

VARNOST PRI SLIKANJU Z MAGNETNO RESONANCO

Pri obravnavanju varnosti oziroma potencialnih nevarnosti slikanja z MR moramo upoštevati tri skupine ljudi: paciente, osebje in ostale, ki pridejo v stik z aparatom ali njegovo bližino. V tem poglavju se bomo podrobno ukvarjali z nevarnostmi, ki izhajajo iz narave MR aparata in poteka meritve. Posvetili se bomo vplivu aparata na nebiološke materiale in možnim biomagnetnim interakcijam. Razložili bomo mehanizem učinkovanja, ob tem pa bomo posebej ločili tri primere: a) učinek je škodljiv, b) učinek je zaznaven, vendar v pogojih MR slikanja ni nevaren in c) učinek je zaznaven le pri višjih poljih ali gradientih magnetnega polja oziroma pri močnejših in hitrejših pulzih (1).

1. NEMAGNETNE NEVARNOSTI MR SISTEMA

Potencialna nevarnost MR slikanja so kontrastna sredstva, ki jih danes v svetu uporabljajo v približno 30% preiskav. O Gd-DTPA, ki je najdalj v klinični rabi je dostopna izjemno dobra statistična slika z blagimi stranskimi učinki na majhnem številu pacientov, znan je le en dokumentiran primer resne reakcije. Seveda je potencialna nevarnost elektronika MR aparata in njegovi mehanski deli, ki morajo biti izdelani v skladu s standardi za medicinske aparate. Specifična nevarnost te vrste je zelo redek pojav sesutja polja superprevodnega magneta. To se zgodi v primeru, ko se žice magneta, ki so potopljene v tekoči helij na nekem delu segrejejo in jim zraste električna upornost. Sprosti se Joulova toplota ($P=I^2 R$), ki povzroči izparitev tekočega helija, ki ga je več sto litrov. To se zgodi v nekaj sekundah in zato pretežno nevarnost zadušitve. Pri dosedaj edinem kontroliranem sesutju so imeli v tomografu uspanega prašiča, ki se mu zaradi ustrezne ventilacije ni zgodilo nič.

NEVARNOSTI, KI IZVIRAJO IZ MAGNETNIH POLJ

2.1. Magnetni vplivi na nebiološke materiale

Magnetno polje vpliva na predmete v magnetu in njegovi okolici s privlakom, če so feromagnetni ali z inducirano napetostjo v ostalih prevodnikih. Privlak feromagnetnih materialov je edina do sedaj znana resna nevarnost slikanja z MR. Veliki feromagnetni predmeti (vlakci, avtobusi) v neposredni bližini magneta tudi vplivajo na homogenost polja na kar moramo paziti pri postavitvi aparata.

Na primeru izvijača si oglejmo vpliv magnetnih polj na feromagnetne materiale. Sila, ki ga bo poskušala izravnati s smerjo magnetnega polja povzroča navor. Nato se bo začel pomikati proti magnetu. Izmerili so da sila narašča z visoko potenco razdalje in da za izvijač 7.5 cm dolg s 3 mm premerom in težo 4.2 g (0.042N) zahteva kompenzacijo 6 N (torej 150 kratno silo teže). Prosto gibajoč proti magnetu s poljem 1 T je razvil hitrost 61

km/h. Hitrost je neodvisna od teže premeta, sila pa je z njo sorazmerna in doseže pri večjih vrednostih (kisikova bomba) velikanske vrednosti. Iz teh podatkov je očitno zakaj so feromagnetni projektili velika nevarnost slikanja z MR. Posebej moramo biti pozorni, da v bližino magneta ne prinesemo škarij, skalpelov, ključev, kemičnih svinčnikov... Tudi zagotovilo proizvajalca, da snov ni feromagnetna se ujema z dejstvi le v 40% primerih. Osebe mora biti tudi pozorno, da ne slikajo pacientov, za katere pričakujejo, da imajo feromagnetne implantate. Preglednica podaja materiale, ki so zagotovo kontraindikacija za slikanje z MR (2).

Varnost pacientov s srčnimi vzpodbujevalci je pritegnila veliko pozornosti. Za razliko od vzpodbujevalcev starejšega datuma, ki stalno stimulirajo bolnikovo srce, moderni aparati le spremljajo srčni utrip in se vključijo ob nepravilnostih. Magnetno polje nad 0.01 T zmoti ravnovesje in vključi vzpodbujevalec. V glavnem ta deluje normalno, vendar moramo upoštevati, da je taka motnja za pacienta, ki ima tako ali tako težave s srcem to potencialna nevarnost, ko je v bližini magneta. Samo slikanje teh pacientov pa je seveda zaradi feromagnetnih komponent zelo nevarno. Preglednica kaže tipičen vprašalnik, ki ga dobi pacient v MR centru, da se izognemo nesreči (3).

2.2. Biomagnetne interakcije

Do sedaj smo omenjali zgolj posredne možne nevarnosti. Biomagnetne interakcije so tiste, kjer statično, počasi se spreminjajoče ali RF polje direktno vpliva na telo oziroma njegove organe in tkiva.

Statična magnetna polja

Če se prevodnik pomika pravokotno na smer magnetnega polja, se v njem inducira električna napetost. Na tem principu deluje generator izmeničnega električnega toka. Žile v telesu po katerih se pretaka kri, ki je slabši električni prevodnik večinoma tečejo vzporedno s smerjo magnetnega polja. Srčna aorta je največja žila, ki je pravokotna na smer magnetnega polja. Ocena za inducirano napetost da:

kjer prvi integral definira inducirano napetost kot vsoto sprememb magnetnega pretoka. Za polje $B = 1.5 \text{ T}$ in tisto površino S , ki ima premer žile $d = 0.025 \text{ m}$ in hitrost toka krvi 0.63 m/s dobimo $U = 25 \text{ mV}$. Podobno vrednost potenciala so izmerili z EKG.

V literaturi ni podatkov o škodljivih posledicah te inducirane napetosti, ki izgine takoj po odstranitvi osebe iz magnetnega polja. Naštejmo še nekaj bioloških vplivov magnetnega polja:

- a) magnetna anizotropna susceptibilnost je pomembna pri molekulah, subceličnih enotah in celo celicah. Primer so molekule DNA, retina v očesnih paličicah, srpaste

rdeče krvničke. Magnetizacijska energija subceličnih in celičnih struktur ($W = \mu_M B$) začenja presegati normalno termično energijo pri poljih nad 10 T.

- b) difuzija ionov je spremenjena v magnetnem polju, saj se njihovo gibanje spremeni zaradi magnetne sile ($F = e B \times v$). Za 10% zmanjšanje prevodnosti signala po živcih bi potrebovali polje 24 T.
- c) magnetohidrodinamični učinek: Elektrodinamična interakcija med statičnim magnetnim poljem in električno prevodnostjo tekočine pripelje do zaustavljanja pretoka, kar bi lahko vplivalo na pritisk potreben za spremembo količine krvi, ki pride do perifernih organov. Zmanjšanje pretoka se mora kompenzirati s povečanim pritiskom, vendar so teoretični računi in eksperimenti pokazali, da je ta učinek zanemarljiv pri poljih do 1.5 T. Pri poljih okrog 6 T je treba pričakovati okrog 10 % povečanje pritiska.
- d) v literaturi obstaja večje število opazovanj ljudi in živali izpostavljenih magnetnemu polju, vendar nekateri rezultati, ki govorijo o zvišanju telesne temperature ali slabšega počutja niso ponovljivi.

Počasi se spreminjajoča magnetna polja zaradi gradientov

Glavna posledica počasi se spreminjajočega magnetnega polja zaradi gradientov je inducirana električna napetost, ki požene vrtilne tokove. V ozkem svitku z radijem r in debelino dr in hitrostjo spreminjanja polja dB/dt velja za dolžinsko gostoto toka:

Zgornja ocena za svitek z največjim radijem, ki obkroža telo $r = 0.1$ m, $\sigma = 0.2$ Si/m da vrednost $J = 1 \mu A/cm^2$ za $dB/dt = 1$ T/s. Iz enačbe vidimo, da bo največji tokel po površini telesa. Sicer pa je bila to zgolj približna ocena, saj ne vemo po kakšnem svitku bo tok tekel, oziroma ali se pojavijo sečišča različnih tokovnih zank. Primeri, ko bi vpliv spremenljivih magnetnih polj lahko bil pomemben: a) svetlikanje v očeh, b) zaraščanje kosti, c) stimulacija mišic, d) fibrilacija srca. Ti vplivi so kompleksna funkcija amplitude polja, časa trajanja in časa ponavljanja pulzov vendar dosedanja raziskovanja niso dovolj natančno opisala te odvisnosti. Spodaj so naštetih nekateri eksperimentalni rezultati, ki lahko služijo za omejitev uporabe prevelikih in prehitrih gradientov magnetnega polja v MR tomografih.

- a) prag za pojav svetlikanja je približno 2 T/s pri uporabi pulzov daljših od nekaj milisekund, vendar jih ne moremo izzvati s kratkimi pulzi (reda mikrosekunde) celo ne v poljih do 210 T/s. Pojav svetlikanja se ne smatra za škodljivega.
- b) zaraščanje kosti lahko stimuliramo, če tuljavo postavimo nad mesto frakture. Gostota inducirane toka mora biti okrog $10 \mu A/cm^2$ za vsak pulz pri frekvenci 30-60 pulzov v sekundi.

- c) spremenljivo magnetno polje lahko stimulira mišično aktivnost, vendar so potrebne gostote toka ki so za 10^6 večje kot tiste, ki jih proizvajajo gradienti magnetnega polja pri MR tomografih.
- d) fibrilacija srca je največja potencialna nevarnost pri uporabi spremenljivih magnetnih polj. Toda, najnižja gostota inducirane toka s katero se ta efekt lahko izzove je okrog $300 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, kar je nekaj sto krat več kot uporabljamo pri slikanju z MR.

Za konec lahko rečemo, da je zelo majhna verjetnost katerega koli učinka spremenljivega magnetnega polja pri rutinski uporabi MR tomografa, kjer so maksimalni gradienti 5 - 10 mT.

Radiofrekvenčna magnetna polja

Z dobro uglasitvijo tuljav dosežemo, da telo pri MR slikanju obsevamo le z magnetno komponento RF polja, tako da je dielektrična absorbcija zaradi električnega polja izločena. Vpliv RF polja na tkiva je termičnega značaja zaradi toka, ki ga v tkivih RF inducira. Posledica je absorbirana moč oziroma specifična absorpcijska stopnja (SAR). V normirano enačbo za moč vstavimo enačbo za vrtilni tok, ki smo jo izpeljali prej:

V k ($6.81 \cdot 10^{-13}$) smo všteli amplitudo B_1 in geometrijske faktorje. Pri meritvi večje skupine prostovoljcev, ki so bili za 20 minut obsevani z $4\text{W}/\text{kg}$ moči in polju 1.5 T in vsestransko zdravstveno spremljani so ugotovili, da se utrip srca, dihanje in jakost metabolizma niso spremenili. Telesna temperatura v notranjosti se je povečala za neznatnih 0.3 stopinje, kar je malo v primeru z dnevnim nihanjem 1-2 stopinj. Največ se poveča po pričakovanju temperatura kože v abdominalnem predelu (2 stopinji). Nevarnost za opekline nastopi pri 5 stopinjah več. Meje, ki so jih za RF moči za slikanje z MR določile mednarodne zdravstvene organizacije so bistveno nižje od opisanih.

TABELA: Varnostne omejitve možnih biomagnetnih učinkov slikanja z MR

DRŽAVASTATIČNO POLJEdB/dtRF (SAR)ZDA2.0 T3 T/s0.4 W/kg (celo telo)

2 W/kg (pod površinsko tuljavo)Velika Britanija2.5 T20 T/s (za pulze daljše kot 10 ms)

0.4 W/kgNemčija2.0 T3 T/s (za pulze daljše kot 10 ms)1 W/kg (celo telo)

5W/kg (pod površinsko tuljavo razen oči)

POVZETEK

1. *Potencialne nevarnosti pri slikanju z magnetno resonanco izvirajo iz treh možnih vzrokov: statično magnetno polje, spremenljivo magnetno polje zaradi gradientov magnetnega polja in radiofrekvenčno obsevanje s pulzi.*
2. *Vsi trije možni vzroki so bili intenzivno raziskovani in določene meje varnosti, ki so postavljene bistveno pod pragom opaženih učinkov.*
3. *Edina resna nevarnost so feromagnetni projektili v magnetnem polju in pacienti s srčnimi vzpodbujevalci in nekaterimi implanti.*

Literatura:

1. L.C.Pertain et al. (1988), Magnetic Resonance Imaging, W.B.Sounders Company.
2. F.G. Shellock, J.V.Cruess III, Safety of MRI in patients with metallic implants of foreign bodies, Applied Radiology, nov.1992, 44 - 48.
3. Zahvaljujem se Milanu Čehu, vodji tehnikov na Oddelku za slikanje z MR, Inštitut za radiologijo, ki mi je odstopil vprašalnik za paciente.

Franci Demšar,

Inštitut Jožef Stefan in Inštitut za Radiologijo, KC

Ljubljana 7.10.1993