekvipotencijalne plohe** izoliranog točkastog naboja su koncentrične kugline plohe. Radijalne silnice su okomite na plohe. Budući da je rad po putanji okomitoj na silu jednak nuli, pomicanjem naboja po ekvipotencijalnoj plohi ne izvodi se rad.
**Prema:** (Brnjas- Kraljević & Krilov, 2009, str. 68)

### 4.3.1 Napon u homogenom električnom polju

Na naboj $+q$ djeluje homogeno električno polje jakosti *E* stalnom silom $F = qE$ . Naboj premještamo iz jedne točke u drugu točku homogenog električnog polja. Pritom vanjska sila $F_{vanjska} = -qE$ obavlja rad. Promjena električne potencijalne energije jednaka je radu vanjskih sila:

$$\Delta E_{pot} = -W = -(-F)d = qEd$$

Budući da je $U = \frac{\Delta E_p}{q}$ dobivamo: $U = \frac{qEd}{q}$, iz čega slijedi:

$$U = Ed$$

Jakost električnog polja je tada $E = \frac{U}{d}$, pa se iskazuje jedinicom $V/m$.
(Nada Brković & Planinka Pećina, 2010)

## 4.4 Kapacitet

### 4.4.1 Kapacitet izoliranog vodiča

Ako izoliranom vodiču dovodimo naboj, njegov električni potencijal raste. Što više naboja dovedemo vodiču, potencijal mu više raste. Dakle, naboj i potencijal svakog izoliranog vodiča međusobno su proporcionalni. Iz navedenog slijedi:

$$Q = C \cdot \varphi$$

Odnosno

$$C = \frac{Q}{\varphi}$$

Gdje je $Q$ naboj, $\varphi$ je potencijal, a $C$ je kapacitet izoliranog vodiča. Dakle, kapacitet vodiča je omjer njegovog naboja i potencijala. Kapacitet vodiča je to veći što se za isti porast potencijala mora vodiču dovesti veća količina naboja. Prema SI sustavu jedinica kapaciteta je *farad* $(F)$. Vrijedi:

$$farad\ (F) = \frac{kulon\ (C)}{volt\ (V)}$$

(Nikola Cindro, 1988)

### 4.4.2 Kondenzatori

Potencijal nabijenog vodiča nije određen samo njegovim vlastitim nabojem, nego i djelovanjem naboja vodiča na okolinu. Na potencijal takvog vodiča će djelovati veličina i predznak naboja na okolnim vodičima, te raspored tih vodiča. (Nikola Cindro, 1988)

Dva vodiča nabijena količinama naboja suprotnih predznaka, a razdvojena izolatorom (dielektrikom) ili vakuumom nazivamo kondenzatorima. (Nada Brković & Planinka Pećina, 2010)

Kondenzator je uređaj koji može uz određeni napon primiti veliku količinu električnih naboja, tj. ima veliki kapacitet. (Šporer& Kuntarić, 1995)

Glavno svojstvo kondenzatora je omogućavanje skladištenja relativno velikih količina naboja uz male razlike potencijala. Kapacitet kondenzatora se može definirati kao omjer naboja na pojedinom vodiču i razlike potencijala između vodiča. (Nikola Cindro, 1988)

$$C = \frac{Q}{U}$$

$Q =$ naboj na jednom od vodiča. (Šporer& Kuntarić, 1995)

$U = \varphi_1 - \varphi_2$ je razlika potencijala (napon) među vodičima. (Šporer& Kuntarić, 1995)

Mjerna jedinica za kapacitet je farad $(F)$. (Nada Brković & Planinka Pećina, 2010)

Za kapacitet kondenzatora kažemo da je jedan farad ako potencijalna razlika od jednog volta prenese količinu naboja od jednog kulona s jedne obloge na drugu. (Nikola Cindro, 1988)

### 4.4.3 Pločasti kondenzator

Izolirani vodiči pločastog kondenzatora su dvije jednake paralelne ploče, udaljene za neki razmak *d*, koji je malen u usporedbi s linearnim dimenzijama ploča. Ako pretpostavimo da je

između ploča kondenzatora vakuum, što znači da je izolacija između ploča savršena te naboj ne može preko nje putovati s jedne ploče na drugu. (Nikola Cindro, 1988)

Kapacitet pločastog kondenzatora je upravno razmjeran površini *A* jedne ploče, a obrnuto razmjeran udaljenosti *d* između ploča:

$$C = \varepsilon_0 \frac{A}{d}$$

gdje je permitivnost vakuuma $\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12}\, C/Vm$.

(Šporer& Kuntarić, 1995)

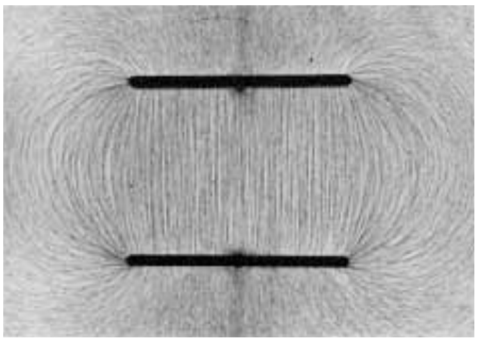
Iz gornjeg izraza se može zaključiti da je kapacitet kondenzatora veličina neovisna o naboju na pločama, tj. kapacitet pločastog kondenzatora ovisi samo o dimenzijama ploča (površina *A*) i udaljenosti među pločama (*d*). Kapacitet kondenzatora se mijenja umetanjem izolatora između ploča (dielektrik). (Nikola Cindro, 1988)

U tom slučaju će u izolatoru električno polje biti umanjeno $\varepsilon_r$ puta i toliko će se puta povećati kapacitet kondenzatora. Kapacitet pločastog kondenzatora može prikazati kao

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A}{d}$$

gdje je $\varepsilon_r$ relativna permitivnost tvari (izolatora).

(Šporer& Kuntarić, 1995)



**Slika 2:** Električno polje između dvije nabijene ploče kondenzatora. **Prema:** (Raymond A. Serway & John W. Jewett, 2004, str 799)

### 4.4.4 Energija pohranjena u kondenzatoru

Energija $W$ elektrostatičkog polja pohranjena u kondenzatoru kapaciteta $C$, napona $U$ i naboja $Q$ je:

$$W = \frac{1}{2}QU = \frac{1}{2}\frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2}U^2C$$

(Nada Brković & Planinka Pećina, 2010)

Defibrilator je primjer medicinskog uređaja u kojem kondenzatori imaju vrlo važnu ulogu. Kada je defibrilator napunjen, u električnom polju kondenzatora, u defibrilatoru, je pohranjeno 360 $J$ energije. Defibrilator može tu energiju isporučiti pacijentu u vremenskom intervalu od 2 $ms$. Defibrilator se upotrebljava u hitnim stanjima u medicini, kao što su ventrikulska fibrilacija i ventrikulska tahikardija bez pulsa. Energija pohranjena u kondenzatoru se otpušta kroz srce preko elektroda, koje se nazivaju pedale defibrilatora. U slučaju defibrilatora, kondenzator služi kao rezervoar energije koji se sporo puni, ali omogućuje brzu isporuku velike količine energije u kratkom pulsu. (Raymond A. Serway & John W. Jewett, 2004)



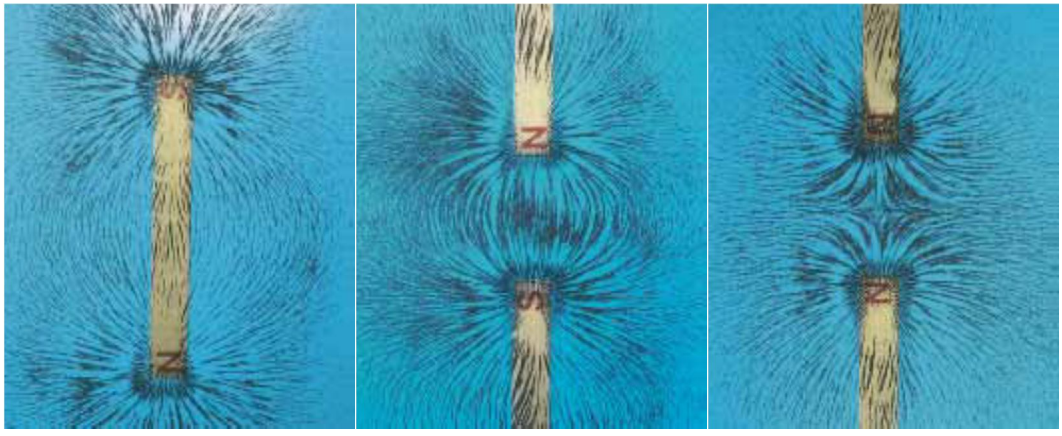
**Slika 3:** Defibrilator. Pedale defibrilatora se postavljaju na pacijentova prsa, nakon čega se isporučuje električni šok. Cilj je uspostaviti normalan ritam rada srca. **Prema:** (Raymond A. Serway & John W. Jewett, 2004, str. 810)

# 5 Elektromagnetizam

## 5.1 Magnetsko polje

Dva paralelna vodiča, kojima električna struja teče istim smjerom, međusobno se privlače. Ukoliko se promijeni smjer električne struje u jednom vodiču, vodiči se počinju međusobno odbijati. To djelovanje nije posljedica statičkog naboja na vodičima, nego je povezano samo s gibanjem naboja. Sile kojima naboji u gibanju djeluju na druge električne naboje u gibanju su magnetske sile. Posljedično tome se može zaključiti da naboj u gibanju stvara oko sebe magnetsko polje. Općenito govoreći, možemo reći da magnetsko polje postoji u danoj točki prostora ako sile (uz elektrostatičku) djeluju na naboj u gibanju koji prolazi tom točkom. (Nikola Cindro, 1988)

Magnetsko polje je, kao i električno, vektorsko polje pa se može prikazati magnetskim silnicama. Bitna razlika između silnica magnetskog i električnog polja je u tome što su magnetske silnice zatvorene krivulje, tj. ne može se izolirati jedan pol od drugoga, za razliku od silnica električnog polja koje izlaze iz pozitivnog naboja i završavaju u negativnom. Smjer megnetskih silnica je po definiciji smjer u kojem se otklanja sjeverni pol magnetske igle. U praksi, smjer se određuje tzv. pravilom desne ruke. (Šporer& Kuntarić, 1995)



a b c

**Slika 4:** a) magnetsko polje magneta b) magnetsko polje između suprotnih polova dva magneta c) magnetsko polje između istih polova dva magneta. **Prema:** (Raymond A. Serway & John W. Jewett, 2004, str. 897)

Magnetsko polje se označava simbolom $\vec{H}$ i iskazuje se u amperima po metru $(A/m)$. Magnetska indukcija ili gustoća magnetskog toka, kojom se opisuje magnetski učinak, se označava simbolom $\vec{B}$. Mjerna jedinica je tesla $(T)$.

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H}$$

gdje je $\mu$ apsolutna permeabilnost: $\mu = \mu_r \cdot \mu_0$.

$\mu_0$ je permeabilnost vakuuma i iznosi: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} T \cdot m/A$, a $\mu_r$ je relativna permeabilnost tvari. Veličina $\vec{B}$ se često također naziva magnetsko polje.

(Nada Brković & Planinka Pećina, 2010)

Magnetsko polje (H) ravnog vodiča razmjerno je jakosti struje (*I*) koja teče vodičem, a obrnuto razmjerno udaljenosti (*a*) promatrane točke prostora (*P*) od vodiča:

$$H = \frac{1}{2\pi}\frac{I}{a}$$

(Šporer& Kuntarić, 1995)

Oko ravnog vodiča kojim prolazi struja nastaje magnetsko polje. Silnice tog magnetskog polja koncentrične su kružnice koje leže u ravninama okomitim na vodič, a središta im se nalaze na osi vodiča. Smjer magnetskog polja određujemo pravilom desne ruke: obuhvatimo li žicu kojom prolazi struja dlanom desne ruke tako da palac pokazuje smjer struje, tada će savijeni prsti pokazivati smjer magnetskog polja tj. smjer otklona sjevernog pola magnetne igle. (Nada Brković & Planinka Pećina, 2010)

Magnetsko polje (H) u unutrašnjosti zavojnice razmjerno je jakosti struje (*I*) i broju zavoja (*N*), a obrnuto razmjerno duljini zavojnice (*l*):

$$H = \frac{IN}{l}$$

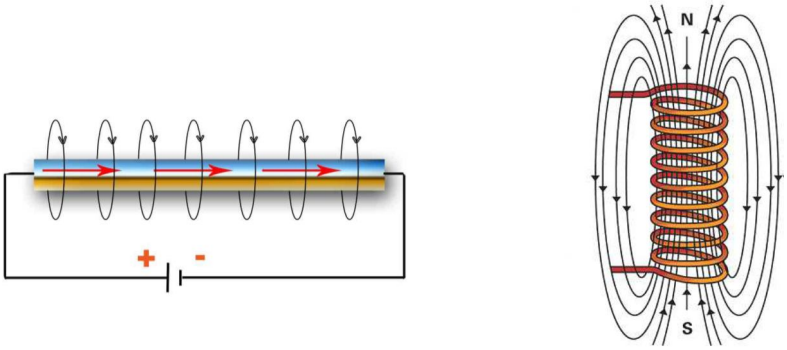
(Šporer& Kuntarić, 1995)

Kada je zavojnica dovoljno dugačka, unutar nje postoji homogeno magnetsko polje čiji smjer možemo odrediti pravilom desne ruke: obuhvatimo li dlanom desne ruke zavojnicu tako da savijeni prsti pokazuju smjer struje, tada palac pokazuje sjeverni magnetski pol. (Nada Brković & Planinka Pećina, 2010)

Magnetska indukcija ili gustoća magnetskog toka (*B*) je omjer magnetskog toka ($\phi$) i površine (*A*) okomite na silnice:

$$B = \frac{\Delta\Phi}{\Delta A}$$

Magnetske silnice koje prolaze nekom površinom (*A*) određuju tok magnetskog polja ($\phi$)




a b

**Slika 5:** Silnice magnetskog polja: a) oko ravnog vodiča, b) unutar zavojnice. **Prema:** (Brnjas- Kraljević & Krilov, 2009, str. 71)

Magnetsko polje indukcije (*B*) djeluje na vodič kojim teče struja jakosti (*I*) tzv. Amperovom silom:

$$F = IlBsin\alpha$$

gdje je *l* duljina dijela vodiča koji se nalazi u magnetskom polju, α je kut koji zatvara smjer struje sa smjerom magnetskog polja.

Ta sila (*F*) se još naziva i elektromagnetska sila. Smjer elektromagnetske sile se određuje pravilom lijeve ruke.

(Šporer& Kuntarić, 1995)

Sila $F$, kojom međusobno djeluju dva paralelna vodiča, u vakuumu, razmaknuta za $r$ kojima prolaze struje $I_1$ $i$ $I_2$ iznosi:

$$F = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I_1 I_2}{r} l$$

Ako su struje istog smjera tada se vodiči privlače, a ako su suprotnog smjera tada se odbijaju. Ova pojava upotrebljava se za definiciju osnovne mjerne jedinice električne struje – ampera: amper je jakost one stalne struje, koja prolazeći kroz dva ravna, paralelna i beskonačno dugačka vodiča, zanemarivo malog kružnog presjeka, u vakuumu, međusobno udaljena jedan metar, uzrokuje između njih silu od $2 \cdot 10^{-7}$ njutna po metru duljine.
(Nada Brković & Planinka Pećina, 2010)

## 5.2 Elektromagnetska indukcija

1831. godine, M. Faraday je otkrio da promjenom magnetskog toka kroz zavojnicu dolazi do pojavljivanja struje u zavojnici iako nema vanjskog izvora struje. Tako nastalu struju nazivamo induciranom strujom, a napon koji je uzrokuje induciranim elektromotornim naponom. Pojavu nastajanja električne struje pomoću vremenski promjenljivog magnetskog toka nazivamo elektromagnetskom indukcijom. (Nada Brković & Planinka Pećina, 2010)

Ta je pojava opisana Faradayevim zakonom elektromagnetske indukcije:
Inducirana elektromotorna sila javlja se u zavojnici s brojem zavoja N pri svakoj promjeni magnetskog toka u vodiču, a po veličini jednaka je negativnoj vrijednosti brzine promjene magnetskog toka u vodiču. (Šporer& Kuntarić, 1995)

$$U = -N\frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

gdje je $\phi$ tok magnetske indukcije. Tok magnetske indukcije ovisi o magnetskoj indukciji, *B,* i površini, *A*, kroz koju prolaze silnice magnetskog polja. Ako su silnice magnetskog polja okomite na plohu površine A:

$$\Phi = B \cdot A$$

(Brnjas- Kraljević & Krilov, 2009)

Smjer induciranog elektromotornog napona je takav da se on suprotstavlja uzroku koji ga proizvodi (Lenzovo pravilo). To pravilo proizlazi iz zakona o održanju energije, i zbog toga u zakonu indukcije dolazi predznak $(-)$. (Šporer& Kuntarić, 1995)

Negativni predznak u Faradayevom zakonu označava da je magnetsko polje koje nastaje oko inducirane struje suprotnog smjera od vanjskog magnetskog polja.

Također na krajevima vodiča, koji se giba u magnetskom polju, inducira se elektromotorna sila, pa vodičem poteče struja.

(Brnjas- Kraljević & Krilov, 2009)

# 6 Tvari u stalnom električnom polju

Električno polje djeluje na naboj silom i uzrokuje njegovo gibanje. Način gibanja ovisi o veličini sile i o stanju naboja. Naboji mogu biti slobodni, kao kod metala i elektrolita, ili vezani, kao kod dielektrika. (Brnjas- Kraljević & Krilov, 2009)

## 6.1 Slobodni naboji u električnom polju

Na slobodni naboj, $Q$, u električnom polju djeluje stalna sila električnog polja $\vec{F} = Q \cdot \vec{E}$. Prema drugom Newtonovom zakonu posljedica tog djelovanja je jednoliko ubrzano gibanje naboja po pravcu.

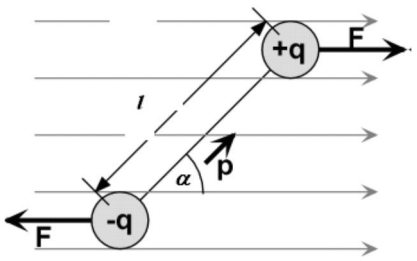
## 6.2 Vezani naboji u električnom polju

Ponašanje vezanih naboja u električnom polju predočujemo ponašanjem dipola u homogenom električnom polju. Električni dipol sastoji se od dva točkasta naboja jednakih iznosa, $q$, a suprotnih predznaka, na stalnoj udaljenosti, $l$. Opisan je električnim dipolnim momentom, $p$. To je vektorska veličina iznosa $p = q \cdot l$, a smjera od negativnog prema pozitivnom naboju. Na dipol u homogenom električnom polju djeluje par sila i uzrokuje zakretanje dipola, slika 6. Moment para sila jednak je umnošku iznosa sile i udaljenosti među silama.

$$M = dF = qEl\,sin\alpha = pE\,sin\alpha$$

$$\vec{M} = \vec{p} \cdot \vec{E}$$

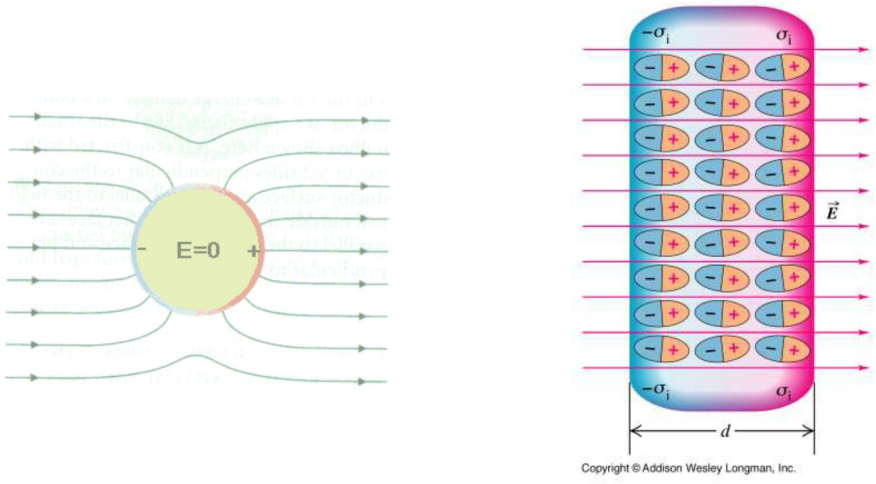
Iznos momenta je jednak nuli za kut $\alpha$ = 0, dipolni moment usmjeren je paralelno električnom polju. To je stanje ravnoteže.
(Brnjas- Kraljević & Krilov, 2009)



**Slika 6: Sile na dipol u električnom polju.** Na dipol u električnom polju djeluje par sila. Posljedica djelovanja para sila je rotacijsko gibanje. **Prema:** (Brnjas- Kraljević & Krilov, 2009, str. 73)

## 6.3 Polarizacija tvari u električnom polju

Pokretne naboje nalazimo u vodičima, i to pokretne ione u elektrolitima, a slobodne elektrone u metalima. Slika 7 prikazuje što se događa kad vodič stavimo u električno polje. Elektroni ili ioni se kreću pod utjecajem električne sile te na površini tvari uzrokuju slobodni površinski naboj. Ovo inducirano električno polje u vodiču, po iznosu je jednako, a po smjeru suprotno homogenom električnom polju kondenzatora. Stoga je u bilo kojoj točki unutar vodiča jakost električnog polja nula.




a b

**Slika 7: Tvari u električnom polju,** a) vodič u električnom polju. Influencija slobodnog naboja na površini; b**)** dielektrik u električnom polju. **Prema:** (Brnjas- Kraljević & Krilov, 2009, str. 74)

Izolatori ili dielektrici su tvari bez slobodnih pokretnih naboja. Stavimo li dielektrik u električno polje kondenzatora on se polarizira, slika 7. Jakost električnog polja kondenzatora s dielektrikom, $E$, manja je od jakosti polja u istoj točki kondenzatora bez dielektrika, $E_0$. Električno polje kondenzatora s dielektrikom je:

$$E = \frac{E_0}{\varepsilon_r}$$

Količina površinskog naboja induciranog na plohama dielektrika ovisna je o jakosti vanjskog električnog polja: $\sigma_d = \chi \varepsilon_0 E$, gdje je $\sigma_d$ površinski naboj na dielektriku, $\chi$ je dielektrična susceptibilnost promatrane tvari. Dielektrična susceptibilnost mjeri inducirano polje u dielektriku $E_d = \chi E$.
Između dielektrične susceptibilnosti i relativne permitivnosti postoji veza: $1 + \chi = \varepsilon_r$.

Relativna permitivnost $\varepsilon_r = \frac{E_0}{E} > 1$, opisuje ponašanje tvari u električnom polju. Velika vrijednost $\varepsilon_r$ znači da se električni dipoli lakše orijentiraju u električnom polju, pa je polje dielektrika veliko, mjereno polje kondenzatora malo.
Efikasnost polarizacije mjeri se vremenom relaksacije. To je ono vrijeme koje je potrebno da polarizacija nestane nakon isključenja vanjskog polja. Postoje različiti mehanizmi kojima se uspostavlja polarizacija:

1. Dipolna ili orijentacijska polarizacija javlja se u sistemima s polarnim molekulama, slika 8a. Usmjeravanju električnih dipola u električnom polju protive se kaotična termička gibanja. Pri orijentaciji molekula dolazi do viskoznog trenja što uzrokuje zagrijavanje dielektrika.

2. Elektronska polarizacija javlja se u tvarima s nepolarnim molekulama. Električno polje uzrokuje pomak elektronskog oblaka molekula i time inducira električne dipole u smjeru vanjskog električnog polja, slika 8b.

3. Ionska polarizacija javlja se kod ionskih kristala. Ne javlja se u biološkim sistemima.

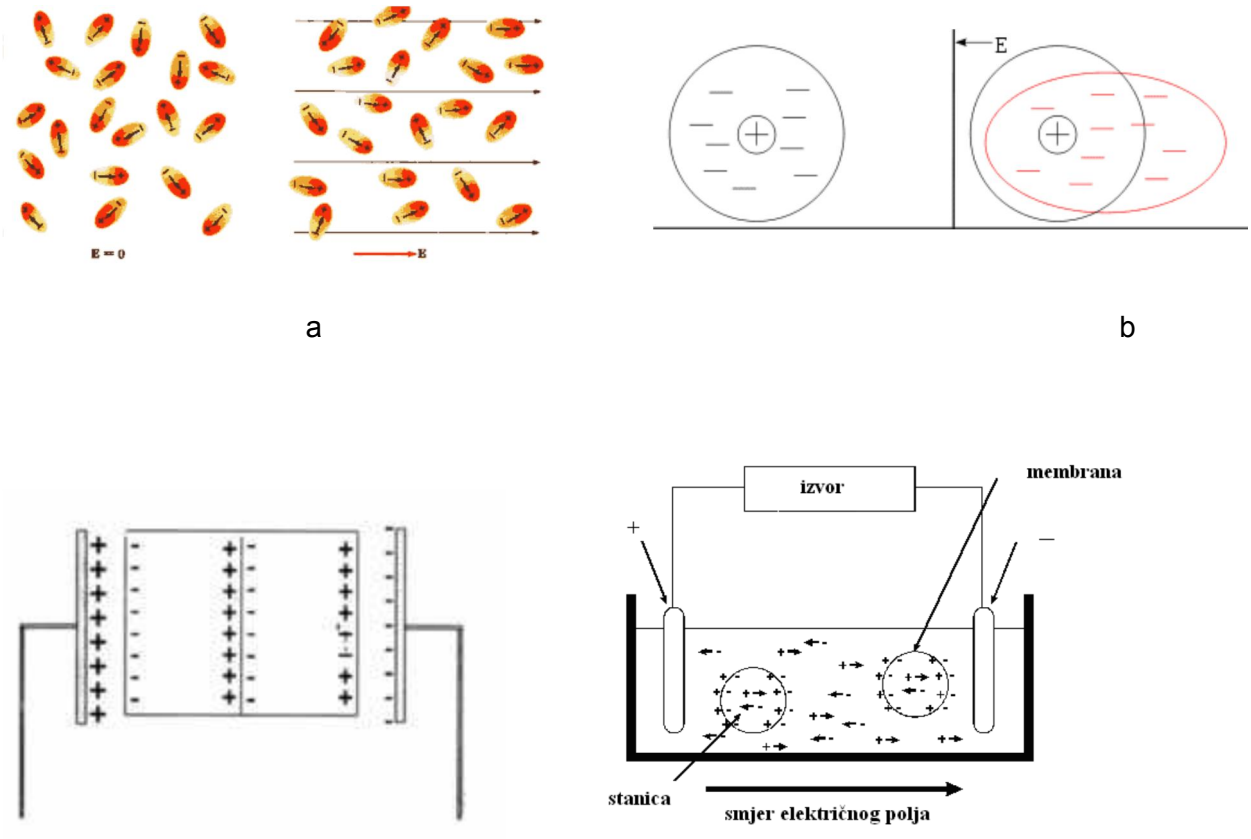
4. Fazna polarizacija je pojava površinskog naboja na granicama dijelova tkiva s različitim električkim svojstvima, različitom dielektričnom permitivnosti, slika 8c. Može se dogoditi i unutar nekog homogenog tkiva, ako u njemu postoji područje drugačijih svojstava, primjerice tumorsko unutar zdravog tkiva. Vrijeme relaksacije je $10^{-3}$s.

5. Membranska polarizacija je vrlo važna za živa tkiva. Stanice su od okoline odvojene membranom unutar koje je jako električno polje i nalaze se u tekućini u kojoj postoje slobodni ioni, slika 8d. U početku, kad se tkivo stavi u vanjsko električno polje, električno polje lijevog dijela membrane je u smjeru a desnog dijela je suprotno od smjera vanjskog električnog polja. Pod utjecajem električnog polja, ioni izvan stanica i oni u stanici počinju se gibati prema suprotno nabijenim pločama kondenzatora, dok ih membrana ne zaustavi. Pozitivni i negativni ioni iz tekućine ostaju s vanjske strane membrane a suprotno nabijeni ioni u citoplazmi smještaju se s unutrašnje strane

membrane. Tako se unutar stanice stvara jako električno polje suprotnog smjera od vanjskog polja kondenzatora. Taj proces uzrokuje smanjenje vanjskog polja. Vrijeme relaksacije je približno $10^{-2}$ s.

6. Elektrolitska polarizacija se javlja u biološkim tkivima, jer tkiva nisu potpuni dielektrici. Slobodni ioni kreću se prema pločama kondenzatora suprotnog naboja. Nastalo električno polje je suprotnog smjera, pa se cijelo tijelo ponaša kao jedan veliki inducirani dipol. Vrijeme relaksacije je veće od 1 s.

(Brnjas- Kraljević & Krilov, 2009, str. 74)




a b

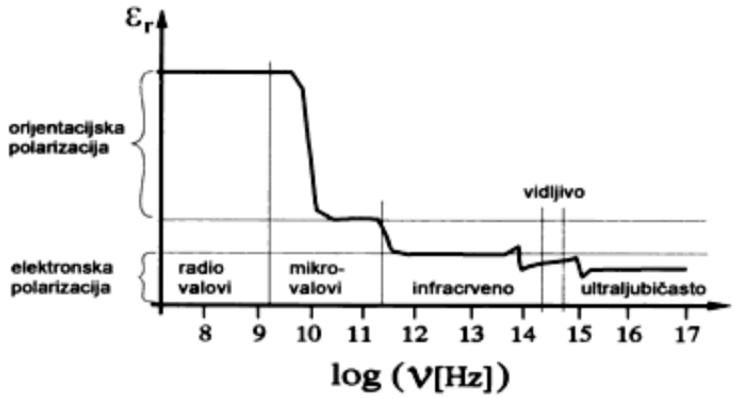
c d

**Slika 8:** Različiti načini polarizacije: a- dipolna, b- elektronska, c- fazna, d- membranska

**Prema:** (Brnjas- Kraljević & Krilov, 2009, str. 76)

## 6.4 Polarizacija u izmjeničnom električnom polju

Unutar kondenzatora koji je spojen na izvor izmjeničnog napona, nastaje izmjenično električno polje. Polarizacija dielektrika u izmjeničnom električnom polju kondenzatora ovisit će o međusobnom odnosu perioda (*T*) napona i vremena relaksacije mogućih mehanizama polarizacije u dielektriku. Jedan smjer električnog polja traje *T/2*. Neće se ostvariti oni mehanizmi polarizacije koji imaju vrijeme relaksacije dulje od *T/2*. Slika 9 prikazuje kako relativna permitivnost ovisi o frekvenciji izmjeničnog električnog polja. Što je frekvencija viša to će manje mehanizama polarizacije ostati djelotvorno. Na najvišim frekvencijama događa se još samo elektronska polarizacija. (Brnjas- Kraljević & Krilov, 2009)




**Slika 9:** Ovisnost $\varepsilon_r = f(\omega)$ **Prema:** (Brnjas- Kraljević & Krilov, 2009, str. 77)

# 7 Tvari u magnetskom polju

Električna i magnetska svojstva tvari posljedica su građe atoma. Elektroni u elektronskom omotaču i nukleoni u jezgri imaju spin. Iz tog razloga imaju pridruženi spinski magnetski moment zbog kojeg se ponašaju kao magnetski dipoli u vanjskom magnetskom polju. Magnetske osobine atoma, a posljedično tome i tvari koje ti atomi izgrađuju, ovise prvenstveno o magnetskom momentu elektrona, dok je doprinos magnetskih momenata jezgara oko tisuću puta manji. Elektron je u atomu opisan s dva magnetska momenta: spinskim magnetskim momentom (zbog spina) i orbitalnim magnetskim momentom (zbog gibanja oko jezgre). Spinski magnetski moment imaju samo oni atomi ili molekule koji imaju nesparene elektrone. Takve čestice zovemo paramagnetskim. Ovisno o elektronskoj konfiguraciji, atomi različitih tvari ponašat će se u magnetskom polju na različite načine.

Unutar zavojnice kojom prolazi električna struja inducirano je magnetsko polje indukcije $B_0$. Stavimo li u zavojnicu neku tvar, vrijednost indukcije će se promijeniti na $B$. Odnos ta dva polja je relativna permeabilnost tvari, $\mu_r = B/B_0$. S obzirom na veličinu magnetske permeabilnosti, $\mu_r$, tvari su podijeljene na:

a) Dijamagnetske- $\mu_r \leq 1, npr. H_2O$
b) Paramagnetske- $\mu_r \geq 1, npr. Al$
c) Feromagnetske- $\mu_r >> 1, npr. Fe$

(Brnjas- Kraljević & Krilov, 2009)

# 8 Elektromagnetski valovi

Elektromagnetski valovi su svugdje oko nas. Vidljiva svjetlost, TV signal, X- zrake, gama zrake samo su neki od primjera elektromagnetskih valova. James Clark Maxwell je 1860- ih postigao jedno od najvećih ljudskih intelektualnih dostignuća. Najprije je prepoznao, na matematičkoj razini, da Amperov zakon koji se do tada upotrebljavao, nije točan, te ga je posljedično tome modificirao. (Michael E. Browne, 1999) Nadalje, dotadašnja znanja iz elektriciteta i magnetizma je objedinio u četiri diferencijalne jednadžbe klasične elektrodinamike:

I. $\oint \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q}{\varepsilon}$

II. $\oint \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$

III. $\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{d_t} \oint \vec{B} \cdot d\vec{S}$

IV. $\oint \vec{B} \cdot d\vec{S} = \mu_0 I + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{d}{d_t} \oint \vec{E} \cdot d\vec{S}$

(Brnjas- Kraljević & Krilov, 2009)

Prva jednadžba govori da je električni naboj izvor električnog polja, odnosno da postoji električni monopol, tj. to je Gaussov zakon. Druga jednadžba govori da ne postoje magnetski monopoli, odnosno, postoje samo magnetski dipoli, a magnetska polja se prikazuju zatvorenim silnicama. Treća jednadžba je poopćenje Faradayevog zakona elektromagnetske indukcije. Četvrta jednadžba je modificiran Amperov zakon magnetske indukcije. (Michael E. Browne, 1999)

Oko vodiča kojim protječe električna struja inducira se magnetsko polje, ali i svako promjenljivo električno polje će inducirati pojavu magnetskog polja. Simetričnost induktivne veze između magnetskih i električnih promjenljivih polja navela je Maxwella da predvidi postojanje elektromagnetskih valova. On je definirao elektromagnetski val kao prijenos energije, elektromagnetskom indukcijom povezanih polja, električnog i magnetskog, kroz prostor. Na temelju svoje teorije Maxwell je izveo izraz za brzinu prostiranja tih valova. Brzine u vakuumu, $c$, i u sredstvu,$v$, dane su relacijama:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} \qquad \text{i} \qquad v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon \mu}}$$

gdje je $\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12}\ C^2 N^{-1} m^{-1}$ i $\mu_0 = 4\pi \cdot\ 10^{-7}\ Tm\ A^{-1}$.

Na temelju tih podataka izračunata je brzina elektromagnetskih valova u vakuumu, koja iznosi $3 \cdot\ 10^8 ms^{-1}$. Budući da je do tog vremena već postojalo više pokušaja utvrđivanja brzine svjetlosti, ali ni jedan nije bio točan, Maxwell je zaključio da je i svjetlost elektromagnetski val. Tvrdio je da postoje i drugi elektromagnetski valovi različitih valnih

duljina i osobina osim svjetlosti i da je moguće nabijene čestice koje titraju promatrati kao izvor elektromagnetskih valova. (Brnjas- Kraljević & Krilov, 2009)

# 9 Biološki efekti pri primjeni elektromagnetskog zračenja

## 9.1 Tkiva u elektromagnetskom polju

Najzastupljenije elektromagnetsko zračenje okoliša je frekvencije 50 odnosno 60 Hz (frekvencija gradske mreže za Europu odnosno za USA), a radiofrekventno zračenje je frekvencije između 300 MHz i 10 GHz, uključujući frekvencije povezane s bežičnom komunikacijom. Izloženost elektromagnetskom zračenju dovodi do pojave induciranog električnog i magnetskog polja u tkivima. Te pojave, ovisno o frekvenciji i jakosti primjenjenog zračenja, mogu biti ili štetne ili korisne. Biološka tkiva su nemagnetična, te je zbog toga njihova relativna permeabilnost jednaka kao i relativna permeabilnost zraka.

Pri primjeni elektromagnetskog zračenja iznimno niske frekvencije, frekvencije 50 i 60 Hz, inducirano magnetsko polje u tkivu jednako je primjenjenom polju, zbog kvazistatičke prirode elektromagnetskog polja i permeabilnosti ljudskog tkiva, koje je jednako permeabilnosti zraka. S druge strane, pri primjeni radiofrekventnog zračenja inducirano magnetsko i električno polje je promijenjeno. Naime, kod radiofrekventnog zračenja, ali i bilo kojeg drugog elektromagnetskog zračenja, električno i magnetsko polje je upareno tako da bilo koje tkivo dovodi do promjena u elektromagnetskom polju. Veličina i prostorna raspodjela polja u tkivu ovisi o anatomiji regije tijela, frekvenciji primijenjenog zračenja i usmjerenosti zračenja s obzirom na tijelo.

Električno i magnetsko polje kod elektromagnetskog zračenja iznimno niske frekvencije dovode do stimulacije živaca, poprječno-prugastog mišićja i srčanog mišića. Do podraživanja staničnih membrana dolazi kada električno polje u tkivu prijeđe vrijednost praga podražljivosti. Posljedično tome, dolazi do stvaranja akcijskog potencijala koji se širi duž stanične membrane. Kod radiofrekventnog zračenja, inducirano električno polje uzrokuje zagrijavanje, koje je proporcionalno kvadratu električnog polja u tkivu i provodljivosti tkiva. (M. A. Stuchly, 2002)

## 9.2 Biološki učinci

### 9.2.1 Elektromagnetsko zračenje iznimno niske frekvencije

Električno i magnetsko polje kod elektromagnetskog zračenja iznimno niske frekvencije dovode do stimulacije živaca. Najzastupljenije elektromagnetsko zračenje u okolišu,

frekvencije između 50 i 60 Hz, neće dovesti do neuralne stimulacije. Eksperimentalno je utvrđen prag podražljivosti za stimulaciju neurona retine. Najniža jakost magnetskog polja, potrebnog za stimulaciju neurona retine, proporcionalna je 10 mT (u mraku) pri frekvenciji od 20 Hz. Prag podražljivosti je viši pri jačem osvjetljenju i pri višim frekvencijama.

Postoje dokazi da zračenje iznimno niske frekvencije može ubrzati cijeljenje kostiju. Cijeljenje je najefikasnije pri frekvencijama između 10 i 30 Hz. Te frekvencije su povezane s frekvencijama koje su opažene u živim životinjama. Biofizikalni mehanizam tih procesa je samo dijelom poznat.

Također postoje dokazi da zračenje iznimno niske frekvencije utječe na prijenos signala između stanične membrane i unutrašnjosti stanice, ali taj mehanizam je većim dijelom nepoznat.

(M. A. Stuchly, 2002)

### 9.2.2 Radiofrekventno zračenje

Radiofrekventno zračenje uzrokuje zagrijavanje tkiva. Porast tjelesne temperature za 5 °C može dovesti do privremene neplodnosti u muškaraca, lezija mozga, malformacija ploda u trudnica. Manji porast tjelesne temperature, za 1°C, može dovesti do promjena u sekreciji hormona, slabljenja imunološkog odgovora i promjena u ponašanju. Do porasta tjelesne temperature može doći pri dijagnostičkoj primjeni MR-a, ukoliko se primjenjuju frekvencije koje su vrlo bliske rezonantnoj frekvenciji, npr. 70 MHz. Pri toj frekvenciji može doći do porasta tjelesne temperature za otprilike 1°C.

(M. A. Stuchly, 2002)

## 9.3 Toplinski i netoplinski učinci

Glavni toplinski učinak, koji se javlja pri dijatermiji, je zagrijavanje tkiva. Posljedično povećanju temperature tkiva dolazi do povećanja cirkulacije u tom tkivu. Fiziološki učinci koji se postižu kod drugih oblika toplinske terapije stvaraju se i uporabom kratkovalne i mikrovalne dijatermije. Snaga elektromagnetskog polja kod dijatermalnih modaliteta, tj. različitih načina primjene dijatermije, dopušta veću dubinu zagrijavanja od one koja se javlja kod površinskih toplinskih sredstava. Dijatermija uzrokuje, povećanjem temperature tkiva, povećanje rastegljivosti dubinskog kolagenskog tkiva, smanjenje ukočenosti zgloba, olakšanje dubinske boli i mišićnoga spazma. (Ivo Jajić i suradnici, 2000)

Učinak na tkivo se može utvrditi kao netoplinski ako je, tokom ekspozicije tkiva elektromagnetskom zračenju, porast temperature tkiva ispod određene vrijednosti $\Delta T$. Često je $\Delta T$ = 1 °C, ali ovisi o procjeni samog istraživača. S termodinamskog aspekta, makromolekule koje imaju određena vibracijska i rotacijska stanja, nalaze se u ravnoteži s okolnim tkivom. Radiofrekventno zračenje prodire u strukture tkiva istovremeno, ali nejednako, zbog čega dolazi do narušavanja ravnoteže. Posljedično tome dolazi do interakcija među makromolekulama s ciljem ponovne uspostave ravnoteže. (Frank S. Barnes & Ben Greenebaum, 2006) Stvaranje bisernog lanca je, za sada, jedini opisani netoplinski učinak dijatermije. Do formiranja tog lanca dolazi kad mikroorganizmi, jednostanični organizmi ili eritrociti u serumu formiraju lančanu strukturu paralelnu sa silnicama elektromagnetskog polja. Taj se učinak postiže ili kontinuiranim ili pulsirajućim kratkim elektromagnetskim valom jednakog prosječnog izlaznog signala i mikrovalnom dijatermijom. Netoplinskim učincima dijatermije ne može se pripisati ni jedna jasno određena terapijska reakcija. (Ivo Jajić i suradnici, 2000)

## 9.4 Specifična apsorpcijska vrijednost (SAR)

Apsorbirana energija radiofrekventnog zračenja u tkivu prelazi u toplinsku energiju. Ta toplinska energija se brzo odvodi iz tkiva procesima kondukcije, konvekcije (protok krvi) i manjim dijelom elektromagnetskim zračenjem. Toplinski kapacitet tkiva i procesi odvodnje topline utječu na raspodjelu apsorbirane doze zračenja, tj. nastale toplinske energije.

SAR (specific apsorption rate) je važna dozimetrijska mjera kojom se utvrđuje ekspozicija radiofrekventnom zračenju. SAR se koristi za određivanje količine apsorbirane energije po jediničnoj masi tkiva izloženog elektromagnetskom zračenju. Izražava se u jedinici vat po kilogramu ($W/kg$). SAR se može primijeniti na bilo koje tkivo ili organ, ili se može prikazati kao prosječna vrijednost za cijelo tijelo. (Frank S. Barnes & Ben Greenebaum, 2006)

SAR je proporcionalan električnoj vodljivosti izloženog tkiva. Da bi terapija bila učinkovita, temperatura tkiva se mora povisiti na vrijednost između 40 °C i 45 °C. SAR, koji je potreban da bi se postigla gornja granica tog raspona je 170 $W/kg$. Pri toj vrijednosti dolazi do povećanja u protoku krvi za 30 mL/ 100g tkiva/ min. Dobro prokrvljena tkiva se mogu liječiti dijatermijom koja uzrokuje početnu temperaturnu promjenu od 0,8 °C do 2,7 °C u minuti, što odgovara SAR- u od 50 do 170 $W/kg$. Manje prokrvljena tkiva podnose vrijednost SAR- a, koja je bliža donjoj granici prije navedenog raspona, da bi se izbjegla nagla temperaturna povećanja. U cilju izbjegavanja naglog temperaturnog porasta, može se zaključiti da zagrijanost ovisi o vrijednosti struje koja se primjenjuje. (Ivo Jajić i suradnici, 2000)

SAR se računa prema izrazu:

$$SAR = \frac{Q}{m \cdot t} = \frac{m \cdot c \cdot \Delta T}{m \cdot t}$$

gdje je

$c =$ specifični toplinski kapacitet tkiva

$\Delta T =$ porast temperature u tkivu

$t =$ vrijeme prijenosa energije u tkivo

SAR se također može izraziti u obliku:

$$SAR = \frac{1}{2\rho} \omega \varepsilon_0 \varepsilon_r \tan\delta \, E_{in}^2$$

gdje je

$\rho =$ gustoća tkiva u $kg/m^3$

$\varepsilon_0 =$ permitivnost vakuuma

$\varepsilon_r =$ relativna permitivnost sredstva; relativna dielektrična konstanta

$\tan\delta =$ faktor gubitka

$\omega =$ kružna frekvencija

$E_{in} =$ električno polje u tkivu, u $volt/m$

(Vincent Delpizzo & Kenneth Henry Joyner, 1987)

# 10 Kratkovalno i mikrovalno zračenje

Apsorpcijska svojstva, kao i metode primjene se razlikuju kod kratkovalne i mikrovalne dijatermije, te posljedično tome se razlikuju i mehanizmi zagrijavanja tkiva, kao i konačna zagrijanost.

Interakcija između elektromagnetskog zračenja i tkiva se može promatrati na makroskopskoj i mikroskopskoj razini. Na mikroskopskoj razini, tri su glavna mehanizma interakcije:

1. orijentacija već postojećih električnih dipola u atomima i molekulama tkiva
2. polarizacija atoma i molekula, te stvaranje električnih dipola
3. pomak u provođenju „slobodnih“ elektrona i iona u tkivu

Sva tri nabrojana mehanizma interakcije uzrokuju zagrijavanje tkiva. U prva dva slučaja zagrijavanje je posljedica trenja povezanog s gibanjem atoma i molekula u električnom polju. U trećem slučaju do zagrijavanja dolazi zbog sudara elektrona i iona s atomima i molekulama tkiva. Ukoliko se tkivo stavi u magnetsko polje, to će polje inducirati stvaranje električnog polja u tkivu i posljedično dovesti do zagrijavanja. Iz navedenog se može zaključiti da je i magnetsko i električno polje vrlo bitno za zagrijavanje tkiva.

Sva tri mehanizma interakcije se mogu opisati svojstvom tkiva koje se naziva dielektrična funkcija (kompleksna permitivnost). Dielektrična funkcija je frekvencijska ovisnost relativne permitivnosti.

(Vincent Delpizzo & Kenneth Henry Joyner, 1987)

## 10.1 Kratkovalna dijatermija

Osnovne komponente uređaja za kratkovalnu dijatermiju su:

1. dovod struje koji izmjeničnu struju izvora pretvara u istosmjernu za strujni krug pojačala snage kod frekvencijskog generatora
2. oscilator, koji proizvodi visokofrekventnu (27,12 MHz) struju
3. pojačalo koje pojačava snagu izmjenične struje što je stvara generator u cilju dobivanja dovoljno jake snage za terapijsku primjenu
4. strujni krug za prilagodbu prema bolesniku s elektrodama koje omogućuju prijenos energije od uređaja do bolesnika

Strujni krug s bolesnikom zahtijeva ručnu ili automatsku prilagodbu rezonantne frekvencije uređaja prema rezonantnoj frekvenciji bolesnikova strujnog kruga. Bolesnikov strujni krug

kratkovalne dijatermije emitira ili jače električno ili jače magnetsko polje, ili oba polja mogu biti gotovo jednaka, ovisno o tipu elektroda. Apsorpcija energije električnog i/ ili magnetskog polja dovodi do zagrijavanja tkiva. (Ivo Jajić i suradnici, 2000)

Vrste elektroda

U kratkovalnoj dijatermiji se primjenjuju kapacitivne i induktivne elektrode. Radi odabira najučinkovitije terapije za pojedinog bolesnika, terapeut mora znati je li određeni tip elektroda stvara veće amplitude električnog ili magnetskog polja, ili podjednake. Kapacitivne elektrode stvaraju elektromagnetsko polje većih amplituda električnog polja, dok induktivne elektrode stvaraju elektromagnetsko polje većih amplituda magnetskog polja. Koža i potkožno masno tkivo dominantno apsorbiraju energiju električnog polja, a tkiva s visokim elektrolitskim sastavom, kao npr. krv ili mišići, dominantno apsorbiraju energiju magnetskog polja. Sustav kapacitivnih elektroda koristi dvije zračno odvojene metalne ploče promjera od 7,5 do 17,5 cm. (Ivo Jajić i suradnici, 2000)

Kod primjene kapacitivnih elektroda, bolesnik je izložen oscilirajućem električnom polju, koje uzrokuje vibraciju molekula u tkivu i posljedično zagrijavanje tkiva. (Vincent Delpizzo & Kenneth Henry Joyner, 1987) Zrak i bolesnikovo tkivo koje se nalazi između elektroda čine dielektrik. (Ivo Jajić i suradnici, 2000)

Svaka ploča je obložena staklenim ili plastičnim štitnikom koji sprječava kontakt između ploče i bolesnikove kože. Ukoliko bi koža došla u kontakt s neobloženom metalnom elektrodom, kad je dijatermalni uređaj uključen, mogle bi nastati teške električne opekline. Za optimalno zagrijavanje štitnik mora biti što je moguće bliže koži, a ploča što dalje od kože. Položaj ploče i štitnika s obzirom na kožu omogućuje veću dubinu zagrijavanja tkiva. Kod bolesnika kod kojih je potkožni masni sloj tanji od 1 cm, tehnika kapacitivnog polja može dovoditi struju duboko u tkiva, na dubinu koja odgovara zagrijavanju induktivnim elektrodama. To se postiže kratkovalnim uređajima koji automatski povećavaju izlaznu snagu kako se povećava udaljenost između ploče i kože, te smanjuje izlaznu snagu sa smanjenjem udaljenosti između ploče i kože. U praksi većina uređaja za kratkovalnu dijatermiju održava stalnu izlaznu snagu s promjenama udaljenosti između ploče i kože. Prema tome, snaga će biti velika kad je udaljenost između ploče i kože mala, što može prouzročiti štetno zagrijavanje kože i potkožnog masnog tkiva. Ako je promjer liječenog dijela tijela manji od površine elektrode, dolazi do zgušćivanja linije polja u unutrašnosti tijela pa će zagrijavanje biti veće u dubini. Dakle, gustoća silnica bit će veća što je dio tijela bliže elektrodi. To dolazi do izražaja ako se zagrijavaju dijelovi tijela koji strše, npr. uška, nos. Tada govorimo o djelovanju šiljka. Izbočeniji dijelovi imati će jače polje djelovanja.

Postoje dvije vrste induktivnih elektroda: bubanj i kabel. Bubanj može biti jedinstvena ili višestruka jedinica. Jedinstveni je bubanj namijenjen liječenju samo jedne površine. Manja inačica jednodijelnog bubnja koja se zove „minoda“ i veća inačica „monoda“sastoje se od induktivne zavojnice postavljene u jednodimenzionalnu ili višedimenzionalnu konfiguraciju, smještenu unutar čvrstog kućišta izolatora. Kućište omogućuje širenje energije električnog i magnetskog polja samo od površine elektrode koja dolazi u dodir s jednim slojem pamučnog ručnika na bolesnikovoj koži. Površina za terapiju kućišta elektroda ima istu funkciju kao i štitnik ploče kod zračno odvojene elektrode, tj. da razdvoji induktivnu zavojnicu od kože. Višestruki bubanj, koji se zove „diploda“, napravljen je tako da se istodobno mogu liječiti jedna ili više tjelesnih površina. Diploda se sastoji od pravokutno položenih induktivnih zavojnica u kućištu izolatora, koji također služi za razdvajanje zavojnice od bolesnikove kože.

Kablovska elektroda je duljine oko 2 do 5 metara, te oko bolesnikova dijela tijela može biti namotana jednodimenzionalno ili u obliku spirale. Iz tog razloga se kablovska elektroda može upotrebljavati za istodobno liječenje jedne ili više površina. Budući da nema kućišta, uvijek se mora upotrijebiti dielektrični materijal između kabla i bolesnikove kože. Dielektrik je potreban za apsorpciju znoja, koji može prouzročiti opekline na površini kože. (Ivo Jajić i suradnici, 2000)

## 10.2 Mikrovalna dijatermija

Osnovne komponente uređaja su:

1. dovod struje
2. magnetronski oscilator
3. elektrode

(Ivo Jajić i suradnici, 2000)

Izvor mikrovalnog zračenja je mala antena. Zračenje se usmjerava prema području tijela koje se namjerava zagrijavati uz pomoć reflektora. Antena i reflektor zajedno čine aplikator. Zagrijavanje tkiva kod mikrovalne dijatermije nastaje zbog pretvorbe kinetičke energije molekula vode, koje vibriraju u prisutnosti električnog polja, u toplinsku energiju zbog trenja među molekulama. (Vincent Delpizzo & Kenneth Henry Joyner, 1987)

Frekvencija mikrovalne dijatermije, koja se primjenjuje u terapijske svrhe iznosi 2450 MHz. Ta visoka frekvencija omogućuje usmjeravanje mikrovalne energije ili isijavanje snopa od elektroda prema bolesniku. Električno polje uređaja za mikrovalnu dijatermiju paralelno je s površinom tijela, što smanjuje zagrijavanje masnog tkiva i omogućuje dubinsko zagrijavanje.

Tkiva s visokim postotkom vode, poput mišića i krvi, apsorbiraju mikrovalno zračenje u većoj mjeri nego što apsorbiraju kratkovalno zračenje. Budući da se mikrovalni valovi mogu reflektirati od dielektričnih tkiva (na granicama između različitih tkiva), može se pojaviti jače zagrijavanje na granicama između masnog tkiva i mišića, te između kosti i susjednog mekog tkiva. Refleksija od površine kostiju može uzrokovati nastajanje velikog broja stojnih valova. Temperaturne razlike u mišiću i masnom tkivu zabilježene su za različite frekvencije. Usporedba frekvencija od 915 i 2450 MHz pokazuje da se kod prosječne debljine potkožnoga masnog tkiva primjenom više frekvencije javlja više topline u potkožnim tkivima zbog refleksije na granici masnog tkiva i mišića. Teoretski, dubina prodora veća je na nižoj frekvenciji. Vrijeme koje je potrebno za maksimalni stupanj zagrijanosti tkiva je oko 20 minuta. Porastom temperature tkiva dolazi do znatnog porasta protoka krvi. (Ivo Jajić i suradnici, 2000)

## 10.3 Primjena kratkovalne i mikrovalne dijatermije

Količinu elektromagnetske energije koja se prenosi od uređaja za dijatermiju do tijela je klinički nepraktično mjeriti bez invazivnih temperaturnih sondi. Iz tog razloga, terapeut koristi bolesnikov subjektivni osjet topline kao pokazatelj doziranja. Problem nastaje kod pacijenata koji, iz bilo kojeg razloga, nemaju normalan osjet topline. Ti pacijenti se moraju prije početka liječenja testirati na bol i osjet temperature. Terapeut mora također utvrditi, pri ispitivanju bolesnika, da li je stanje koje se namjerava liječiti u akutnom, subakutnom ili kroničnom stadiju.

Uređaji za dijatermiju koriste različite reflektore koji se razlikuju ovisno o načinu primjene i površini na koju djeluju. To su:

1. reflektori s dubljim poljem zračenja
2. reflektori s trima površinama zračenja (primjenjuju se za udove i kralježnicu)
3. reflektori s okruglim poljem zračenja (primjenjuju se za zglobove i manja područja)
4. fokusni reflektori (u stomatologiji i otorinolaringologiji za zračenje točkastih površina)

Fokusni reflektori se koriste u liječenju koštanih prominencija, jer dovode do zagrijavanja mekih tkiva, a da pritom nema mogućnosti pretjeranog zagrijavanja kosti koja je blizu površine. (Ivo Jajić i suradnici, 2000)

## 10.4 Doziranje kratkovalne i mikrovalne dijatermije

Biološki učinci primjene kratkovalne i mikrovalne dijatermije na tkivo ovise o temperaturi tkiva na kraju postupka. Terapijski raspon za povećanje temperature tkiva je između 40 ℃ i 45 ℃.

Specifičan ishod liječenja koji se želi postići ovisi o količini toplinske energije dovedene u tkivo. Doze u mikrovalnoj dijatermiji:

Doza 1, najniža- niža od točke osjeta topline (akutni upalni procesi)

Doza 2, niska- blagi, jedva osjetan osjet topline (subakutni završni upalni proces)

Doza 3, srednja- ugodan osjet topline (subakutni završni upalni proces)

Doza 4, jaka- jako zagrijavanje koje izaziva osjet koji se dobro podnosi (kronična stanja)

Tokom primjene dijatermije u terapiji nikad se ne smije prijeći granica boli.

Kapacitivne elektrode su korisne u liječenju dviju simetričnih tjelesnih površina. Treba koristiti elektrode koje su veće od površina dijela tijela koji će se liječiti, iz razloga da bi se silnice polja naginjale prema tom dijelu tijela, a širina polja minimalizirala.

Elektrode induktivne kratkovalne dijatermije (jače zastupljeno magnetsko polje), proizvode ujednačenije zagrijavanje površinskog i dubinskog mišićja, bez rizika od prekomjernog zagrijavanja kože i potkožnog masnog tkiva. Mikrovalna dijatermija je mnogo efikasnija kad je potrebno dubinsko zagrijavanje manje tjelesne površine. Istraživanjima je utvrđeno da su elektrode s izravnim dodirom učinkovitije od razmaknutih, jer omogućuju jednoliko zagrijavanje. Bolesnikov ugodan osjećaj topline najbolji je mogući pokazatelj za prilagodbu doze kratkovalne i mikrovalne dijatermije.

(Ivo Jajić i suradnici, 2000)

## 10.5 Klinička primjena dijatermije

Osnovni učinak kratkovalne i mikrovalne dijatermije je povećanje temperature tkiva. (Ivo Jajić i suradnici, 2000)

### 10.5.1 Indikacije za primjenu dijatermije

Jedna od glavnih indikacija za primjenu kratkovalne i mikrovalne dijatermije su degenerativne bolesti zglobova i posttraumatska stanja u zglobovima. Svrha terapije je poboljšanje raspona pokreta u zglobu, smanjenje ukočenosti i povećanje rastegljivosti kontrakture. U subakutnoj fazi traumatskog artritisa, kratkovalna dijatermija može poboljšati cirkulaciju i ubrzati resorpciju upalnog eksudata, kao npr. kod subakutnog kroničnog epikondilitisa. (Ivo Jajić i suradnici, 2000)

Nakon ozljede zgloba, može doći do razvoja kontrakture zbog periartikularne fibroze, koja je posljedica proliferacije vezivnog tkiva. Taj proces zahvaća zglobnu čahuru, ligamente i tetive, te dovodi do posljedičnog otvrdnuća i skraćenja tih struktura. Kao konačna posljedica se javlja ograničenje opsega pokreta u zglobu. Primjenom dijatermije, uz zagrijavanje tkiva do 45 °C, i primjenom neprekidnog vlačnog opterećenja dolazi do produljenja tetiva u zglobu koji se nalazi u kontrakturi. Pri takvim temperaturama, u usporedbi s nižim temperaturama, produljenje tetiva je najjače, uz najmanje oštećenja.

Nadalje, selektivno zagrijavanje oštećenog mišića može ubrzati apsorpciju hematoma. Lehmann je prvi koji je to potvrdio na eksperimentalnim životinjama (svinjama). U njegovom istraživanju su umjetno stvoreni hematomi u mišićima biceps femoris kod svinja, bilateralnim injiciranjem krvi označene radioaktivnim kromom. Mišić na jednoj strani je bio izložen mikrovalnoj dijatermiji frekvencije 915 MHz, a mišić druge strane je korišten kao kontrola. Temperatura tkiva na strani primjene dijatermije je porasla na vrijednosti između 42 °C i 45 °C, da bi došlo do maksimalne vazodilatacije. Analizom koncentracije radioaktivnog izotopa, utvrđeno je da je na strani primjene dijatermije njegova koncentracija značajno manja. (A. Giombini, V. Giovannini, A. Di Cesare, 2007)

Nadalje, dijatermija se može primijeniti i kod kroničnih upalnih bolesti zdjelice, degenerativnih bolesti zglobova, ankilozantnog spondilitisa i drugih kroničnih reumatskih stanja.

(Ivo Jajić i suradnici, 2000)

### 10.5.2 Hipertermija inducirana mikrovalnom dijatermijom u liječenju mišićno-tetivnih ozljeda

Hipertermija inducirana mikrovalnom dijatermijom dovodi do povećanja temperature tkiva između 41,5 °C i 45 °C. Hipertermija se koristi u onkologiji i fizikalnoj medicini. Za postizanje hipertermije se uglavnom primjenjuje mikrovalna dijatermija frekvencije između 434 MHz i 925 MHz. Primjenom mikrovalne dijatermije moguće je postići hipertermiju tkiva na dubini od 1- 4 cm. Dubina zagrijavanja tkiva ovisi o frekvenciji mikrovalnog zračenja, duljini ekspozicije tkiva i količini vode u tkivu. Tkiva koja imaju veći postotak vode se brže i jače zagrijavaju zbog velike dielektrične konstante vode, a posljedično tome i dubina penetracije zračenja je veća. Nadalje, stupanj zagrijanosti tkiva također je povezan s rasipanjem topline, do kojeg dolazi zbog tzv. efekta „ispiranja“, koji je pak povezan s povećanom prokrvljenosti tkiva. Naime, kada temperatura tkiva naraste s 36 °C na 45 °C, prokrvljenost tkiva se poveća 15 puta.

#### *10.5.2.1 Toplinski učinci*

Najvažniji fiziološki učinak induciran hipertermijom je povećanje prokrvljenosti tkiva. Do povećanja prokrvljenosti tkiva dolazi zbog vazodilatacije, koja je pak posljedica aktivacije termoregulacijskog centra u hipotalamusu, te posljedičnog pojačanog otpuštanja vazoaktivnih tvari, bradikinina i histamina. Povećanje prokrvljenosti je zamjetno u slučaju porasta temperature tkiva iznad 41,5 °C.

Hipertermija uzrokuje ubrzanje svih metaboličkih procesa u zagrijanom tkivu, te posljedično postoji povećana potreba za hranjivim tvarima i kisikom. Hranjive tvari i kisik su potrebni za reparaciju ozlijeđenog tkiva, a hipertermija uzrokuje povećanje prokrvljenosti, te samim time i povećanu dopremu tih tvari do ozlijeđenog tkiva, što dovodi do ubrzane reparacije ozlijeđenog tkiva. Primjenom hipertermije, u ozlijeđenom tkivu, dolazi do ubrzane normalizacije pH. Posljedično vazodilataciji, uspostavlja se bolja drenaža ozlijeđenog područja, pa je i resorpcija hematoma brža.

Toplina dovodi do pojačane aktivnosti ATP- aze u mišićima, što posljedično dovodi do poboljšanja kontraktilnosti mišićnih vlakana. Hipertermija ima i analgetski učinak u ozlijeđenim tkivima. Točan mehanizam analgetskog djelovanja hipertermije nije poznat. Za sad postoje dvije teorije: metabolička i neurološka. Prema metaboličkoj teoriji analgezija nastaje posljedično ubrzanom uklanjanju medijatora upale iz ozlijeđenog tkiva što dovodi do smanjenog podraživanja slobodnih živčanih završetaka u tkivu. Prema neurološkoj teoriji analgezija nastupa zbog smanjene brzine provođenja živčanih impulsa, koja je uzrokovana hipertermijom.

#### *10.5.2.2 Netoplinski učinci*

Ti učinci u tkivu nastaju kao posljedica interakcije između elektromagnetskog polja i specifičnih receptorskih molekula. Elektromagnetsko polje uzrokuje reverzibilne promjene intermolekulskih i intramolekulskih veza, što dovodi do promjene oblika tih struktura i posljedično, promijenjene biološke aktivnosti. Za sada nema dokaza koji bi upućivali da netoplinski učinci hipertermije imaju značajnu ulogu u terapijskoj primjeni.

#### *10.5.2.3 Značajke mišićno- tetivnih ozljeda*

Prilikom ozljede mišića, intracelularno dolazi do gubitka zaliha energije, pojave oksidativnog stresa i nakupljanja intracelularnog $Ca^{2+}$. Gubitak zaliha energije, tj. sniženje koncentracije ATP-a dovodi do povećane propusnosti stanične membrane. Zbog toga dolazi do povećanog izlaska staničnih enzima, koji uzrokuju oštećenje okolnih stanica. Lokalna hipertermija, zbog

vazodilatacije, dovodi do povećanja koncentracije kisika i hranjivih tvari u oštećenom tkivu, što omogućuje povećanje koncentracije ATP- a, koji je neophodan za oporavak tkiva.

Oksidativni stres također uzrokuje oštećenje stanica, a glavni medijatori koji dovode do oštećenja su slobodni radikali. Slobodni radikali uzrokuju oštećenje stanica lipidnom peroksidacijom. Hipertermija uzrokuje aktivaciju proteina toplinskog šoka (HSP- heath shock proteins), koji djeluju protektivno i sprječavaju oštećenje stanica slobodnim radikalima.

Nakupljanje intracelularnog $Ca^{2+}$ dovodi do aktivacije kalcij ovisne proteaze (kalpain I i II), aktivacije lizosoma i lipolitičkih enzima. Svi ti procesi dovode do stanične degeneracije. Hipertermija dovodi do ubrzanog uklanjanja viška kalcija iz ozlijeđenog tkiva zbog vazodilatacije i povećanja krvnog protoka.

Kod oštećenja tetiva hipoksija je glavni patofiziološki proces koji dovodi do degeneracije. Hipertermija, zbog vazodilatacije i povećanja krvnog protoka, povećava opskrbu kisikom i ubrzava cijeljenje tkiva.

(A. Giombini, V. Giovannini, A. Di Cesare, 2007)

## 10.6 Opasnost od kratkovalne i mikrovalne dijatermije

Opasnosti kod primjene dijatermije su različite, a mogu biti izazvane visokim stupnjem izlaganja tkiva bolesnika ili fizioterapeuta dijatermiji. (Ivo Jajić i suradnici, 2000)

### 10.6.1 Mjere opreza i kontraindikacije

Sve metalne naprave se moraju ukloniti izvan elektromagnetskog polja za vrijeme primjene kratkovalne i mikrovalne dijatermije. Svi vanjski metalni predmeti, kao npr. bolesnikov nakit ili bilo koji drugi dio odjeće ili obuće koji sadrži metal, se mora ukloniti za vrijeme primjene terapije. Nadalje, svi okolni metalni predmeti koji bi se za vrijeme primjene terapije mogli naći u području djelovanja elektromagnetskog polja moraju se ukloniti. Također, žene s ugrađenim metalnim napravama u maternici ne smiju biti izložene dijatermiji u lumbalnom, abdominalnom i zdjeličnom području. Osim djelovanja na metalne naprave, elektromagnetsko polje može interferirati i s medicinskim uređajima, kao npr. EEG, EKG, EMG, pacemaker, te dovesti do njihovog kvara. Iz tog razloga bi trebalo izbjegavati primjenu elektromagnetskog polja u blizini takvih predmeta. Ukoliko se neki od tih uređaja, ili njihovi pojedini dijelovi, kao npr. elektrode ili žice nađu u području djelovanja elektromagnetskog polja, može doći do pojave neugodnih parestezija ili žarenja. Nadalje, elektromagnetsko polje

može dovesti do kvara pacemakera, zbog elektromagnetske interferencije, što može prouzročiti pojavu srčanih aritmija, ventrikulsku fibrilaciju ili asistoliju. Važno je naglasiti da do interferencije između elektromagnetskog polja i pacemakera može doći ako se uređaj nađe unutar 4,5 metara od izvora elektromagnetskog zračenja. Napretkom tehnologije značajno je smanjena osjetljivost pacemakera na elektromagnetsko polje. (Ivo Jajić i suradnici, 2000)

### 10.6.2 Opekline

Opekline mogu nastati kao posljedica prevelike doze zračenja, ali u nekim slučajevima mogu nastati i pri primjeni terapijskih doza. Primjenom kapacitivnih elektroda kod kratkovalne dijatermije, potkožno masno tkivo se puno lakše zagrije nego mišićno tkivo. To je posljedica slabijeg protoka krvi kroz masno tkivo, ali i različitog intenziteta električnog polja u mišićnom i masnom tkivu. To se može objasniti na način da ako se u električno polje $E_0$ stavi dielektrik, kao npr. mišić ili masno tkivo, dolazi do usmjeravanja električnih dipola molekula. Tako usmjereni električni dipoli stvaraju polje induciraju polje $E_i$ koje se suprotstavlja primjenjenom električnom polju. Kao rezultat nastaje električno polje u dielektriku $E_d$, koje je slabije od $E_0$. Iz navedenog se može zaključiti da je:

$$\frac{E_0}{E_d} \sim \varepsilon_r$$

gdje je $\varepsilon_r$ relativna dielektrična konstanta medija.

Na granici između masnog i mišićnog tkiva će vrijediti:

$$\varepsilon_{r\ mast} E_{mast} = \varepsilon_{r\ mišić} E_{mišić} \sim E_0$$

Odnosno:

$$E_{mast} = \frac{\varepsilon_{r\ mišić}}{\varepsilon_{r\ mast}} E_{mišić}$$

Pri frekvencijama koje se primjenjuju u kratkovalnoj dijatermiji, omjer između ta dva koeficijenta je takav da je električno polje u masnom tkivu jače nego u mišiću. Budući da je apsorbirana energija proporcionalna kvadratu jačine električnog polja, energija apsorbirana u masnom tkivu je osam puta veća nego u mišiću.

Kod mikrovalne dijatermije, električno polje je paralelno s graničnom površinom između masnog i mišićnog tkiva, te posljedično tome vrijedi da je $E_{mast} = E_{mišić}$. U tom slučaju mišić apsorbira više energije nego mast, iako je efikasnost terapije smanjena, jer nema terapijske vrijednosti u zagrijavanju masnog tkiva. Točna procjena povećanja temperature u tkivu je zbog različitih varijabli dosta teška i nepouzdana. Iz tog je razloga, u pretilih pacijenata, najsigurnije primijeniti kratkovalnu dijatermiju s elektrodama koje stvaraju dominantno

magnetsko polje (npr. zavojnice). Ta metoda je najpogodnija za zagrijavanje dubokog tkiva, bez velikog rizika od razvoja opeklina masnog tkiva.

Pri mikrovalnoj dijatermiji glavni mehanizam zagrijavanja tkiva je zagrijavanje vode djelovanjem elektromagnetskog zračenja. Posljedično tome, vrlo je bitno da je omogućena perspiracija kože, jer kapljice znoja na koži se vrlo brzo zagriju na visoku temperaturu u elektromagnetskom polju, te može doći do pojave opeklina. Zato je potrebno ukloniti svu odjeću s mjesta na kojem se dijatermija primjenjuje.

(Vincent Delpizzo & Kenneth Henry Joyner, 1987)

### 10.6.3 Ostale mjere opreza i kontraindikacije

Oko, organ s velikim postotkom vode, iznimno je osjetljivo na primjenu mikrovalne dijatermije. U eksperimentima na životinjama je dokazan razvoj katarakte nakon ekspozicije oka mikrovalnom zračenju. Također mogu nastati i oštećenja mrežnice. Iz tog razloga treba izbjegavati izloženost oka mikrovalnoj dijatermiji.

Treba biti oprezan kod primjene dijatermije na zglobove s izljevom, zbog suvišaka tekućine u tim zglobovima. Normalna intraartikularna temperatura sinovijalnih zglobova iznosi između 30 °C i 31 °C. Istraživanjima je dokazano da povećanje temperature od 5 °C dovodi do četiri puta brže enzimske razgradnje hrskavice, posredovanjem enzima kolagenaze.

Kod primjene dijatermije u terapiji, treba izbjegavati zagrijavanje područja s aktivnom upalom, jer postoji mogućnost razvoja nekroze tkiva.

Opasno je zagrijavanje ishemičnih tkiva, jer povećanjem temperature u tkivu raste i metabolička potražnja tkiva, a ukoliko insuficijentna cirkulacija ne može zadovoljiti te povećane metaboličke potrebe, može doći do razvoja nekroze tkiva. U cilju izbjegavanja takvog ishoda, u ishemičnim tkivima je potrebno prilagoditi vrijeme kroz koje se tkivo zagrijava i jačinu zagrijavanja. Alternativna metoda kojom se može izbjeći prekomjerno zagrijavanje ishemičnog tkiva je primjena terapije blizu mjesta ishemije. Na taj način može doći do konsenzualnog povećanja distalnog protoka krvi zbog refleksne vazodilatacije u zahvaćenom području. Što je veća površina koja se zagrijava, veća je i konsenzualna reakcija. Općenito se dijatermija ipak ne primjenjuje u slučaju ishemije ekstremiteta.

Dijatermija dovodi do povećanja protoka krvi kroz tkivo zbog vazodilatacije, te posljedično tome, ne smije se primjenjivati kod osoba kod kojih postoji povećana sklonost hemoragiji, npr. osobe s hemofilijom.

(Ivo Jajić i suradnici, 2000)

Istraživanja na životinjama su pokazala da dijatermija ima štetan učinak na gonade, s time da su testisi jače osjetljivi nego jajnici, zbog površinske lokacije. Iz tog razloga treba izbjegavati izlaganje testisa kratkovalnoj i mikrovalnoj dijatermiji. Kratkovalna dijatermija može dovesti do jačeg oštećenja jajnika, zbog dubljeg prodora u tkivo.

Nadalje, dijatermija se ne bi smjela primjenjivati na abdominalno ili zdjelično područje trudnica, zbog mogućih oštećenja fetusa toplinom. Istraživanja provedena na životinjskim fetusima pokazala su da povišenje temperature od 2,5 °C za vrijeme organogeneze može dovesti do kongenitalnih anomalija središnjeg živčanog sustava. Eksperimentalnih podataka o učinku dijatermije na ljudski fetus nema. Postoje retrospektivne i prospektivne studije u kojima se istraživao utjecaj febriliteta majki, u prvom trimestru trudnoće, najprije na embrij, a kasnije fetus. Tim studijama je utvrđeno da hipertermija ima sličan teratogeni učinak na plod, kao i kod životinja. Rubin i Erdman, 1983. godine , prikazali su četiri slučaja pacijentica koje su bile izložene mikrovalnoj dijatermiji za vrijeme trudnoće zbog kronične zdjelične upalne bolesti. U tri slučaja nije zabilježen nikakav negativan učinak na tijek i ishod trudnoće, dok je u jednom slučaju došlo do pobačaja. Unatoč tim rezultatima i dalje nije poznato da li na ljudski fetus može djelovati mikrovalno zračenje pri klinički uporabljivim vrijednostima.

(Vincent Delpizzo & Kenneth Henry Joyner, 1987)

Kod primjene kratkovalne dijatermije na kosti u djece, postoji mogućnost poremećaja rasta kostiju zbog zagrijavanja epifiza. Istraživanja na životinjama su pokazala da kratkovalna dijatermija može imati i pozitivan i negativan učinak na rast kostiju. Kod primjene kratkovalne dijatermije na kost, kost se ne zagrijava pretjerano ako je prekrivena debljim slojem mekog tkiva.

Na temelju istraživanja utvrđeno je da nema opasnosti od nuspojava za fizioterapeuta koji radi s uređajima, ukoliko se poduzmu određene mjere. Do nuspojava neće doći ako je fizioterapeut tokom rada udaljen od površine elektroda barem jedan metar. (Ivo Jajić i suradnici, 2000)

# 11 Zahvale

Zahvaljujem mentorici doc.dr.sc. Sanji Dolanski Babić na pomoći pri izradi ovog rada. Također zahvaljujem obitelji i svim mojim prijateljima na podršci tijekom cijelog mog školovanja, a osobito za vrijeme studija.

# 12 Literatura


1. Barnes, F.S., & Greenebaum, B. (2006). *Biological and Medical Aspects ofElectromagnetic Fields*. CRC Press.
2. Brković, N., & Pećina, P. (2010). *Fizika u 24 lekcije, priručnik za pripremu državne mature*. Zagreb: Element.
3. Brnjas-Kraljević, J., & Krilov, D. (2009). *Fizika i biofizika za studente medicine.* Zagreb.
4. Browne, M. E. (1999). *Theory and problems of Physics for Engineering and Science*. McGraw- Hill.
5. Cindro, N. (1988). *Fizika 2, Elektricitet i magnetizam*. Zagreb: Školska knjiga.
6. Delpizzo, V., & Joyner, K. H. (1987). *On the Safe Use of Microwave and Shortwave Diathermy Units*. The Australian Journal of Physiotherapy. Vol. 33, No. 3.
7. Di Cesare, A., & Giovaninni, V., & Giombini, A. (2007). *Hyperthermia induced by microwave diathermy in the management of muscle and tendon injuries*. British Medical Bulletin. Vol. 83, No. 1, Pp. 379- 396.
8. Jajić, I., & suradnici. (2000). *Fizikalna medicina i opća rehabilitacija*. Zagreb: Medicinska naklada.
9. Polk, C., & Postow, E. (1996). *Handbook of Biological Effects of Electromagnetic Fields*. CRC Press.
10. Serway, R. A., & Jewett, J. W. (2004). *Physics for Scientists and Engineers*. Thomson Brooks/ Cole.
11. Stuchly, M. A. (2002). *Biological effects of electromagnetic fields*. International Journal of Bioelectromagnetism. Vol. 4, No. 2, Pp. 157- 160.
12. Šporer, Z., & Kuntarić, A. (1995). *Repetitorij fizike*. Zagreb: Školska knjiga.

# 13 Životopis

Rođen sam 20. studenog 1990. godine u Varaždinu. Osnovnu školu pohađao sam u Tužnom, mjestu u kojem sam odrastao. Srednjoškolsku naobrazbu stekao sam u Prvoj gimnaziji Varaždin, prirodoslovno matematički smjer, koju sam upisao 2005. godine. U drugom razredu bio sam na državnom natjecanju iz biologije, u Šibeniku, na kojem sam osvojio šesto mjesto. 2009. godine sam maturirao, te upisao Medicinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu.