

# A RÁDIÓFREKVENCIÁS SUGÁRZÁSOK EGÉSZSÉGÜGYI KÉRDÉSEI

Thuróczy György

főosztályvezető, OKK-Országos „Frédéric Joliot-Curie” Sugárbiológiai és Sugáregészségügyi Kutatóintézet  
e-mail: thuroczy@hp.osski.hu

## Bevezetés

Az elektromágneses (EM) sugárzások, ill. terek biológiai hatásaival kapcsolatos tudományos érdeklődés az utóbbi években jelentősen növekedett. A környezet elektromágneses terhelését növelő új technikák megjelenése nagyfokú érdeklődést váltott ki mind a szakemberek, mind az érintett lakosság körében. A biológiai rendszerekben molekuláris szinten zajló elektromos, bioelektromos, elektrokémiai folyamatok mélyebb ismerete szintén felvetette az elektromágneses terekkel történő különböző szintű biológiai kölcsönhatások kutatásának szükségességét. Az elektromágneses terek biológiai hatásainak vizsgálata időben is jelentős változáson ment át. A kezdeti kutatások alapkérdése a nagyfrekvenciás sugárzások hőhatásának vizsgálata volt, elsősorban a mikrohullámú (MH) és rádiófrekvenciás (RF) tartományban, ugyanis a radartechnika és a rádiós műsorszórás igen nagy teljesítményű berendezéseket kezdett használni. Az ezzel párhuzamos fizioterápiás és hipertermiás alkalmazás elsősorban a biológiai rendszerek termikus, termoregulációs válaszait vizsgálta. Ehhez szorosan kapcsolódott a makroszkopikus szintű kölcsönhatások leírása (relaxációs folyamatok, szöveti permittivitás, a vezetőképesség meghatározása) és a dozimetriai fogalomrendszer megalkotása is. Jelentős szemléletbeli változást hozott az elektromágneses sugárzások és terek hőhatással nem járó, nem

termális, ill. atermális hatásainak feltételezése és igazolása.

## Dozimetriai fogalmak

### Fizikai és biofizikai megfontolások

A *nem ionizáló sugárzások* azok az elektromágneses (EM) sugárzások, illetve elektromos és mágneses terek, amelyek hullámhossza a 100 nm és a végtelen (statikus elektromos és mágneses tér) között van, fotonenergiája 12,4 eV-nál kisebb. Az EM sugárzás nem ionizáló jellege a mikrohullámú frekvenciatartományban, illetve alatt egyértelmű, hiszen a mikrohullámú foton energiája 300 GHz-nél is csak  $1,24 \times 10^{-3}$  eV, amely a termikus energiánál is kisebb ( $2,7 \times 10^{-2}$  eV) és így intramolekuláris és intermolekuláris kötésfelhasítások nem feltételezhetők (**1. táblázat**).

A tényleges biológiai hatást okozó elnyelt elektromágneses energia meghatározásához ismerni kell a sejtek és szövetek elektromos tulajdonságait, ugyanis az elnyelt energia mértékét az objektum elektromos permittivitása, ill. mágneses permeabilitása határozza meg. A külső EM térből való makroszkopikus energiafelvétel dielektromos polarizáció útján történik. A dielektromos polarizáció lejátszódásához időre van szükség. Ha az EM tér változásának ideje összemérhető a dipólok térváltozásához szükséges idővel, akkor fáziseltolódások keletkeznek, amelyek az objek-

| sugárzás típusa                                             | frekvenciatartomány | hullámhossz    |
|-------------------------------------------------------------|---------------------|----------------|
| <b>ionizáló</b>                                             | > 3 PHz             | < 100 nm       |
| <b>elektromágneses</b>                                      | < 3 PHz             | > 100 nm       |
| <i>optikai sugárzás</i>                                     |                     |                |
| ultraibolya (UV) (elektromágneses rész)                     | 3 – 0,750 PHz       | 100 – 400nm    |
| UV-C                                                        | 3 – 1,070 PHz       | 100 – 280nm    |
| UV-B                                                        | 1,070 – 0,952 PHz   | 280 – 315nm    |
| UV-A                                                        | 0,952 – 0,750 PHz   | 315 – 400nm    |
| látható fény                                                | 750 – 375 THz       | 400 – 800nm    |
| infravörös (IR)                                             | 375 – 0,3 THz       | 0,8 – 1 000 mm |
| IR-A                                                        | 385 – 214 THz       | 0,8 – 1,4 mm   |
| IR-B                                                        | 214 – 100 THz       | 1,4 – 3 mm     |
| IR-C                                                        | 100 – 0,3 THz       | 3 – 1 000 mm   |
| <b>mikrohullámú(MH) és rádiófrekvenciás (RF) sugárzások</b> | 300 GHz – 0,3 MHz   | 1 – 1000 mm    |
| extrém magas frekvencia (EHF)                               | 300 – 30 GHz        | 1 – 10 mm      |
| szuper-magas frekvencia (SHF)                               | 30 – 3 GHz          | 10 – 100 mm    |
| ultra-magas frekvencia (UHF)                                | 3 – 0,3 GHz         | 100 – 1000 mm  |
| nagyon magas frekvencia (VHF)                               | 300 – 30 MHz        | 1 – 10 m       |
| magas frekvencia (HF)                                       | 30 – 3 MHz          | 10 – 100 m     |
| középfrekvencia (MF)                                        | 3 – 0,3 MHz         | 100 – 1000m    |
| <b>elektromos és mágneses terek</b>                         |                     |                |
| alacsony frekvencia (LF)                                    | 300 – 30 kHz        | 1 – 10 km      |
| nagyon alacsony frekvencia (VLF)                            | 30 – 3 kHz          | 10 – 100 km    |
|                                                             | 3 – 0,3 kHz         | 100 – 1000 km  |
| extrém alacsony frekvencia (ELF)                            | 0,1 – 0,3 kHz       | > 1 000 km     |
| statikus elektromos és mágneses terek                       | 0 Hz                | ∞              |

### 1. táblázat • Az elektromágneses sugárzások és terek frekvenciaspektruma

tumnak frekvenciafüggő tulajdonságot adnak. Az ilyen fázis- vagy időeltolódási jelenségeket diszperziós jelenségeknek, ill. az anyag diszperziós tulajdonságának nevezik. Az külső EM tér periódusideje és a dipólmozgások idejének összemérhetősége adott frekvencián maximális abszorpciót okoz. Ezt a frekvenciát **relaxációs frekvenciának**, a hozzá tartozó relaxációs körfrekvencia reciprokát **relaxációs időnek** nevezik.

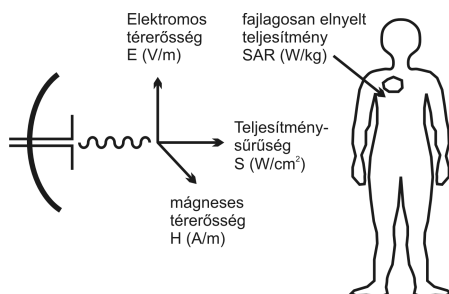
A biológiai anyagok és a levegő mágneses permeabilitása közel azonos. A biológiailag fontos anyagok és a levegő elektromos permittivitása viszont jelentősen eltérő és a relaxációs folyamatok miatt erő-

sen frekvenciafüggő. A különböző biológiai anyagok, szövetek dielektromos állandója és vesztesége összetett, függ a frekvenciától, a függés jellegzetes szakaszait (a frekvenciatartományban) diszperziós tartományoknak nevezik (Polk, 1996). A biológiai anyagoknál több diszperziós tartományt definiáltak. A különböző diszperziós tartományokért a rendszer különböző szintjén jelentkező relaxációs folyamatok felelősek (sejtmembrán, makromolekulák, fehérjék, aminosavak, kötött, ill. szabad víz). A dielektromos állandó spektruma diagnosztikai értékű információt is hordozhat (pl. daganatos, ill. normál szövetek közötti eltérés).

### Dozimetriai egységek

A mikrohullámú és RF sugárzások biológiai hatásainak tárgyalásában egyrészt az elméleti villamosságban használt szokásos definíciókat használják: elektromos térerősség (**E**, V/m), mágneses térerősség (**H**, A/m), ill. teljesítménysűrűség (**S**, W/m<sup>2</sup>, ill. mW/cm<sup>2</sup>), amelyek a szabad térben mérhető értékeket adják meg. Ezek meghatározott feltételek mellett (ún. távotérben) egymásból átszámíthatók. A MH és RF sugárzások térerőssége a távolsággal arányosan, teljesítménysűrűsége a távolsággal négyzetesen csökken.

Az emberi testben, biológiai objektumban elnyelt dózis fogalmára egységesen a fajlagosan elnyelt teljesítmény az ún. **SAR** (**SAR: Specific Absorption Rate**) használatos, amely megadja az egységnyi tömegben elnyelt teljesítmény nagyságát W/kg-ban, ill. mW/g-ban. Az **SA** (**SA: Specific Absorption**) az SAR időbeli integrálja az elnyelt energiát adja meg J/kg-ban, ill. mJ/g-ban (**1. ábra**). A MH és RF tartományokban az energia elnyelődésének mértékét döntően a frekvencia és az objektum víztartalma, illetve alakja határozza meg. A



**1. ábra** • Átlagos ember elnyújtott gömbmodelljében elnyelt SAR (mW/g) frekvenciafüggése 1 mW/cm<sup>2</sup> beesése esetén

víztartalomtól függően az objektumban elnyelt elektromágneses sugárzás hullámhossza és behatolási mélysége csökken. Behatolási mélységen azt a távolságot értjük, ahol az elektromágneses térerősség az *e*-ed részére csökken (az abszorbeált teljesítmény a felszínhez képest 13,5 %-ra csökken) (**2. és 3. táblázat, 2. ábra**).

Az emberben átlagosan elnyelt EM teljesítmény erősen függ az embert érő külső EM tér frekvenciájától. Az emberben elnyelt átlagos SAR meghatározása általában modellek alkalmazásával történik, amely alapján az egységnyi teljesítménysűrűsége vo-

| frekvencia<br>(MHz) | hullámhossz<br>a levegőben<br>(cm) | dielektromos<br>állandó<br>(relatív) | vezető-<br>képesség<br>(mS/m) | hullámhossz<br>az anyagban<br>(cm) | behatolási<br>mélység<br>(cm) |
|---------------------|------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|
| 300                 | 100                                | 54                                   | 31,6–107                      | 11,9                               | 3,89                          |
| 433                 | 69,3                               | 53                                   | 37,9–118                      | 8,46                               | 3,57                          |
| 750                 | 40                                 | 52                                   | 49,8–138                      | 5,34                               | 3,18                          |
| 915                 | 32,8                               | 51                                   | 55,6–147                      | 4,46                               | 3,04                          |
| 1500                | 20                                 | 49                                   | 70,8–171                      | 2,81                               | 2,42                          |
| 2450                | 12,2                               | 47                                   | 96,4–213                      | 1,76                               | 1,70                          |
| 3000                | 10                                 | 46                                   | 110–234                       | 1,45                               | 1,61                          |
| 5000                | 6                                  | 44                                   | 162–309                       | 0,89                               | 0,788                         |
| 5800                | 5,17                               | 43,3                                 | 186–338                       | 0,775                              | 0,720                         |
| 8000                | 3,75                               | 40                                   | 255–431                       | 0,573                              | 0,413                         |
| 10000               | 3                                  | 39,9                                 | 324–549                       | 0,464                              | 0,343                         |

**2. táblázat** • Magas víztartalmú szövetek (izom, bőr, agyszövet, belső szervek) elektromos paraméterei

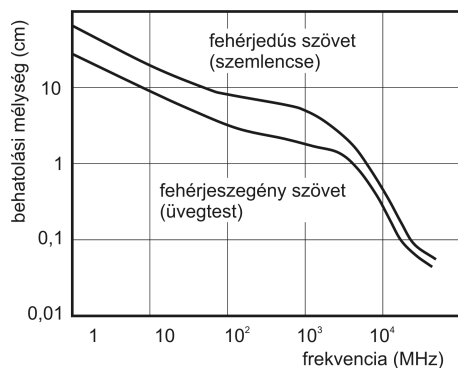
| frekvencia<br>(MHz) | hullámhossz<br>a levegőben<br>(cm) | dielektromos<br>állandó<br>(relatív) | vezető-<br>képesség<br>(mS/m) | hullámhossz<br>az anyagban<br>(cm) | behatolási<br>mélység<br>(cm) |
|---------------------|------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|
| 300                 | 100                                | 5,7                                  | 1,37                          | 41                                 | 32,1                          |
| 433                 | 69,3                               | 5,6                                  | 1,43                          | 28,8                               | 26,2                          |
| 750                 | 40                                 | 5,7                                  | 1,54                          | 16,8                               | 23,0                          |
| 915                 | 32,8                               | 5,6                                  | 1,60                          | 13,7                               | 17,7                          |
| 1500                | 20                                 | 5,6                                  | 1,77                          | 8,41                               | 13,9                          |
| 2450                | 12,2                               | 5,5                                  | 2,21                          | 5,21                               | 11,2                          |
| 3000                | 10                                 | 5,5                                  | 2,26                          | 4,25                               | 9,74                          |
| 5000                | 6                                  | 5,5                                  | 3,92                          | 2,63                               | 6,67                          |
| 5800                | 5,17                               | 5,5                                  | 4,73                          | 2,29                               | 5,24                          |
| 8000                | 3,75                               | 4,7                                  | 7,65                          | 1,73                               | 4,61                          |
| 10000               | 3                                  | 4,5                                  | 10,3                          | 1,41                               | 3,39                          |

3. táblázat • Az alacsony víztartalmú szövetek (zsír, csont) elektromos paraméterei

natkoztatott (lmW/g)/(lmW/cm<sup>2</sup>) frekvenciafüggő értékek megadása szokásos

### Frekvenciafüggő elnyelőképesség

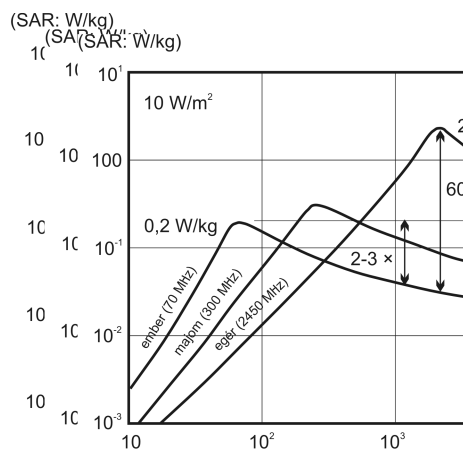
Az emberben elnyelt RF teljesítmény a biológiai anyagok dielektromos állandójának frekvenciafüggése, valamint a testméret és a hullámhossz aránya miatt erősen függ az embert érő külső EM tér frekvenciájától. Ezt a frekvenciafüggő elnyelést négy szakaszra szokták bontani: szubrezonáns tartomány 20 MHz alatt, rezonáns tartomány 20–300 MHz között, inhomogén lokális elnyelődés tartománya 300 MHz–2 GHz, felszíni elnyelődés 10 GHz felett. Az elnyelt energia eloszlása, különösen a 300 MHz–3 GHz frekvenciatartományban, a biológiai objektumon



2. ábra

belül erősen inhomogén. Az inhomogenitást a különböző víztartalmú szövetek struktúrájától függő energiaelnyelés okozza. Az eltérő víztartalmú szövetekben a terjedés sebességének változása miatt az EM tér hullámhossza is megváltozik, s az egyes felület-határokon fellépő reflexiók is különbözők. A létrejövő SAR eloszlás már viszonylag egyszerű zsír-izom struktúra esetében is igen összetett (Petersen, 19991).

A pulzus-, ill. amplitúdómodulált RF és mikrohullámú elektromágneses terek által keletkezett SAR modulációtól való függésében azt találták, hogy 1 MHz-nél alacsony



3. ábra

nyabb moduláló frekvenciánál a modulált EM sugárzás vivőfrekvenciája határozza meg az SAR eloszlását és nagyságát, s ebben az esetben a biológiai objektumokban az elnyelt pulzus időbeli alakja sem torzul el. 10 MHz-nél magasabb frekvenciájú moduláció esetében az SAR kialakulását (behatolási mélység, eloszlás) döntő mértékben a moduláló pulzus alapharmonikusa határozza meg, s a pulzus időbeli alakja is torzul.

### *Mikroszkopikus dozimetria*

Az EM terek dozimetriájában is előtérbe kerültek a *mikroszkopikus dozimetria*i megfontolások. A kérdés az, hogy a makroszkopikusan meghatározott elnyelődés milyen szinten lép kölcsönhatásba a biológiai rendszerrel, illetve ennek milyen frekvenciafüggő jellege lehetséges. Melyek azok a frekvenciák, amelyek elsősorban a makromolekulákat, a sejtmembránt, a sejtfelszínt, a citoszkkeletont, a citoplazmát, az intracelluláris membránokat stb. érintik, illetve ott nyelődnek el? Míg alacsony frekvenciákon (néhány 100 kHz alatt) a sejtmembrán leárnýékolja a külső elektromos teret, addig az RF frekvencia tartományokban a sejtmembrán fokozatosan „átlátszóvá” válik, és a sugárzás az intracelluláris tartományban nyelődik el. A sejtmembránhoz kötődő, ill. egyéb sejtorganellumok által elnyelt energia nehezen becsülhető, míg az intracelluláris membránokban való elnyelődés csak egy meghatározott frekvenciatartományban lehetséges. Ennek alapján alacsony frekvenciáknál, ill. alacsony frekvenciákat tartalmazó pulzusmodulált EM tereknél elsősorban sejtmembránra gyakorolt (transzmembrán) hatást feltételezhetünk. Magasabb RF és mikrohullámú frekvenciákon az intracelluláris tér érintett, míg a sejtfelszínen lejátszódó folyamatokra gyakorolt hatás frekvenciafüggőségét e fizikai modell alapján nehéz megbecsülni (Repacholi, 1998, Tenforde, 1996).

### *A lakosság elektromágneses expozíciója*

#### *Környezeti expozíciók rádiófrekvenciás sugárzás esetében*

A környezet természetes RF háttérintenzitása kevesebb mint  $1,4 \times 10^{-9}$  mW/m<sup>2</sup>. A mesterséges RF sugárzások a környezetben elsősorban a rádió- és tévéadókból származnak, de nem elhanyagolható az egyre növekvő számú rádiótelefon-bázis-állomásokból eredő sugárzás nagysága sem. Az embert érő RF és MH expozíció meghatározásánál ismerni kell az adóberendezés frekvenciáját, teljesítményét, a sugárzó antenna tulajdonságait és a terepviszonyokat (beépítettséget). A sugárzás 300 MHz felett, a fényhez hasonlóan, egyenes vonalban terjed, míg alacsonyabb frekvenciákon követi a Föld görbületét, illetve az ionoszféra közvetítésével terjed. Minél magasabb a frekvencia, annál jobban irányítható a sugárzás. A sugárzás kibocsátására szolgáló antenna fontos tulajdonsága, hogy az adott sugárzást mekkora területen szórja szét. Ez a tulajdonság az antenna *sugárzási karakterisztikájával*, illetve az *antenna nyereségével* jellemezhető (Thuróczy, 1996/1).

Egy USA-beli tanulmány szerint a 70-es években az FM rádió, VHF és UHF sávban működő tévéadókból eredő teljesítménysűrűség középtérke a városi környezetben kb. 50 mW/m<sup>2</sup> volt. Az USA-ban a városi lakosság 0,1 %-a 2 V/m-t meghaladó RF térerősségekben él. Svédországi mérés szerint egy nagyváros centrumában levő irodában az expozíció 20 mW/m<sup>2</sup> volt a 10 kHz–1 GHz tartományban, ugyanakkor egy 100 000 lakosú városban a rádióadókból eredő, lakásban mérhető sugárzás 1 mW/m<sup>2</sup> körül van. Hazai mérések alapján egy átlagos bázisállomás esetében (100 W ERP effektív kisugárzott teljesítménynél) az antenna síkjában 30–40 m-re a teljesítménysűrűség 1 mW/cm<sup>2</sup> alá csökken, és a lakos-

ság tartózkodási helyein ez az érték általában kisebb, mint  $0,1 \text{ mW/cm}^2$ .

### *Egyéb lakossági RF expozíciók*

A lakosság által is használatos **mikrohullámú sütők** az utóbbi években az egész világon elterjedtek, és velük igen nagy teljesítményű mikrohullámú berendezések kerültek a lakásokon belülre. A piacra kerülő berendezések sugárzására vonatkozó nemzetközi és hazai szabványok egységesek, a sütő felületétől  $5 \text{ cm}$ -re maximálisan  $5 \text{ mW/cm}^2$  teljesítménysűrűséget engedélyeznek. Irodalmi adatok és saját tapasztalataink is azt mutatják, hogy a sütők új állapotban kielégítik az említett előírásokat (Jánossy, 1991/2).

Széleskörű elterjedése és használata miatt a lakosságra vonatkozó terhelésnek (s nem csak munkahelyi sugárvédelmi kérdésnek) kell tekintenünk a **számítógépes képernyők** elektromos és mágneses terét. A monitorok elektromos, ill. mágneses térének frekvenciája a hálózati  $50 \text{ Hz}$  mellett  $15$  és  $60 \text{ kHz}$  között van, amely függ a készülék típusától (színes, monokróm, multiszinkron stb.). A nemzetközi adatok és saját méréseink is azt mutatják, hogy az  $50 \text{ Hz}$ -es elektromos és mágneses terek  $1\text{--}10 \text{ V/m}$ , ill.  $0,08\text{--}0,6 \text{ A/m}$  ( $0,1\text{--}0,7 \text{ }\mu\text{T}$ ) között, a  $15\text{--}35 \text{ kHz}$ -es frekvenciákon  $10 \text{ V/m}$ , ill.  $0,17 \text{ A/m}$  ( $0,21 \text{ }\mu\text{T}$ ) alatt vannak a felhasználó helyén, amelyek nem haladják meg a nemzeti szabványokban és nemzetközi ajánlásokban megengedett értékeket. A gyakori szem- és bőrzérkenységgel kapcsolatos panaszok a statikus feltöltődésből eredő porszemek szembe, arcra történő lecsapódásából erednek (Jánossy, 1991/1).

### *A lehetséges biológiai kölcsönhatások néhány modellje*

Az EM terek biológiai hatásaira vonatkozó kísérletes adatok alapján a sejtmembránon zajló szabályozási folyamatok kerültek elő-

térbe. Feltételezik, hogy az extracelluláris térben keletkező áramsűrűség a sejtfelszíni receptorok, kötőhelyek működésében kelthet zavart, amely intracelluláris biokémiai kölcsönhatásokhoz is vezethet. Ezzel összefüggésben a sejt növekedésének és osztódásának szabályozása és az ebben közreműködő enzimek aktivitásának vizsgálata állnak a középpontban.

A kölcsönhatás-modellek biofizika felől történő értelmezésének központjában a sejtmembrán áll. A legnagyobb problémát az jelenti, hogy a külső EM expozícióból a sejtmembránon, illetve a sejt közötti állományban keletkezett elektromos térerősség, illetve áramsűrűség sokkal kisebb, mint a biológiai rendszerek normál működése során keletkező belső elektromágneses terek. A fizikai kölcsönhatások modelljeiben ezt az elektronikában is ismert jel/zaj viszonytal írnák le. A biológiai rendszerekben fellépő elektromos zaj a termikus zajból (Nyquist-zaj), a feszültségáram zajból (ún.  $1/f$  zaj), elektronzajból (töltött részecske mozgásából adódó zajból) és az elektromos potenciálokat keltő szövetek, idegsejtek bioelektromos zajából összegződik. Ennek alapján a külső elektromágneses térből keletkező jel és az állandóan jelenlévő zaj viszonya  $10^{-3}\text{--}10^{-4}$ -nél is rosszabb. A feltételezett hatásmechanizmus-modellek arra keresnek választ, hogy a biológiai rendszerek hogyan képesek ezt a rossz jel/zaj viszonyt legyőzni, ezáltal a külső elektromágneses térrel kölcsönhatásba lépni. A kölcsönhatások fizikai modelljeinek alapját a biológiai mikrostruktúrák (sejtmembránok, sejtkapcsolatok, idegsejtek) fiziko-kémiai felépítésének nemlineáris és funkcionális működésének rezonanciát, időben periodicitást tartalmazó jellege adja.

A lehetséges jel/zaj viszony javítását igazoló modellek a következők: a mikrostruktúrák nemlineáris dinamikus egyen-

súlyi állapotai mentén kialakuló (jel)erősítési folyamatok, a biológiai struktúrák szűk sáv szélességéből és a külső elektromágneses jel koherenciájából keletkező jel/zaj viszony javulás, valamilyen rezonancia alapján létrejövő kölcsönhatások, a sejtkapcsolatok elektromos csatolásából és kommunikációjából adódó jel/zaj viszony javulás, a biológiai mikrostruktúrák ferromágneses partikuláinak kölcsönhatása a külső elektromágneses térrel. Mivel a biológiai rendszerek a sejtek funkcionálisan is összetartozó összességéből állnak, a kölcsönhatások leírásában helyet kaptak a sejtkapcsolatok (elektromos) csatolását és kommunikációját figyelembe vevő modellek. E modellek lényege, hogy az elektromosan és funkcionálisan csatolt sejtek (sejtmembránok) nem függetlenek, ezért egy adott sejtcsoportra vonatkozó jel/zaj viszony sokkal jobb lehet, mint az egyedi sejt esetében. Elektrodinamikai modell alapján kimutatták, hogy  $N$  számú elektromosan csatolt sejtmembrán a jel/zaj viszonyt  $N^{5/6}$  arányban javítja. Például egymillió sejt esetében ez 100 000-szeres javulást okozhat, ami már  $0,1 \mu\text{V/m}$ -es érzékelést tenne lehetővé. A sejtkapcsolások neuronhálózati modelljében az adaptív tulajdonság miatt a hálózatban érintett sejtek száma nemlineárisan függ össze a jel/zaj viszony javulással.

Egészen új megközelítést hozott az a felismerés, hogy számos biológiai szövet ferromágneses kristályokat, ún. magnetitokat ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) tartalmaz. E kristályokat megtalálták méhekben, madarakban, hüllőkben, és feltételezés szerint a tájékozódásban nyújtanak segítséget. A méhek ezáltal  $10^{-9}$  T mágneses indukciót, a madarak a Föld mágneses terének  $10^{-5}$  nagyságú változását is érzékelni tudják. A mágneses térrel történő kölcsönhatás lehetséges szerepét az adja, hogy az emberi agyszövet is tartalmaz magnetitokat. Mennyisége gram-

monként eléri a milliót, mérete 200 nm körüli (állatokban 20–30 nm). A kölcsönhatásban játszott szerepét nem a mennyisége (ui. csak minden századik sejtbe jut egy kristály, és ezt a szakemberek kevésnek tartják), hanem a helye adja. Feltételezések szerint a membránhoz kötődő magnetit, mágneses momentuma miatt, a külső elektromágneses tér hatására mozgásba jön, és a nyomásérzékelő receptorok segítségével a sejtmembrán ioncsatornáinak ki- és bezáródását befolyásolja (Tenforde, 1996, UNEP/WHO, 1987).

### *Biológiai hatások*

A mikrohullámú és RF sugárzások biológiai hatásait a termoreguláció érintettsége szempontjából három részre szokás bontani, amelyekhez három expozíciós (SAR) tartomány is rendelhető:

- **hőhatás:** hőmérséklet-emelkedéssel járó expozíció ( $2\text{--}8 \text{ mW/g}$  felett), amely  $1^\circ\text{C}$ -nál nagyobb hőmérséklet-emelkedést okozhat;
- **atermikus hatás:** a hőmérséklet nem emelkedik a termoreguláció miatt ( $0,5\text{--}2 \text{ mW/g}$  között);
- **nem termikus:** nincs hőmérséklet-emelkedés, termoreguláció nem érintett ( $0,5 \text{ mW/g}$  alatt) <sup>6</sup>.

A fenti definíciók mentén történő szétválasztás számos esetben nehéz, ugyanis pl. az SAR hőhatás okozó értékeiben nagy átfedés lehetséges az adott biológiai rendszer, szerv termoregulációs képessége szerint. Amíg az agyszövet termoregulációs képessége igen nagy, addig pl. a szemlencsének nincs vérrellátása, így ott a hőmérséklete alacsonyabb SAR értékeknél emelkedik meg. Ezt bonyolítja, hogy az adott objektum frekvenciafüggő elnyelési képességének megfelelően ugyanazon SAR-hoz különböző levegőben mérhető teljesítménysűrűség is tartozhat. Ezért különösen nehéz megítélni, hogy pl. a rádiótelefon

sugárzásából keletkező elnyelt teljesítmény, amely 0,1–15 W/kg között is változhat, melyik kategóriába sorolható (ICNIRP, 1998, Repacholi, 1998).

Az RF sugárzások kölcsönhatásában döntő szerepe van a hőmérséklet emelkedésének. A termális hatások egy adott sugárzási intenzitás felett elfedik a nem termális hatásokat. A hatásmechanizmusok tárgyalásában a hatás helye (pl. sejtszintű) fizikai kölcsönhatások (pl. dielektromos tulajdonságok, nemlinearitások) és a biológiai rendszerek sajátossága játszik szerepet. Például a pulzusmodulált, mikrohullámú sugárzás hallás útján történő észlelésének mechanizmusa valószínűleg termoeelasztikus hatáson (igen gyorsan lezajló hőtáguláson) alapul. Ugyanakkor az alkalmazott RF hullámhossz és a biológiai objektum méreteinek összemérhetősége a fejen belül egyéb rezonanciákat is kelthet (pl. a GSM sáv 30 cm-es hullámhossza a fej méretével csaknem azonos). (Lin, 1989)

### Hőhatások

A biológiai hatásokkal kapcsolatos első tapasztalatok és kísérletek a MH és RF sugárzások **hőhatására** voltak visszavezethetők. Ezek közé tartozott például a nemzőképesség ideiglenes csökkenése, szűrkehályog képződése. A sugárzás hőhatását a gyógyításban hamar használni kezdték. Napjainkban fizikoterápiás kezelések mellett a daganatterápiában is alkalmazzák.

### Hatások a központi idegrendszerre

A MH és RF sugárzások **központi idegrendszerre** gyakorolt hatásának vizsgálata kezdettől fogva a témával foglalkozók érdeklődésének középpontjában állt. Nyilvánvalónak tűnt, hogy pl. agyszövet, amely maga is elektromos potenciálokat kelt, közvetlen kölcsönhatásba kerülhet az elnyelt EM energiával. A kísérletes adatok azonban azt támasztják alá, hogy az agyi

elektromos tevékenység a biológiai hatás regisztrálásában szerepet játszhat, de a hatásmechanizmusban közvetlen elektrodinamikai út nem lehetséges, hanem az agyszövet és az EM terek kölcsönhatásaiban közvetett hatásmechanizmusok érvényesülnek. Mivel pl. az elektroencefalogram (EEG) hullámok eredetének is a lassú membránpotenciál változások tér-idő összegzését tartják, ezért a kutatások a sejtmembránnal történő lehetséges kölcsönhatások felé fordultak. Ezek közül a legelterjedtebb a  $\text{Ca}^{2+}$  ion szerepének tisztázása, a sejtmembránon való ki- és beáramlásának mérése volt. A kalciumionoknak fontos szerepük van az agyszövet fiziológiai és metabolikus folyamataiban, így ennek az EM tér hatására történő változása összefüggésben van az agyi metabolizmusban, a funkcióban mért egyéb változásokkal. Az eredmények azt mutatták, hogy az amplitúdómodulált RF és mikrohullámú tér növelte a  $\text{Ca}^{2+}$  kiáramlást.

A központi idegrendszerre gyakorolt hatások háttereként az agyi kapillárisok, az ún. **vér-agy gát** szelektív permeabilitásának szerepe szintén az érdeklődés középpontjába került. A vér-agy gát az agyszövet számára lokálisan konstans összetételű környezetet biztosít. A neuronok működése nagy mértékben függ a környezetet jelentő cerebrospinális folyadék (CSF) ionösszetételétől, és annak kisebb mértékű változása is jelentős következményekkel jár. Ezért az EM sugárzás idegrendszeri hatásai háttérének többek között a vér-agy gát permeabilitásának megváltozását tartják. Állatkísérletek alapján megállapították, hogy az akut hőhatással járó mikrohullámú sugárzás növeli az olyan jelzett vegyületek bejutását az agyszövetbe, amelyek a normálisan működő vér-agy gáton nem jutnának át. Ez a vér-agy gát érintettségére utalt, de a permeabilitás változása összefüggésben volt a lokális agyi keringés-metaboliz-

mus változásával és a hőmérséklettel is. A mikrohullámú és a RF sugárzásnak a *viselkedésre* gyakorolt hatása számos sugárvédelmi szabvány fontos alapját képezte. Az összegyűjtött irodalmi adatok azt mutatták, hogy az állatkísérletes modellekben az SAR viszonylag szűk tartományában (3–9 mW/g között) találtak elváltozásokat, amelyhez igen széles teljesítménysűrűség (8–140 mW/cm<sup>2</sup>) tartomány tartozott. Ezért számos nemzetközi bizottság azt javasolta, hogy a 4 mW/g SAR értékre alkalmazzanak egy tízes redukációs faktort. Így alakult ki a mára nemzetközileg is elfogadott érték: az egész testben elnyelt átlagos 0,4 mW/g SAR mint foglalkozási, illetve ennek ötödrésze (0,08 mW/g) mint lakossági dóziskorlát.

### *Daganatkeltő hatások*

Annak ellenére, hogy a sugárvédelmi értékek alapját az idegrendszerre gyakorolt hatások küszöbértékei adták, az MH és RF sugárzásokkal kapcsolatos egyik központi kérdés az esetleges rákkeltő hatás maradt. Különösen a rádiótelefonok elterjedése kapcsán merült fel a kérdés: vajon tartós használatuk okozhat-e rákot vagy sem? A kísérletes modellekben elsősorban a daganatos szövetek növekedési ütemét figyelték, azt, hogy a daganatos szövetek RF sugárzás hatására gyorsabban növekednek-e. Az eddig reprodukálható kísérletes eredmények azt mutatják, nem valószínű, hogy daganatnövelő hatásokkal kell számolnunk a MH, ill. RF (így a rádiótelefonok által kibocsátott) sugárzásokkal kapcsolatban. Az emberre vonatkozóan azonban csak az epidemiológiai, az adott populációra vonatkoztatott megbetegedési (morbidity) és halálozási (mortality) mutatók adhatnak megnyugtató választ. Persze csak elegendő adat birtokában és kellő idő eltelével. (ICNIRP, 1996, Kuster, 1996, Thüroczy, 1998).

### *Sugárvédelmi szabványok és ajánlások*

#### *Alapelvek*

A nemzetközi és nemzeti ajánlásokban, szabványokban, az EM sugárzások (terek) sugárvédelmi koncepciója a dozimetria, ill. az expozíció oldaláról két fő elemet tartalmaz:

- Az expozíció dozimetriai alapkorlátait az elnyelt teljesítmény (SAR) W/kg-ban vagy áramsűrűség mA/m<sup>2</sup>-ben határozza meg. Ebből származtatják az ajánlásban szereplő és mérendő (ill. mérhető), megengedhető határértékeket W/m<sup>2</sup>-ben, mW/cm<sup>2</sup>-ben, V/m-ben vagy A/m-ben (*derived exposure levels*).

- A sugárterhelés tárgyalásában és megítélésében különbséget tesznek a *lakossági* és a *foglalkozási* expozíció között. Egyes szabványok és ajánlások a foglalkozási, ill. lakossági kifejezések helyett az *ellenőrzött*, ill. *nem ellenőrzött* expozíciós területek (övezetek) kifejezéseket használják. A lakossági (nem ellenőrzött területre vonatkozó) határértékek általában egyötöd, egytized részei a munkahelyre megengedett értékeknek.

A szabványok minden esetben figyelembe veszik, hogy az emberi testben átlagosan elnyelődő energia erősen függ a külső elektromágneses sugárzás frekvenciájától. Az átlagosan elnyelt teljesítményt (SAR) mint meghatározó dóziskorlátot alapul véve az ICNIRP (*International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection*) új szemléletű ajánlásokat tett közzé. Ezekben a 0,4 mW/g egésztestre vonatkozó SAR-hez rendelhető, 6 percre vonatkozó átlagos teljesítménysűrűség-, ill. térerősségszinteket tekintik a munkahelyen megengedhető határértéknek (foglalkozási határérték). Ugyanakkor a 0,08 mW/g SAR értékhez tartozó átlagos (30 perces átlag) szinteket a lakosságra vonatkozó megengedhető határértéknek javasolják (*4. táblázat*). Az

SAR-en alapuló ajánlások tartalmaznak egy lokálisan megengedhető maximális SAR értéket is, amely foglalkozási esetben 8 mW/g, a lakosság esetében 2 mW/g (ICNIRP, 1998).

### *Az ajánlások és szabványok kialakításának további elvei*

Az elektromágneses terek egészségügyi határértékeinek kialakításánál két egymástól eltérő szemlélettel találkozhatunk. Az egyik az egészség védelmén, a másik az elővigyázatosság elvén alapuló megközelítés.

Az **egészség védelme** alapján kialakított határértékek a tudományos kutatás (tudományos folyóiratban publikált) eredményein alapulnak, a **tudományos közélet konszenzusa** mellett. Ha egy bizonyos dózismagyságnál bármilyen, egészségre gyakorolt hatást találnak, ez alapot ad a **biztonsági faktorok** alkalmazására. A biztonsági faktor a lakosság esetében általában ötvenszeres, ami azt jelenti, hogy a megengedett felső határérték a hatásosnak bizonyult dózis legalább ötvened része. Lényeges, hogy a hivatkozott hatásokat a várható egészségügyi következmények szempontjából is meg kell vizsgálni. A megismételt kísérletes vizsgálatok döntő fontosságúak. A WHO és az ICNIRP az egészség védelme alapján alakítja ki határértékeit. Az Európai Közösség 1999-ben kiadott ajánlása is alapvetően ezt az elvet követi, és az ICNIRP határértékein alapul. Az Európai Tanács a Római Szerződés 3. cikkelyébe foglalt

egészségvédelmi elv alapján ajánlást tett közzé, amely a lakosságot érő nem ionizáló elektromágneses sugárzást (0 Hz–300 GHz) hivatott korlátozni. Az ICNIRP és a WHO megállapításait figyelembe véve a Tanács alapkorként meghatározta az emberi szervezet által elnyelt sugárzásmennyiség felső határát, továbbá megengedhető határértékként (referenciaszintként) a külső, levegőben mérhető sugárzás felső korlátait. A szubszidiaritás és az arányosság elvének megfelelően az Unió csak általános elveket és módszereket ír elő a kérdésben, a részletes törvényi szabályozást és előírást, valamint az információterjesztés és a lakosság tájékoztatásának feladatát, a kutatások támogatását és eredményeik kommunikálását a tagállamokra hagyja.

Az **elővigyázatosság elve** alapján a határértékeknek a technológiailag megvalósítható legalacsonyabb értékektől kellene kiindulnia, amelytől a gazdasági megfontolások és az összegyűlt tudományos ismeretek alapján lehet elmozdulni (sok esetben még nem publikált adatokat, előzetesen nyilvánosságra hozott eredményeket is figyelembe vesznek). További jellemző, hogy bármely biológiai hatásról feltételezi, hogy az egészségi következménnyel járhat. Esetenként kiegészítő intézkedéseket is javasol a magasabb fokú egészségvédelem érdekében. Ilyen elővigyázatos megközelítés például, hogy önkéntesen alacsonyabb határértékeket tartanak (és tartatnak) be, biztonsági (elkerülési) távolságokat vezet-

|              | frekvencia-<br>tartomány | átlagos SAR<br>egész testre<br>(W/kg) | lokális SAR<br>fej, törzs<br>(W/kg) | lokális SAR<br>végtagok<br>(W/kg) |
|--------------|--------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
| lakossági    | 10 MHz–<br>10 GHz        | 0,08                                  | 2                                   | 4                                 |
| foglalkozási | 10 MHz–<br>10 GHz        | 0,4                                   | 10                                  | 20                                |

4. táblázat • Az ICNIRP ajánlásának SAR-re vonatkozó alapkorklátai

nek be. Vitatott kérdés az ionizáló sugárzásoknál elfogadott, ún. ALARA (As Low As Reasonable Achievable) vagyis „**az észszerűen elérhető legalacsonyabb sugárzási szint**” elvének alkalmazása. A WHO csak akkor alkalmazná ezt az elvet, ha dózis-hatás összefüggéssel támasztanák alá, illetve feltételezhető lenne, hogy akármilyen kis dózis is egészségkárosító hatású. Az elektromágneses terek élettani hatásaival kapcsolatban nem sikerült egyértelmű dózis-hatás összefüggéseket találni. Arra pedig nincs meggyőző adat, hogy bármilyen gyenge elektromágneses sugárzás egészségkárosító hatással járna.

A hazai egészségügyi határértékeket 30 kHz–300 GHz között (ide tartoznak a rádióműsor-szóró adók, a mobiltelefonok, a bázisállomások és a radarok) az MSZ 16260-86 szabvány tartalmazza (**5. táblázat**). A hazai szabvány a 300 MHz felett szigorúbb előírásokat tartalmaz, mint az ugyanerre vonatkozó ICNIRP, illetve EU ajánlás (MSZ 16260,

0986). Az egészségügyi határértékek a 30 kHz–300 MHz közötti frekvenciákon az EU ajánlásaival közel megegyezők. Hazánkban 30 kHz alatt az egészségügyi korlátokra nézve nincs érvényes szabvány, ezért az ICNIRP/EU ajánlásokat alkalmazzuk.

### *A mobil rádiótelefonok sugáregészségügyi kérdései*

A mobiltelefon terjedése és a közeljövő vezetéki nélküli technológiái a rádiófrekvenciás (RF) sugárzások egészségre gyakorolt hatásainak vizsgálatát és értékelését hosszabb távon is szükségessé teszik. Hazánkban jelenleg több mint 3,5 millióan használnak mobiltelefont. A kérdéssel kapcsolatosan foglalkozó tudományos fórumok és nemzetközi szervezetek (*Egészségügyi Világszervezet, WHO, International Commission on Non-Ionising Radiation Protection, ICNIRP*) megfogalmazták a tényleges feladatokat és azokat a területeket, amelyek további kutatásokat igényelnek.

| övezet                       | elektromos térerősség (V/m) |          |            |
|------------------------------|-----------------------------|----------|------------|
|                              | 30 kHz–3 MHz                | 3–30 MHz | 30–300 MHz |
| veszélytelen                 | 3                           | 3        | 3          |
| biztonsági                   | 50                          | 30       | 20         |
| munka                        | 120                         | 60       | 40         |
| korlátozott időtartamú munka | 960/óra                     | 480/óra  | 320/óra    |
| veszélyes                    | 1000                        | 600      | 400        |

| övezet                       | teljesítménysűrűség (mW/cm <sup>2</sup> ) |                               |
|------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------|
|                              | 300 MHz–300 GHz                           |                               |
|                              | álló sugárzó                              | forgó vagy pásztázó sugárzó   |
| veszélytelen                 | —                                         | —                             |
| biztonsági                   | 0,01                                      | 0,1                           |
| munka                        | 0,1                                       | 1,0                           |
| korlátozott időtartamú munka | $\sqrt{\frac{0,08}{\text{óra}}}$          | $\sqrt{\frac{8}{\text{óra}}}$ |
| veszélyes                    | 10                                        | 100                           |

**5. táblázat** • Az MSZ 16260–86 megengedett felső határértékei a 30 kHz-től 300 GHz-ig terjedő frekvenciatartományban

A kutatások az általános megállapítások után a specifikus kérdések felé fordulnak, vagyis a besugárzottság mértékének és helyének megfelelően a várható biológiai válasz egészségügyi következményeit vizsgálják. A dozimetriai mérések és modellezések egyre pontosabbak. Megállapítható, hogy a mobiltelefon-bázisállomásokból eredő expozíció messze a megengedhető határértékek alatt marad. A mobil kézitelefonokból az embert – elsősorban a fejet – érő RF sugárzás azonban lokálisan akár az egészségügyi határértékeket is meghaladhatja.

A mobiltelefonok terjedése a WHO állásfoglalása szerint is újszerű közegészségügyi kérdéseket vet fel, ugyanis az érintett populáció nagysága miatt a viszonylag kis kockázat is számottevő következményekkel járhat. Az epidemiológiai kutatást nehezíti, hogy az elektromágneses terek hatásainak egészségügyi kockázata feltehetően igen csekély, de az érintett populáció nagy (emiat is nehéz igazán jó kontrollcsoportot

találni). Ez nagyszámú vizsgált csoportot, új szemléletű és tudományos megközelítésű kockázatbecslést, statisztikai kiértékelést igényel. Kellő ismeretek hiányában a WHO és az Európa Tanács is a kérdés elővigyázatos kezelésére int.

A kutatások egyéb területein is számos nehézséggel találkozunk. Az egyik legfontosabb kérdés, hogy a feltehetően csekély hatás milyen módszerrel mutatható ki egyáltalán. Igazán meggyőző a dózis-hatás összefüggések kimutatása lehetne. Ezt azonban nehezíti, hogy egy bizonyos dózisonál nagyobb sugárzás már hőhatást okoz, amely elfedhet más kölcsönhatásokat.

### *Dozimetriai kérdések mobil rádiótelefonok esetében*

A mobil kézi készülékek kis teljesítményű rádiófrekvenciás eszközök. A legelterjedtebb GSM készülékek a 900 MHz-es frekvenciasávban 2 W, az 1800 MHz-es sávban 1 W csúcsteljesítménnyel üzemelnek (6.

| üzemmód                                                                                  | GSM 900 MHz<br>2W csúcs (class 4) | GSM 1800 MHz<br>1W csúcs (class 1) |
|------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| maximális csúcsteljesítmény<br>(legnagyobb teljesítményszabályozás)                      | 2 W                               | 1 W                                |
| teljesítményszabályozás tartománya<br>a csúcsteljesítményre vonatkoztatva                | 0,003–2 W                         | 0,001–1 W                          |
| maximális átlagteljesítmény<br>(DTX üzemmód nélkül)                                      | 240 mW                            | 120 mW                             |
| teljesítményszabályozás tartománya<br>az átlagteljesítményre vonatkoztatva               | 0,36–240 mW                       | 0,12–120 mW                        |
| maximális átlagteljesítmény<br>DTX esetében 50–50 %-os<br>beszélgetés/hallgatás esetében | 135 mW                            | 67 mW                              |
| minimális átlagteljesítmény<br>DTX esetében 50–50 %-os<br>beszélgetés/hallgatás esetében | 0,202 mW                          | 0,067 mW                           |

**6. táblázat** • A GSM 900 MHz-es és a GSM 1800 MHz-es mobiltelefon készülékek jellemzői

*táblázat*). A GSM telefonok esetében az RF teljesítmény nem folyamatos, hanem pulzusmodulált jellegű, 217 Hz ismétlődési frekvenciával (4,615 ms időrésben 0,577 ms pulzusszélességgel). A GSM telefonok automatikus teljesítményszabályozóval vannak ellátva. A DTX üzemmódban (discontinuous transmission) további teljesítmény- és modulációsabályzás történik.

### *Rádiófrekvenciás expozíció mobiltelefonok esetében*

A mobiltelefonok rádiófrekvenciás sugárzása a készüléken vagy a készülékben elhelyezett antennával történik. Mindkét esetben az embert érő expozíció az ún. sugárzási közeltérben valósul meg. Ezért az emberi fejet érő RF tér általában rendkívül inhomogén, nem egyenletes, sem időben, sem térben. A közeltér miatt az expozíció a levegőre vonatkoztatva nehezen meghatározható. Bár vannak becslések a teljesítménysűrűség nagyságára közeltérben (pl. GSM készüléktől néhány cm távolságban a teljesítménysűrűség 1000–1500 mW/cm<sup>2</sup> is lehet), a szabványosítási dokumentumokban a levegőben mérhető (elektromos vagy mágneses) térerősség, teljesítménysűrűség helyett az emberi fejben elnyelt teljesítmény, az SAR a meghatározó (7. táblázat).

Az eddigi mérési adatok azt mutatják, hogy a GSM-készülékek kisugárzott RF teljesítményének közelítőleg a fele, esetleg ennél nagyobb hányada is a fejben nyelődik el. Ez az érték nagyban függ a telefon típusától, a használat módjától, kevésbé befolyásolja a fej mérete, bár az utóbbi időben a gyermekek mobiltelefonálásával összefüggésben ezek a kérdések ismét a vizsgálatok középpontjába kerültek. A mérések azt mutatják, hogy a GSM-telefonok esetében az agyszövetben kialakuló SAR maximum általában 2 W/kg alatt marad, a fülben azonban meghaladhatja ezt az értéket. A kapott eredményt erősen befolyásolja az

is, hogy a számítást, illetve a mérést mekkora átlagolt tömegre vonatkoztatták. Az 1 g-ra átlagolt eredmény mindig magasabb SAR-t eredményez, és általában elmondható, hogy az 1 g-ra vonatkoztatott megengedhető határérték csaknem ötszörös szigorítást jelent a 10 g-ra vonatkoztatott átlaghoz képest. Az ICNIRP, illetve EU ajánlása 10 g-os átlagra vonatkozó bevezetését is nagy szakmai vita előzte meg, amely jelen formájában megengedőbb az USA-beli előírásnál. A mérések és számítások közti különbségek elsősorban a fejfantom, illetve fejmodell, a mérési módszerek, valamint az alkalmazott numerikus eljárások eltérő alkalmazásának tudhatók be. Többek között ezek az eltérések is igényelték, hogy az EU a mobiltelefonok sugárzására vonatkozó mérés technikai szabványt dolgozzon ki. (ICNIRP, 1996, Kuster, 1996, Thuróczy, 1998).

### *Dozimetriai vizsgálatok és termikus modellek*

Sugárvédelmi szempontból az SAR mint a határértékre vonatkozó alapvető dozimetriai mennyiség meghatározása elengedhetetlen. Az utóbbi időben a biológiai kölcsönhatásokat figyelembe véve egyre jobban előtérbe kerül a mobiltelefon RF sugárzásából adódó agyszöveti hőmérséklet-változás meghatározása. A termikus modellezés egyre nagyobb hangsúlyt kap, ugyanis az RF sugárzásra vonatkozó eddigi kutatások azt bizonyították, hogy ahol valamilyen egészséggel összefüggő biológiai válasz mutatkozott, ott hőhatást is észleltek. Ezért a hőhatás kizárása alapvető minden sugárvédelmi szabályozásban és ajánlásban. Svédországi felmérések azt mutatták, hogy a mobiltelefont használók melegedést éreznek azon az oldalon, ahol a telefont használják. A melegedés érzésének több oka lehet (pl. a telefon melegedése, fülhöz, archoz szorítás stb.), ebből az egyik maga az RF sugárzás. Az eddigi eredmények azt

| <b>vonatkoztatás/<br/>érvényesség</b>                             | <b>USA</b><br>FCC                        | <b>EU</b><br>CENELEC   | <b>Japán</b><br>ARIB STD-T56 |
|-------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------|------------------------------|
| az ajánlást/szabványt<br>megalapozó<br>dokumentum                 | NCRP/ANSI/IEEE                           | EU ajánlás             | RCR STD-38                   |
| alkalmazási kör                                                   | lakosság<br>(nem ellenőrzött<br>terület) | lakosság               | lakosság                     |
| egésztestre vonatkozó<br>fajlagosan elnyelt<br>teljesítmény (SAR) | 0,08 W/kg                                | 0,08 W/kg              | 0,08 W/kg                    |
| maximális lokális<br>fajlagosan elnyelt<br>teljesítmény (SAR)     | 1,6 W/kg                                 | 2 W/kg                 | 2 W/kg                       |
| átlagolási idő                                                    | 30 perc                                  | 6 perc                 | 6 perc                       |
| átlagolási tömeg                                                  | 1 g                                      | 10 g                   | 10 g                         |
| fejfantom                                                         | nem definiált                            | meghatározott          | több javasolt<br>fantom      |
| telefon pozíciók                                                  | szabványos                               | 4 különböző<br>pozíció | szokásos                     |

**7. táblázat** • A mobil rádiótelefonok sugárzásának alapkörlátaira vonatkozó szabványok és ajánlások

mutatták, hogy a fül és a bőr hőmérséklet-emelkedése döntő mértékben a telefon melegedéséből és magából a telefon érintkezéséből vezetett hőként jelentkezik. Az agyszövet, illetve a fülcimpa melegedése az RF sugárzásból maximum 0,1 °C körül lehet (GSM 900 MHz, 250 mW esetében). Számítógépes modellezések alapján az agyszövetben 1 W/kg elnyelt teljesítmény (SAR) 0,1–0,16 °C hőmérséklet-emelkedést okozhat. A hőmérsékleti modellek azért fontosak, mert a lokális hőmérsékletváltozásnak biológiai és egészségügyi jelentőséget tulajdonítanak.

**Egészségügyi kutatási irányok**

A WHO az epidemiológiai kutatások eredményeit tartja a legfontosabbnak, ezekben egy adott lakossági csoport megbetegedési, illetve halálozási adatait vizsgálják. A

WHO 2000-ben indított, 14 országot érintő, az agydaganatra, a feji és nyaki tumorokra vonatkozó kutatása 2004-ben fejeződik be. Az agydaganat előfordulását vizsgáló eddig publikált kutatások nem mutattak ki eltéréseket a mobiltelefont használók körében. Az eredmények bizonytalansága miatt azonban hangsúlyozzák, hogy a kutatásokat és az újabb adatok gyűjtését folytatni kell. További sejtés, hogy abban az esetben, amikor a telefon kisugárzott RF teljesítménye hőmérsékletemelkedést is okozhat az agyszövetben, káros egészségi hatással lehet számolni.

A további kutatások az agy funkcionális működésére, illetve alapkutatásokra irányulnak (**8. táblázat**). A középpontban a figyelem, a reakcióidő, a memória és a hallórendszer áll. Az eddigi eredmények csak a reakcióidő rövidülését erősítették meg

független kutatások alapján. A hallórendszer vizsgálata, már csak dozimetriai megfontolásokból is, a kutatások előterébe került. Kiemelt kutatási terület a sejtmembrán működésbeli változása, az ingerületátviteli folyamatok és a vér–agy gát szerepe. Számos, az utóbbiakra vonatkozó publikált kísérlet megerősítésre vár.

### Összefoglalás

Az elektromágneses terek élő szervezetre gyakorolt hatásainak kutatása jelentős fejlődés alatt áll. Kellő ismeretek hiányában az Európa Tanács is felvetette, hogy a kérdést nem árt elővigyázatosan kezelni. Vitatott kérdés az ionizáló sugárzásoknál elfogadott **ALARA, az ésszerűen elérhető legalacsonyabb sugárzási szint** elv alkalmazása is. A nemzetközi és az EU-szabályozás és szabványosítás nem teljes. A szab-

ványosítások folyamatban vannak, de sok területen nincs egyetértés sem a szakemberek, sem az EU országai között. A szabályozási, szabványosítási munkát nehezíti, hogy számos esetben a technikai, ipari előrehaladás megelőzte az egészségügyi, környezetvédelmi megfontolásokat. Gyakorlati alkalmazásuk azért is nehéz, mert a szabványokhoz tartozó méréstechnikai eljárásokat csak most dolgozzák ki. További nehézség, hogy a megengedhető határértékek megállapításánál a lakosság már meglévő expozíciós szintjeit is figyelembe kell(ene) venni. Az egészségügyi határértékek nemzetközi egységesítésének egyik akadálya, hogy a tudományos kutatás a nem ionizáló sugárzások egyes területein (pl. az 50 Hz-es mágneses terek, egyes rádiófrekvenciás sugárzások) nem talált igazán megbízható dózis-hatás összefüggése-

| Vizsgálat tárgya                                                                                               | Eredmény                                                                                      | Szerző                        | Időpont            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|--------------------|
| EEG vizsgálatok GSM 900 esetében                                                                               | Fiziológiai reguláción belüli változások. Az agyi keringésben nincs változás                  | Thuróczy, Gy                  | 1999               |
| GSM telefon expozíciót követően hallásvizsgálatok különböző kvantitatív és szubjektív audiológiai módszerekkel | Eltérések találhatók a hallórendszer idegpályáinak egyes szakaszain 20 perces expozíció után. | Kellényi, L.,<br>Thuróczy Gy. | 1999, 2001         |
| reakcióidő-rövidülés felismerése                                                                               | Rövidülés (~14ms) csak 1W, CW esetében, ezért hőhatást feltételeznek.                         | Preece, A.                    | 1999. UK           |
| memóriafeladatok vizsgálata mobiltelefonálás közben EEG regisztrálással                                        | EEG változások a 8 Hz-es tartományban feladat és mobiltelefon expozíció alatt.                | C Krause                      | 2000. SF           |
| EEG vizsgálatok NMT 900, GSM 900 és PCN 1800 készüléknél, 19 önkéntes személynél                               | Csak az NMT esetében volt változás az EEG spektrumában.                                       | Hietanen, M.                  | 2000. SF           |
| reakcióidő vizsgálat GSM 900 (0,25W) esetében.                                                                 | Reakcióidő-rövidülés (9–25 ms),                                                               | Koivisto, M.                  | 2000, 2001 SF      |
| szubjektív tünetek (fejfájás, fáradtság, melegedés érzés, bőrpír, bizsergés, viszketés)                        | Nem jelentkeztek tünetek 30–60 perces telefonálás után önkénteseknél (48 f)                   | Koivisto, M.                  | 2001. SF           |
| figyelem és összpontosítás vizsgálata mobiltelefont használó kamaszoknál                                       | Egyes figyelemmel összefüggő feladatok a mobilhasználóknál jobbak voltak.                     | Lee, T. M. C.                 | 2001.<br>Hong Kong |

### 8. táblázat • Mobiltelefon RF expozíciójának vizsgálata humán kísérletekben

ket. Sőt, bizonyos kísérleti eredmények azt sejtetik, mintha a kisebb expozíciónak nagyobb biológiai hatása lenne, illetve azt egyéb körülmények is befolyásolnák. Végül a szabványok, ajánlások kialakítását, alkalmazását nehezíti, hogy a civilizált társadalom életéből nem zárhatók ki az elektromágneses sugárzások. A lakosság expozíciója várhatóan növekedni fog, akár az eddigi trendeket, akár a jövőre vonatkozó fejlesztési terveket tekintjük.

A szabványok és ajánlások kialakításánál alapvető cél, hogy az elektromágneses sugárzások használatára vonatkozó szabályozásnak sokféle egyéni, csoport- és gazdasági érdek összhangját kell megterem-

tenie, elsőbbséget adva az egészségvédelem szempontjainak, de nem gátolva a korszerű technológiák nemzetgazdasági elterjedését. Biztosítani kell továbbá, hogy ezeknek az alkalmazásoknak az egészségkárosító hatásai, illetve az ebből eredő kockázatok ne haladják meg a társadalom számára elfogadható és az alapvető sugárvédelmi szabályozásban rögzített szinteket.

Kulcsszavak: *elektromágneses sugárzások, rádiófrekvenciás sugárzások, dozimetria, elektromos permittivitás, mágneses permeabilitás, elektromágneses expozíció, szűrkehályog, rádiófrekvenciás eszközök, mobiltelefonok, szabványosítás*

## IRODALOM

- ICNIRP (1996): Statement: Health issues related to the use of hand-held radiotelephones and base transmitters, *Health Physics* 70, 587
- ICNIRP (1998): Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields (Up To 300 GHz), *Health Physics* 74, 494–521
- Jánosy G., Bakos J., Ferik J., Thuróczy Gy., Szabó L. D. (1991): Monitorok sugárzása és a védekezés lehetőségei, *Elektrotechnika* 84, 187
- Jánosy G., Thuróczy Gy., Szabó L. D. (1991): Mikrohullámú sütők sugárzása és a védekezés lehetőségei, *Elektrotechnika*, 84, 197
- Lin, J. C. (1989): *Pulsed Radiofrequency Field Effects in Biological Systems*, in: Lin, J. C. (ed): *Biological Effects of EM Fields*, 165–177, Plenum Press
- Kuster, N., Balzano, Q. and Lin, J. C. (ed) (1996): *Mobile Communications Safety*, Chapman and Hall, London
- Mátay G., Zombory L. (2000): *A rádiófrekvenciás sugárzás élettani hatásai és orvosi biológiai alkalmazásai*, Műegyetemi Kiadó, Budapest
- McKinlay, A. F., Repacholi, M. H. (ed) (1999): *Exposure Metrics and Dosimetry for EMF Epidemiology*, NRPB, Radiation Protection Dosimetry, 83, No. 1–2
- MSZ 16260–86 (1986): A nagyfrekvenciás elektromágneses tér megengedett határértékei, Magyar Szabványügyi Hivatal
- NCRP (1986): Report on Biological Effects and Exposure Criteria for Radio frequency Electromagnetic Fields, No. 86
- NRPB (1992): Electromagnetic fields and the risk of cancer. Report of Advisory Group on Non-ionising Radiation. Chilton: National Radiation Protection Board. Doc. NRPB 3(1): 1–138
- Petersen, R. C. (1991): Radiofrequency-Microwave Protection Guides, *Health Physics*, 61, 59
- Polk, C. H., Postow, E. (ed) (1996): *Biological effects of electromagnetic fields*, 2<sup>nd</sup> Ed. Boca Raton, Florida: CRC Press
- Repacholi, M. H. (1998): Low-Level Exposure to Radiofrequency Electromagnetic Fields: Health Effects and Research Needs *Bioelectromagnetics*, 19, 1
- Repacholi, M. H., Cardis, E. (1997): Criteria for EMF health risk assessment. *Radiat Prot Dosimetry* 72, 305
- Tenforde, T. S. (1996): Interaction of ELF magnetic fields with living systems. In: Polk, C. H., Postow, E. (eds): *Biological effects of electromagnetic fields*, 2<sup>nd</sup> Ed. Boca Raton: CRC Press, p 185–230
- Thuróczy Gy. (1999): Mobiltelefon bázisállomások sugáregészségügyi és szabványosítási kérdései, *Szabványügyi Közöny*, 51, 31
- Thuróczy Gy. (1998): A mobil hírközlés sugáregészségügyi kérdései, *Magyar Távközlés* 9, 26
- Thuróczy Gy. (1996): Elektromágneses terek biológiai hatásai. I: Mikrohullámú és rádiófrekvenciás sugárzások, *Magyar Távközlés* 7, 50
- Thuróczy Gy. (1996): Elektromágneses terek biológiai hatásai. II: Alacsonyfrekvenciás elektromos és mágneses terek, *Magyar Távközlés*, 7, 21
- Thuróczy Gy., Szkladányi A., Szász E., Szabó L. D. (1991): Mikrohullámú dozimetria biológiai anyagokban, *Elektrotechnika* 84, 241
- UNEP/WHO/IRPA (1987): Environmental Health Criteria 69: Magnetic Fields. WHO, Geneva
- WHO (1993): Electromagnetic Fields (300 Hz–300 GHz), Geneva, World Health Organization Environmental Health Criteria 137