

A „Szorzat Preisach Modell”-ben tehát az irreverzibilis hiszterézist is tartalmazó mágnesezettség egy felmenő ágát leíró egyenlet alakja:

$$m(H) = B_s \left(\beta H + \int_{b_0}^H db \varphi(b) \int_{b_0}^b db' \varphi(-b') \right).$$

Több fordulópontos mágneses tér program esetén – mutatis mutandis – a hagyományos modell szerint egymás után felfűzve számíthatjuk ki az egyes szakaszokra vonatkozó integrálokat. A 11. ábrán az így kiszámított mágnesezési görbék láthatók, hasonló módon és hasonló paraméterekkel kiszámítva, mint a 10. ábra egybevágó alhurkjai. Itt azonban az azonos határok közötti alhurkok nem egybevágóak és a fordulóponti kezdő iránytangens nem nulla. Mind a 10. ábra, mind a 11. ábra függvényeinek kiszámítása során a

$$P(b, b') = \varphi(b) \varphi(-b')$$

alakú egyszerűsítő feltevést alkalmaztuk ahol

$$\varphi(b) = 3 \exp\left(\frac{(b - 0,2)^2}{0,3}\right)$$

Gauss-függvény alakú haranggörbe.

Összefoglalás

Javaslatot tettünk a telítéssel járó hiszterézisjelenségek könnyebb fizikai értelmezését felkínáló szorzat modell bevezetésére a hagyományos skaláris Preisach-modell feltevéseinek módosításával. Ezzel a módosítással lépést tettünk abba az irányba, hogy az empirikus mérnöki számítási eszköz a fizikai folyamatok leírására és értelmezésére is alkalmasabb legyen.

A hagyományos, mágneses tértől függő differenciális szuszceptibilitást szorzat alakban állítottuk elő. A szorzat egyik tényezője explicit módon függ magától a mágnesezettségtől, ezzel a mágnesezési görbék aszimptotikus telítési jellegét emeltük ki. A szorzat-függvény csupán mágneses tértől függő másik tényezője a mágnesezettség reverzibilis és irreverzibilis járulékeinak, azok egymáshoz való viszonyának teljesen újszerű tárgyalását jelenti. A Szorzat Preisach Mo-

dellben a kétféle járulék nem közvetlenül adódik össze egymástól független additív tagok formájában, hanem a külső tér aktuális értékétől függő reverzibilis járulék és a teljes mágneses előtörténettől függő irreverzibilis járulék a telítési nonlinearitást kifejező függvény argumentumában egymástól kölcsönösen is függő arányban járulnak hozzá a mágnesezettség aktuális értékéhez.

Az elemi mágneses egységek négyszög alakú hiszteronjainak (a hagyományos modellben posztulált) kétváltozós eloszlási függvényét az egyváltozós koerctív függvényvel képzett

$$P(b, b') = \varphi(b) \varphi(-b')$$

bilineáris szorzat alakjában állítottuk elő. A négyszöges elemi hiszterézishurok két ugrópontja ezzel természetes jelentést nyer, két különálló, egyenértékű, azonos függvényformával leírt (a külső tér irányába forduló) irányváltás együttes eredője. Ezzel a tényezőkre bontással az alkalmazott külső mágneses tér hatására végbemenő mágnesezési folyamatban a rendszer makroszkopikus mágnesezettségi állapotának hatását elkülönítettük az elemi mágneses egységek valószínűségi jellegű, egyedi irányváltásainak hatásától, amelyek mélyebb mikroszkópi szinten zajlanak le. Az irányváltások valószínűségét leíró, mérési adatokból kiszámítható $\varphi(b)$ koerctív függvény ilyen módon a vizsgált minta anyag-tudományi jellemzője lehet, amelynek az egyéb anyagi tulajdonságokhoz és paraméterekhez (szerkezeti jellemzők globális és mikroszkópi szinten, az elemi egységek – szemcsék, domének stb. – méretei, mechanikai, elektromos és mágneses paraméterei stb.) való viszonyát vizsgálva új ismeretekre, új összefüggések felismerésére nyílik lehetőség.

Irodalom

1. A. Aharoni: *Introduction to the Theory of Ferromagnetism*. Oxford Science Publications, Oxford, 2000.
2. Simonyi Károly: *Elektronfizika*. Tankönyvkiadó, Budapest, 1987.
3. Zs. Szabó, Gy. Kádár: Ferenc Preisach, the forgotten „Martian”, in *Preisach Memorial Book*. Akadémiai Kiadó Budapest, 2005. pp. 1–4.
4. F. Preisach, *Zeitschrift für Physik* 94(1935) 277.
5. Lord Rayleigh, *Phil. Mag.* 23(1887) 225.
6. G. Biorci, D. Pescetti, *Il Nuovo Cimento* VII(1958) 829.
7. D. H. Everett, *Trans. Faraday Soc.* 51(1953) 1551. és az ottani hivatkozások.
8. G. Kádár, *J. Appl. Phys.* 61(1987) 4013.
9. G. Kádár, *Physica Scripta* T25(1989) 161.

FÁJDALOMCSILLAPÍTÁS MÁGNESES TÉRREL

László János
MTA, Matematikai
Tudományok Osztálya

Tisztában vagyok vele, milyen veszélyes feladatra vállalkoztam, amikor ezt a cikket megírtam. A mágneses tér fájdalomcsillapító hatása ugyanis olyan téma, mint a napi politika. Ha kiforrott véleménye talán nincs is róla az embernek, de előítélete vele kapcsolatban biztosan van mindenkinek. Kevesen tudják

azonban, hogy az elmúlt 30 évben, a nukleáris mágneses rezonancia (NMR) módszernek az orvosi diagnosztikában történt meghonosodása és elterjedése óta jelentős tudományos erők foglalkoznak ezzel a területtel is. Hiszen nagyon is fontossá vált belátni, hogy a sztatikus mágneses tereknek nincsen a diagnózis

módszerével korreláló hatása. Ezért talán érdemes lesz felhívni a figyelmet a következőkben arra, hogy

- valóban létezik olyan sztatikus mágneses térkonfiguráció, amelynek szignifikáns fájdalomcsillapító hatása van, és ez a hatás
- biológiai jellegű, hiszen a szervezet (a sztatikus mágneses tér hatására) saját, belső rendszereit mozgósítja egy-egy patológikus folyamat leküzdésére.

Megalapozott remény körvonalazódik arra nézve, hogy kezünkbe kaphatunk egy olyan fájdalomcsillapító módszert, amely nem kevésbé hatékony, mint a konzervatív kezelés lehetőségei, viszont kevesebb mellékhatással járhat.

Ez a tipikusan interdiszciplináris tudományterület egyelőre a jelenségek megfigyelése és fenomenológikus leírása szintjén működik.

A problémakör

A jelentős fájdalommal járó betegségek Magyarországon közel 3 millió, világviszonylatban pedig sok száz millió ember életét keserítik meg, amennyiben kihatnak a beteg életvitelére, egészségügyi kiadásaira és életminőségére is. És akkor még nem említettük a táppénzes napokon kieső munkaórák és a kifizetett biztosítási díjak által az egész társadalomra nehezedő gazdasági terheket. Kiemelten nagy létszámú betegcsoport az öregedő népesség, illetve a már mozgáskorlátozottá vált betegek köre. Az emberiség egyharmada él át élete folyamán krónikus fájdalmat, amely az esetek többségében hónapokra, évekre, néha évtizedekre is elhúzódik.

A mozgásszervi megbetegedések egyre növekvő száma például az egész világot érintő probléma. A kérdés fontosságát az is alátámasztja, hogy 2000–2010-et a WHO (World Health Organisation = Egészségügyi Világszervezet) a „csont és ízület évtizedének” nyilvánította. A mozgásszervek (inak, izmok, ízületek, csontok) betegségei legtöbbször gyulladás, kopás és sérülés kapcsán kialakuló fájdalom képében jelentkeznek. A háziorvosi rendelőkben a betegek 20–25%-a mozgásszervi eredetű panasszal jelentkezik.

A neuropátiás fájdalmak az idegek, illetve az idegeket burkoló mielin-hüvely közvetlen sérülésére vezethetők vissza. Pusztán ilyen fájdalomtól világszerte mintegy 44–98 millió ember szenved nap, mint nap. A 98 millióba beleértjük azokat is, akik – vélhetően neuropátiás eredetű – alsó háttáji fájdalommal küzdenek, mint amilyen az isiász (másnéven Hexenschuß vagy lumbágó). Ezt a fajta fájdalmat is csillapítani kell, ami a sokféle lehetőség ellenére nagy kihívás a mai orvostudomány számára.

A fájdalomcsillapításra használt gyógyszerek más-más hatékonysággal és hatásmechanizmussal működnek, közös jellemzőjük azonban, hogy a szervezetben zajló gyulladást csökkentik. Bár a szerek hatásosak, alkalmazásuk átgondolása mégis különlegesen fontos napjainkban, hiszen nemcsak a mellékhatásokra, hanem a – sokszor áttekinthetetlenül bonyolult – kölcsönhatásokra is tekintettel kell lenni.

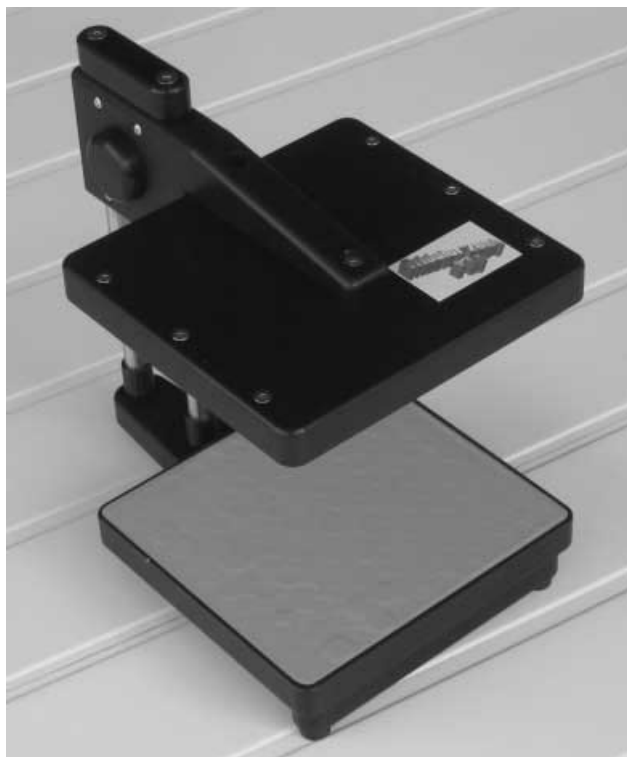
A lakosság érdeklődése eközben világszerte megnövekedett a természetes, gyógyszermentes gyógy módok, például a mágneses terápiák iránt. Hozzájárul ehhez az állami egészségügyben való csalódás, valamint a „wellness” hatásos marketingje is. A permanens mágneses terápiák nem bizonyították hatékonyságukat, noha számos gyakorlati előnyt kínálnak: az otthon végezhető, külön ráfordított időt nem igénylő (alvás közben alkalmazható), fájdalommentes, nem-invazív (műtéti beavatkozástól mentes), érintésmentes, azonnal ható és függőséget nem okozó kezelés lehetőségét. Ezek az eszközök nem igényelnek karbantartást, sem szakszerű kezelést, emberöltőnyit meghaladó a várható élettartamuk, nincs szükségük elektromosságra, nem tartalmaznak mozgó, kopó alkatrészt, és az átlagember számára is megfizethetőek. Nem utolsósorban pedig költséghatékonyak: egyetlen nap alatt 15–20 beteg is részesülhet kezelésben, következésképpen nagy mennyiségű fájdalomcsillapító, gyulladáscsökkentő gyógyszer ára is megtakarítható. Ha lenne olyan készülék, amely tudományos módszerekkel bizonyítottan fájdalomcsillapító hatású, akkor széles körben kerülne alkalmazásra minden olyan betegség esetén, amikor a hagyományos kezelés ellenjavallt.

Az előnyöket felismerve a piacon már évekkel ezelőtt megjelentek a „mindent gyógyító” állandó mágneses eszközök, a mágneses ékszer, mágneses ágy-neműk, derékpántok stb. Ezek bárminemű élettani hatása vitatható, és az ajánlásukban szereplő érvek inkább az áltudomány kategóriába sorolhatók.

Egy konkrét megoldási javaslat

Kutatásaim kezdetén tényeket akartam kapni arra nézve, hogy ezen eszközök nem kizárólag pszichoszomatikus, hanem élettani hatásúak is. Korábbi kutatásaim a termonukleáris fúziós reaktorok (stellarátor) területén itt jól alkalmazható, a sztatikus mágneses terekkel kapcsolatos háttértudást biztosítottak számomra. A tudományos irodalom tanulmányozása során körvonalazódott, hogy a téma legalább 30 éves, hiszen a kutatók azóta foglalkoznak ezzel, amióta a nukleáris mágneses rezonancia módszer bekerült az orvosi diagnosztikába. Úgy látszott az irodalomból, hogy ha van is élettani hatás, azt vagy nagyon erősen inhomogén mágneses térrel, vagy nagyon erős homogén mágneses térrel lehet elérni.

Hamarosan elkészült az első készülék (1. ábra), amely 10×10 mm-es neodímium-vas-bór N50 ($B_r = 1,47$ T) hengermágneseket tartalmazott mind a felső, mind az alsó tálcában. A négyzetárcsban szorosan egymás mellett elhelyezkedő mágnesek ellentétes polaritásúak, akárcsak a két tálcában egymás felé nézők. A tálcák között így kialakult mágneses tér erősen inhomogén: a tálcákra merőleges irányban a mágnes felületétől távolodva a középsőig a térerősség nulláig csökken, majd újra növekszik. A tálcák síkjával párhuzamosan a szomszédos csúcstól csúcsig mért mágneses indukció $783,2 \pm 0,1$ mT, két irányban szimmetrikus oldalirányú $74,2$ T/m indukciógradienssel 3 mm magasságban az alsó mágnesek



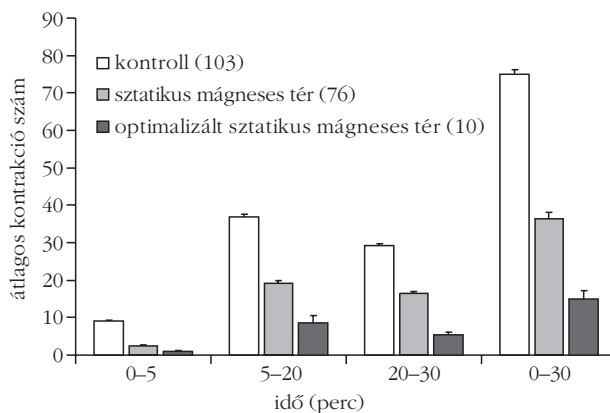
1. ábra. A sztatikus mágneses teret előállító készülék egyik első modellje. A felső tálca egy függőleges sínen csúsztható. A kísérlet során a két tálca közti mágneses térbe helyeztük az egereket.

tetejétől, $108,7 \pm 0,1$ mT indukció 10,7 T/m gradienssel 10 mm távolságban, $1,5 \pm 0,1$ mT indukció 0,2 T/m gradienssel 15 mm távolságban. (A méréseket az MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézetében végeztük.) A mágneses erővonalak nagy része a szomszédos mágneseken, kis része pedig – a mágneseket tartalmazó tálcák távolságának függvényében – a szemközti mágneseken keresztül záródik. Ezt a készüléket állatkísérletben teszteltük úgy, hogy egy átlátszó műanyaglapokból készült 46 mm magas kalitkát illesztettünk a tálcák közé.

Tudományos ismeretek a sztatikus mágneses terek élettani hatásairól

A sztatikus mágneses terek hatásait áttekintő legfrissebb összefoglaló forrás az Európai Unió SCENIHR (Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks = Újonnan azonosított egészségügyi kockázatok tudományos bizottsága) bizottságának 2009. évi beszámolója [1], amely a mi közleményeinket is tartalmazza. Kissé régebbi, de szélesebbkörű áttekintést ad a WHO 2006. évi jelentése [2].

Saját első tapasztalataimat a Semmelweis Egyetem Farmakológiai és Farmakoterápiás Intézetében, a Neurológiai Klinikán, a Debreceni Egyetem Anatómiai, Szövet- és Fejlődéstani Intézetében, valamint a Pécsi Tudományegyetem Farmakológiai és Farmakoterápiás Intézetében végzett kísérletek során szereztem. Az idézett eredmények állatkísérletes modellekből származnak (amelyek esetében a placebohatás



2. ábra. A „writhing” teszt eredménye a mérési idő függvényében. Az egerek hasi összehúzódásának száma a fájdalom-szindrómára jellemző. Zárójelben az állatok számát adtuk meg. A mérés teljes 30 percére vonatkoztatva az optimalizált sztatikus mágneses tér fájdalomcsillapító hatása meghaladta a 83%-ot.

elhanyagolható), reprodukálhatónak és statisztikailag szignifikánsnak bizonyultak.

Tanulmányoztuk a sztatikus mágneses tér hatását az akut fájdalomérzetre. A kísérleti modellt „writhing” (vonaglási) tesztnek hívják. Ez a farmakológia széles körben használatos módszere a fájdalom okozta reakció mérésére. Kimutattuk, hogy a sztatikus mágneses tér szignifikánsan csökkenti egérben az ecetsav hatására kialakult hasi összehúzódások (akut zsigeri fájdalomérzékelés) számát. Optimalizálva a készülék szerkezeti paramétereit, a mágneses kezelés 83%-ban csökkentette a fájdalomérzetet (2. ábra). A mágneses térnek való kitettség (expozíció) alatt, illetve az azt követő 96 órában sem találtunk káros mellékhatást.

Az optimalizáció során több mint 20 különböző sztatikus mágneses teret hasonlítottunk össze a writhing tesztben elért eredménye alapján. Változtattuk a mágnesek számát, anyagát, alakját, mágnesszéttségét, a tálcák számát, a rácsállandót stb.

Tanulmányoztuk a sztatikus mágneses tér fájdalomcsillapító hatását kémiai anyagoknak (formalin, reziniferatoxin, carrageenan) a bőr alatti kötőszövetes térbe való juttatásakor is. Vizsgáltuk, hogy a mágneses kezelés által kiváltott fájdalomcsillapító hatásban játszanak-e bármilyen szerepet a kapszaicin- (a paprika csípősségét okozó alkaloid) érzékeny rostok. Egyszeri, 30 percig tartó sztatikus mágneses térnek való kitettség hatására a fájdalomra adott, úgynevezett nocifenzív válaszok (mint például a mancs nyalogatása és emelgetése) száma és időtartama a kiváltott reakció mindkét fázisában (0–5 percig akut, 20–45 percig gyulladáson) szignifikánsan csökkent. Von Frey-méréssel¹ becsültük a mancs

¹ Az alkalmazott von Frey-tesztben az állat egy olyan ketrecbe van zárva, amelynek lukacsos az alja. Alulról egy, a nyílások átmérőjénél kisebb átmérőjű, henger alakú, tompa végű rúddal bökdösik, felemelik az állat mancsát. Az ép állatot ez nem zavarja, a mancsát csak akkor húzza el, amikor már a mozdulat maga válik kellemetlenné. Ha azonban az állat mancsa sérült, akkor korábban elhúzza. Ezzel a módszerrel tehát a mancs érzékenységét azzal a – rúdhoz kapcsolt számítógép által mért – nyomásértékkel mérjük, ami egyben a fájdalomküszöböt jelzi.

mechanikai érzékenységének változását. A sztatikus mágneses tér szignifikánsan csökkentette a sérült mancs érzékenységét.

Ha reziniferatoxin előkezelést alkalmaztunk, majd ezután vizsgáltuk az állatok fájdalomra reagáló viselkedését formalinteszttel,² akkor azt találtuk, hogy az előkezelés szinte teljesen felfüggesztette a sztatikus mágneses tér fájdalomcsillapító hatását. Minthogy a reziniferatoxin a szervezet kapszaicin-érzékeny rostjait teszi érzéketlenné, valószínű, hogy a sztatikus mágneses tér fájdalomgátló hatásában közreműködnek a kapszaicin-érzékeny rostok.

A hatásmechanizmust tovább kutatva megvizsgáltuk, hogy melyek azok a receptorok, amelyek a fájdalom sztatikus mágneses tér okozta csökkenésében részt vehetnek. A writhing tesztben az állatokat különböző receptor-antagonistákkal³ előkezeltük, illetve olyan egereken kísérleteztünk, amelyekben bizonyos kannabinoid-(CB1)-receptorok genetikusan hiányoztak. Az élő szervezet végtagján (perifériáján) adott naloxonhoz képest a kisagyba beadott naloxon kevésbé gátolta a sztatikus mágneses tér hatását. Ebből arra következtettünk, hogy a sztatikus mágneses tér inkább a végtagokon, mint a központi idegrendszerben hat.

A sztatikus mágneses térnek való kitétség hatását olyan egereken is vizsgáltuk, amelyek ischiadicus idegét részlegesen lekötöttük, így váltva ki a neuropátiás fájdalmi állapotukat. A mancs érzékenységének mérésére itt is a von Frey-féle tesztet használtuk. Azoknak az állatoknak, amelyek az operációt követő első két hétben – a betegség kialakulásakor – részesültek napi 30 perces sztatikus mágneses térben, nem javult számottevően az állapota. Azon egerek mancsának érzékenysége, amelyek az operációt követő 15. naptól részesültek két hétig napi mágneses kezelésben, a 20–22. napra (tehát a kezelés 5–7. napján!) a kontrollal megegyező mértékűre növekedett a mechanikai érzékenység (allo-dínia) küszöbértéke. A sztatikus mágneses tér tehát vélhetően a mielin-hüvely spontán regenerációs folyamatában is szerepet játszik.

A writhing tesztben a hatás dinamikáját is figyeltük, vajon a 10, 20, 30 percig tartó expozíció lineárisan növeli-e a fájdalomcsillapító hatás időtartamát az expozíció megszűnte után. Érdekes módon nem találtunk jól magyarázható dóziszfüggést, legtovább a 10 perces kezelés után maradt meg a hatás, mintegy 30 percig szinte változatlanul (5%-ot emelkedett csak a vonaglási szám).

Egészséges egereket kiteve a mágneses térnek azt találtuk, hogy helyváltoztató aktivitásukra, félelmi reakcióikra nincsen hatással az expozíció.

Felmerült az a kérdés is, hogy vajon egy klinikai MR (mágneses rezonancia) berendezés erős, homo-

gén sztatikus mágneses térbe helyezett állatokon tapasztalható-e valamiféle viselkedésváltozás, enyhül-e a fájdalomérzet. A writhing tesztet elvégezve egy 3 T mágneses indukciójú klinikai MR-ben azt találtuk, hogy azokban a hatás 69% volt, tehát a 30 percre az MR-be helyezett egerek sokkal kevésbé reagáltak a fájdalomra, mint az MR-be nem került társaik. (Többen állítják, hogy fájdalom miatt MR-kivizsgálásra küldött betegek fájdalomérzete csökkent a vizsgálatot követően.) Megfontolásra javasoltuk, hogy a jövőben az MR-berendezések terápiás céllal is kerüljenek alkalmazásra.

Több van előttünk, mint mögöttünk

Sok mindent tudunk már a sztatikus mágneses terek hatásairól, de még sokkal többet nem tudunk. Nem ismerjük a teljes hatásspektrumot, a hatás dinamikáját, a hatásmechanizmus komplex képét, a gyógyszer-kölcsönhatásokat. Nem ismerjük, hogy pontosan milyen fehérvérjék, vagy más alapú közvetítők vesznek részt a folyamatban. Az sem világos, hogy a biológiai szerveződés milyen szintjén lehetséges egyáltalán hatást elvárni.

Ha a korábbi feltételezésünkkel ellentétben a mágneses tér mégis inkább centrálisan (a központi idegrendszerben), mint a periférián hat, akkor a mágneses térnek a teljes testet kell érnie. Állatkísérleteinkben a rágcsálóknál mindig a teljes testet tettük ki a mágneses térnek, ám ennek kivitelezése emberen csak MR-méretű berendezésben lehetséges. A magnetohidrodinamikai erők arányosak a mágneses tér indukciójának és az indukció gradienseinek szorzatával [3]. Ez magyarázatot adhat arra, hogy miért az erős homogén mágneses terek, illetve az erősen inhomogén terek esetében tapasztalunk jelentős hatást. Noha a biológiai anyagok határfelületén a mágneses szuszceptibilitások eltérőek, ezt a hatást az irodalomban elhanyagolhatónak tartják [4].

A szervezetnek a mágneses terek időbeli változására legérzékenyebb részei a perifériás idegek. Az inhomogén sztatikus térben szabadon mozgó egér időben változó (nem periodikus) mágneses fluxust érzékel. Ezért elektromotoros erő, és ennek következményeképpen elektromos áramok indukálódhatnak a testben. Az ember perifériás idegeinek stimulációjához szükséges legkisebb „gradiens kapcsolási sebesség” 40 T/s (ezt az értéket az MR gradiens terének kapcsolási sebességével szokták azonosnak venni [5], noha minden inhomogén térben történő mozgás erre vezet). Ettől a hatástól állatkísérletben általában eltekinthetünk [6]. De ha nem is tekintenénk el tőle, nehéz elképzelni, hogy indukált áramok fájdalomcsillapítást okoznának, hiszen ennek az ellenkezőjét tapasztalták az irodalomban [7]. Az MR-vizsgálatra küldött beteg azonban szintén indukcióváltozásnak van kiteve annak ellenére, hogy az MR sztatikus mágneses tere a vizsgálat helyén jó közelítéssel homogénnek tekinthető. Ennek az az oka, hogy nagyjából egy méterre be-

² A formalinteszt során az állat a bőre alá kap formalint, ami helyi gyulladást vált ki. Ennek a lefolyását, tüneteit méri azután különböző módszerekkel (von Frey-módszerrel, a mancs emelgetés, nyalogatás gyakoriságával, ezek időtartamával).

³ A „receptor-antagonista” olyan anyag, amely egy érzékelésre specializálódott sejtet (receptort) működésében akadályoz.



3. ábra. A Lorenzini-féle ampullák kis sötét pórusoknak látszanak a cápa fején. Ezen magnetoreceptorok a geomágneses tér indukciójánál 100-szor gyengébb sztatikus mágneses tér érzékelésére is képesek.

lül a páciens egy olyan mágneses térből, amelynek csak csekély (szórt) a mágneses indukciója, egy erős (ma tipikusan 1,5–14 T indukciójú) mágneses térbe kerül. Az indukcióváltozás okozta mágneses fluxusváltozás csak akkor nem fog korrelálni a diagnózis eredményével, ha a beteget lassan és az MR-berendezés alagútját felező vízszintes síkban mozgatják a vizsgálatot megelőzően. Az indukcióváltozás okozta áramsűrűség a beteg testében nem haladhatja meg ugyanis a 480 mA/m² küszöbértéket (ez az áramsűrűség szintén a perifériás idegek stimulációjához szükséges küszöbérték) [8].

Rágcsálók a 4 T fölötti mágneses térben averzív⁴ válaszokat mutatnak, és feltételes elkerülést tanúsítanak, azaz menekülni igyekeznek belőle. Egyes beszámolók szerint MR-ben a fej legkisebb mozgása is fájdalomhoz, a szem előtt táncoló csillagokhoz, szédüléshez, hányingerhez, fémes ízérzéshez vezethet. Ezek közül nem egy szindróma előfordul pusztán a szem mozgatására! Brandt ezt az idegrendszer számára egyidejűleg érkező, de egymásnak ellentmondó hatások összegződésével magyarázza [9]. Foucher és munkatársai azt találták, hogy az erős sztatikus mágneses térben (2 T) az agyi funkciók lelassulnak [10].

A mágneses terek élettani hatásait tagadni akkor sem lehetne, ha nem tudnánk, hogy bizonyos állatokban megmaradtak olyan – a törzsfajlás folyamán kialakult – receptorok, amelyek a sztatikus mágneses tér érzékelésére specializálódtak, és az állatokat a tájékozódásban (a magnetotaktikus baktériumoktól a költöző madarakon át a repülő emlősökig [11]), illetve a rejtőzködő zsákmány megtalálásában (cápafélék, 3. ábra) segítik.

Bizonyos mérésekből az derült ki, hogy 1 T indukciónál erősebb mágneses tér a szívben és a főbb vérerekben áramlási potenciálkülönbséget okoz, de ennek a fiziológiai magyarázata még bizonytalan [12].

⁴ Az „averzív válasz” állatoknál olyan reakciót jelent, amelyben az állat valamilyen fájdalmas hatást próbál elkerülni. Embernél ez bonyolultabb kérdés, mivel nemcsak valós, hanem vélt hatások elkerüléséről is szó lehet.

Sertésen végzett kísérletek viszont azt mutatták, hogy még 8 T mágneses tér sem okozott az állatokban érrendszeri elváltozást [13]. Gupta és munkatársai számítógépes modellezéssel ugyanakkor azt találták, hogy a EKG-kiértékelésen jól látható elváltozást okoz a szív T-hullámán már egy 1,5 T indukciójú külső homogén mágneses tér is [14].

Összefoglalás

Azt mondhatjuk tehát, hogy létezik olyan sztatikus mágneses térkonfiguráció, amelynek az egerekre fájdalomcsillapító hatása van. Ugyanez erősíteni képes a mielin-hüvely spontán gyógyulási (repair) folyamatát is. A hatás biológiai jellegű, mert a szervezet saját belső rendszereit mozgósítja. Néhány olyan kísérletből, amelynek nem volt pozitív hatása, úgy gondoljuk, hogy csak igen nagy (1,5 T indukció fölötti) sztatikus mágneses térnek lehet hatása a jól működő (egészséges) emberi szervezetre.

Irodalom

1. Health effects of exposure to EMF, lásd a http://ec.europa.eu/health/ph_risk/committees/04_scenihp/docs/scenihp_o_022.pdf címen, 2009.
2. Environmental health criteria 232: Static fields, lásd a http://www.who.int/peh-emf/publications/EHC_232_Static_Fields_full_document.pdf címen, 2006.
3. J. F. Schenck: Physical interactions of static magnetic fields with living tissues. *Progress in Biophysics and Molecular Biology* 87 (2005) 185–204.
4. C. M. Collins: Numerical field calculations considering the human subject for engineering and safety assurance in MRI. *NMR in Biomedicine* doi:10.1002/nbm.1251, 2008.
5. *Safety guidelines for conducting magnetic resonance imaging (MRI) experiments involving human subjects*. Center for Functional Magnetic Resonance Imaging, University of California, San Diego, lásd a http://fmriserver.ucsd.edu/pdf/center_safety_policies.pdf címen, 2007.
6. S. Crozier, A. Trakic, H. Wang, F. Liu: Numerical study of currents in workers induced by body-motion around high-ultrahigh field magnets. *Journal of Magnetic Resonance Imaging* 26(5) (2007) 1261–1277.
7. F. G. Shellock, J. V. Crues: MR procedures: biologic effects, safety, and patient care. *Radiology* 232 (2004) 635–652.
8. P. Dimbylow: Quandaries in the application of the ICNIRP low frequency basic restriction on current density. *Physics in Medicine and Biology* 53 (2008) 133–145.
9. T. Brandt: *Vertigo: its multisensory syndromes*. Springer, London, New York, 2003.
10. J. R. Foucher, D. Gounot, B-T. Pham, C. Marrer, A. Dufour: “Magnetized” brains are slower – The cognitive effects of fMRI. *Nature Precedings* hdl:10101/npre.2008.2443.1.
11. R. A. Holland, J. L. Kirschvink, T. G. Doak, M. Wikelski: Bats use magnetite to detect the Earth’s magnetic field. *PLoS ONE* 3(2) (2008) e1676.
12. T. S. Tenforde: Magnetically induced electric fields and currents in the circulatory system. *Progress in Biophysics and Molecular Biology* 87 (2005) 279–288.
13. A. Kangarlu, R. E. Burgess, H. Zhu, T. Nakayama, R. L. Hamlin, A. M. Abduljalil, P. M. L. Robitaille: Cognitive, cardiac, and physiological safety studies in ultra high field magnetic resonance imaging. *Journal of Magnetic Resonance Imaging* 17 (1999) 1407–1416.
14. A. Gupta, A. R. Weeks, S. M. Richie: Simulation of elevated T-waves of an ECG inside a static magnetic field (MRI). *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 55(7) (2008) 1890–1896.