

Marx György

## Születni veszélyes

Lakossági kockázatok

---

### Az aggódás kora

— *Aki megszületik, egyszer — valamilyen okból — meg is fog halni. Zérus kockázat éppúgy nem létezik, mint végtelen hosszú földi élet. Ezért a valószínűség és a kockázat kvantitatív megértésének a mai állampolgárok számára a demokratikus választások, döntések meghozatalához elengedhetetlen alpműveltség részévé kell válnia* — érvelt Kemény János, aki a mindenki számára érthető BASIC számítógépnnyelvet meg az e-mailt egyeteme minden hallgatója részére bevezette, és akit Carter elnök a harrisburgi reaktor-üzemzavar kiértékelésére fölkért.

— *Ha úttesten mégy át, előbb balra nézz, majd az úttest közepén jobbra* — szoktuk oktatni gyermekeinket, de nem tesszük hozzá: — *Nézz fölfelé is, épp nem dől-e rád egy kémény vagy nem zuhan-e fejedre egy repülő.* — Pedig utóbbinak is zérustól különböző a valószínűsége! Az Egyesült Államokban például minden évben meghal egy-két ember a rázuhanó repülőgéptől, az ilyen halál kockázata (ott) 1/100 000 000 év körül járhat. Ezt köznapi tapasztalat alapján elhanyagolhatónak (értsd: gyakorlatilag zérusnak) ítélik.

A kockázat (rizikó, riszk — mint „reszkiroz”) matematikai értelmezése a következő:  $R = W \cdot K$ , ahol  $W$  a bekövetkezés valószínűsége,  $K$  pedig a következmény súlyossága. (Bizonyosság esetén  $W = 1$ . Halálesetben  $K = 1$ .) A valószínűség értelmezése szerint, ha  $N$  személy mindegyikét ugyanakkora  $R$  kockázatnak tesszük ki, akkor a kollektív kockázat (a várhatóan okozott halálesetek száma)  $N \cdot R$ . — Hogy egyszerűen beszélhessünk, vezessük be a mikrorizikó fogalmát: ez  $R = 1/1\ 000\ 000$  kockázat. Ha egymillió embert egy mikrorizikó kockázatnak tesznek ki, akkor 1 halálos áldozat várható. Nemzetközi megítélés szerint ekkora kockázattal jár

2500 km utazás vonaton,

2000 km utazás repülőn,

80 km autóbussen,

65 km autón,  
 12 km kerékpáron,  
 3 km motorkerékpáron,  
 egy cigarettát elszívni,  
 két hetet dohányossal együttélni,  
 fél liter bort meginni,  
 tíz napot téglaházban lakni,  
 három napig Budapest belvárosában lélegezni,  
 két percig sziklát mászni,  
 öt éven belül méhcsípéstől szenvedni,  
 tíz éven belül villámcsapást kapni.

Az adatokat nézve és a közvélekedéssel egybevetve látható, hogy az emberek egy mikrorizikót teljesen elfogadhatónak tartanak. Ezt tükrözi pl. az Amerikai Kongresszus azon gyakorlata, hogy 1 mikrorizikó kockázatát még nem tekintenek figyelemre méltónak.

1987-ben Kalifornia állam népszavazáson 2/3 többséggel elfogadta az *Ismeret Joga* néven emlegetett törvényt, amely többek közt kimondja, hogy „Egy embert sem szabad tudva vagy tudatlanul olyan kémiai hatásnak kitenünk, amely rákos vagy genetikai károsodást okoz, anélkül, hogy e veszélyre előzőleg felhívnanánk a figyelmét”. Node mi volna a zérus kockázat? A fizikus talán azt felelné: Amit nem tudok kimutatni. (De miért nem dolgozol ki pontosabb módszert?) Végül a kaliforniai jogászok abban állapodtak meg, hogy  $R_{\max} = 10$  mikrorizikó a figyelmeztetés nélkül maximálisan okozható kockázat mértéke. Ezért kell minden pakli cigarettára rányomtatni a figyelmeztetést: „A dohányzás káros az egészségre”.

10 mikrorizikó kockázat önmagában kicsinek tűnhet, annak már többször kitettük önmagunkat. De kiszámíthatjuk a kollektív kockázatot. Ha a Kaliforniában jogilag megengedett  $R_{\max} = 10$  mikrorizikó a figyelmeztetés nélkül maximális kockázat pl. egy ország 10 milliós lakosságának ( $N = 10^7$ ) minden egyes egyedét éri, ez  $N \cdot R_{\max} = 10^7 \cdot 10^{-5} = 100$  várható halálesetet jelent. A fent megengedett kockázat ebben a megvilágításban nem is tűnik olyan csekélynek. A kockázatbecslések publicisztikai tálatásának kétféle lehetősége nagy kísértést kínál a közvélemény újságírói manipulálására. Pl. a harrisburgi reaktor-üzemzavar alkalmával a radioaktivitás nem engedte kiszabadulni a megerősített bezáró épület. A használhatatlanná vált reaktor megtisztításakor azonban a kémiaiilag megfoghatatlan aktív nemesgázok kikerültek a légkörbe. A környező négymillió lakost érő többlet sugárterhelést az egyik lap így kommentálta: A rákveszély megnövekedése nem több, mintha fél cigit elszívna egy alkalommal. (Ugye milyen megnyugtató?) Egy másik újság így írt: A technokrata felelőtlenség várhatóan két ártatlan polgár életébe kerül. (Ugye milyen szörnyű?) Csak szorozni kell tudnunk: A két közlés matematikailag egyenértékű!

Kérem tehát azokat, akik a modern élet veszélyeiről értekeznek, akik ezeket az adatokat olvassák, írástudói felelősséggel idézzék azokat. Nem egyetlen kiragadott szám viszonyítás nélküli hangoztatására, hanem racionális értékelésre kell ma nevelni hazánkban. Európaivá kívánunk válni. A magyar népnek és választott döntéshozóinak komoly elhatározásokat kell tennie a közeljövőben. Felelős választásra csak erre felkészült, erre előkészített, a feltett kérdés reális

alternatívait felfogó és racionálisan dönteni képes állampolgárok közössége vállalkozhat.

Nem minden foglalkozás kockázatmentes. A kereskedelmi szakmában vállalt kockázat mindössze néhány mikrorizikó évente. Gyárakban már 10–100 mikrorizikó/év. A közlekedésben és építőiparban 400 mikrorizikó/év. A szénbányászatban 800 mikrorizikó/év. Elektromos távvezetékek építésénél 1200 mikrorizikó/év. Tengeri olajkutakon dolgozva 1500 mikrorizikó/év. Mélytengeri hálászoknál 1800 mikrorizikó/év.

Az Egyesült Államok elnökének (így merénylők céltáblájának) lenni több ezer mikrorizikó/év. Mégis akadnak ilyen munkát vállalók — megfelelő kompenzáció fejében.

Az átlagos honpolgárnak néhány mikrorizikó kockázattal kell szembenéznie. Itt rejlik az egyik bökkenő. Tegyük fel, egy cselekedet kockázatáról el kívánjuk dönteni: kisebb vagy nagyobb, mint egy mikrorizikó? Ehhez egymillió főt kellene ekkora ártalomnak kitenni, közben figyelni: meghal-e közülük 1 ennek a cselekedetnek a következtében? De statisztikáról, valószínűségről van szó, ahol  $N$  átlagesemény szórása  $N^{1/2}$ . Ha tehát megelégszünk 10% pontossággal, akkor  $R = 1$  mikrorizikó kimutatásához 100 millió embert kellene kitenni a kérdéses kockázatnak, és figyelni, meghal-e közülük  $100 \pm 10$ . Ilyen kísérlet elvégzése gyakorlatilag és erkölcsileg egyaránt megvalósíthatatlan. Azt kellene tehát mondanunk,  $R \leq 10$  mikrorizikó értékekről beszélni értelmetlen. Két kiút van: szándéktalan baleseteknél (dohányzás, röntgenorvosok, fejlődő világ) vagy katasztrófáknál (Hirosima, Csernobil, Bhopal) utólag rekonstruálni lehet a hatásokat és elemezni a következményeket. (Nyilvánvaló a pontatlanság.) Egyes embereket súlyos baleset miatt erős (halálos kimenetelű) behatás ér, ebből a hatás és következmény arányosságát föltételezve próbálhatunk extrapolálni gyenge behatások alacsony kockázataira. (Megvizsgálandó az arányosság feltételezésének természettudományos jogosultsága.) Vagy baktériumok milliárdjaival, fehéregerek ezreivel lehet kísérletezni; ekkor az élőlény=ember azonosságát, valamint az arányosságot feltételezve lehet levonni a következtetést. (De tudjuk: a csótány vagy saláta sugár-sérülékenysége nagyságrenddel kisebb az emberénél. Az egér viszont ezerszerre kisebb és százszorta rövidebb életű, mint az ember, mégis az egerek ugyanakkora hányada hal meg rákban, mint az ember. Ebből az következne, hogy az emberi sejtek összessége rák ellen 100 000-szer jobban védett, mint az egéré. Mégis fehéregereken próbálják ki, hogy egy vegyszer, tartósító, orvosság bevezetése jelentene-e humán rákkockázatot.)

Alvin Weinberg idézte, hogy a társadalomban értéshiány okozta érzelmi félelem hatalmasodott el az ipari és műszaki forradalom veszélyeivel kapcsolatban, annak ellenére, hogy az ipari forradalom kibontakozása óta az átlagos emberi életkor kétszeresére nőtt az iparosodott országokban, jelenleg kétszerese a fejletlen (ipar által „még nem veszélyeztetett”?) országokban tapasztalt átlagos életkornak. (Hazánkban a születéskor várható időtartam 1900 óta 35-ről 70 évre emelkedett.) Ezért beszél ő a jelen (egyébként meglepően békés) évtizedekről mint az aggodás koráról. Az aggodalom egyik összetevője az ismerethiány és a racionálisan reális gondolkodásban való iskolázatlanság.

Félünk, hogy szándékos gyilkosság áldozatává válhatunk. A statisztikai adatokat kockázatra átszámítva:

Magyarországon gyilkosság	30 mikrorizikó/év
Az Egyesült Államokban gyilkosság	100 mikrorizikó/év
Oroszországban gyilkosság	250 mikrorizikó/év
Magyarországon öngyilkosság	490 mikrorizikó/év
Dohányzás okozta halál, Kína	500 mikrorizikó/év
Dohányzás okozta halál, világátlag	1000 mikrorizikó/év
Dohányzás okozta halál, USA	2000 mikrorizikó/év
Dohányzás okozta halál, Magyarország	3000 mikrorizikó/év

Aki fél a gyilkostól, vigyázzon: a legvalószínűbb tettes önmaga! A realitás egyik eleme az a tény, hogy végül is valahogy meghalunk. 10 millió főből évente többen meghalnak különféle okból:

szívbetegség	36 000
egyéb keringési betegségek	29 000
daganatos betegségek	28 600
tüdőbaj és más fertőző betegségek	2 300
légzőszervi meghűléses betegség	7 600
cukorbetegség	2 000
máj, vese, prosztatata, fekély	6 700
szülés, vetélés, magzati vagy genetikai ártalom	2 200
más betegségek	22 300
alkohol	1 000
gyilkosság	300
öngyilkosság	4 900
közlekedés	2 000
otthoni baleset	1 300
egyéb baleset	3 500
	<hr/>
	150 000
ebből férfi	78 000
ebből nő	72 000

Az egyéni kockázatot szemléletes az életkor-megróvidülés nyelvére lefordítani. Életkort megrövidítő „szokásaink” hatása:

férfinak születni	-3000 nap
aggregényként élni	-3000 nap
szegénynek lenni	-500 nap
kimaradni az általános iskolából	-800 nap
közlekedni	-120 nap
nagy helyett kis autót vezetni	-50 nap
80 km/óra helyett 120 km/óra sebességkorlát	-40 nap
évi 1 tüdőrontgenre járni	-120 nap
1 kg súlyfölsleget növelni	-90 nap
naponta 10 cigit elszívni	-450 nap

Ezzel elérkeztünk a kémiai kockázatok problémájához.

## Kémiai kockázatok

Az ólom a legelterjedtebb kémiai mérgek egyike, amely ólomból készült vízvezetéki csövekből kerül ivóvizünkbe, ólomtartalmú benzint fogyasztó autók kipufogógázaiból tüdönkbe, lakásunk ólmos festékrétegéből mindent megnyaló gyermekeink szájába. A kisgyermekek csontot építő szervezete az ólomatomokat összetéveszti a kalcium atomjaival, mész helyett beépíti az enzimfehérjébe is, így azok működésképtelenné válnak. Ez intelligenciacsökkenést, túlzott mozgékonytágot okozhat. A kisgyermekes és terhes anyák szervezetébe vitt ólom 50%-a is fölszívódik. (A felnőtteknél ez az arány már csak 15% körül van, az ő szervezetük nem igényel annyi kalciumot, sikeresebben védekeznek az ólom felvétele ellen.) Az Egészségügyi Világszervezet (WHO) ajánlása 1 liter vérben nem enged meg 0,2 mg ólomnál többet, mert e fölött már káros hatások jelentkeznek. De az Egyesült Államokban a gyerekek vérének átlagos ólomtartalma 6 mg/liter, Angliában 7,5 mg/liter, egyes európai városokban (Párizs, Athén, Szófia, Budapest) 10 mg/liter. Sok lakásba ólomcsövön érkezik a víz. Az angol szabvány már megtiltja 50 mg Pb/liternél nagyobb ólomtartalmú víz fogyasztását, de lakások millióinak vízvezetékcső-cseréje milliárdokba kerülne. Egyes lakásokban a vízvezetéki víz ólomkoncentrációja ennél nagyságrenddel nagyobb is lehet. (Különösen a lágy, savanyú kémhatású víz oldja az ólmot. Legjobb a vizet jól kiereszteni a csapból, mielőtt ivópoharunkba töltünk.)

A legtöbb ólom a levegőből kerül szervezetünkbe. A városi levegő ólomtartalma meghaladhatja az 1 mg/m<sup>3</sup> értéket, pedig a megengedett érték 0,05 mg/m<sup>3</sup>. Ezért tértek át a fejlett országok az ólommentes benzínre: annak előállítására több kerül, de olcsóbban adják. Az ólom — sajnos — nem bomlik magától. Biológiai felezési ideje vérben 25 nap, húszszövetben 40 nap, csontban 30 év. Az ólmot nehéz az idegrendszerileg károsult gyermek szervezetéből eltávolítani. Ezt csak egyes ólom-atomok molekulacsapdába ejtésével lehet megtenni, de az ilyen kezeléssorozat gyermekekenként 100 000 dollárba kerül.

A kémiai kockázatokat nehéz számszerűen jellemezni. Az Egyesült Államok Környezetvédelmi Hivatala egyszerűség okából (különböztetés) *kockázat/dózis arányosságot* rendelt el a rákkeltő kémiai anyagokra vonatkozóan. A függvény meredeksége például 0,1 mikrorizikó/mg arzén esetében. A természetes vizek átlagos arzéntartalma 0,01 mg/liter, de néha 1 mg/liter értéket is elér. A talaj arzéntartalma általában 7 mg/kg, de ennél több százszor magasabb értékek is előfordulnak. Innen a talajvíz magasabb arzéntartalma. Magyarországon az ivóvíz maximálisan megengedett arzéntartalma 0,05 mg/liter. Ha valaki ebből a vízből naponta 1 litert fogyaszt, 1 év alatt összesen 1 mikrorizikó rákkockázatot. (Dél-Magyarországon vannak tiszerte több arzént tartalmazó kutak is. Az 1980-as években megtiltották ezek használatát, mert évente 10 mikrorizikó rákkockázatot tesz ki azt, aki belőlük rendszeresen iszik, ez pedig megengedhetetlen. Egy alkalommal bírósági döntés kötelezte a békéscsabai vízművet a lakosság által befizetett vízdíj részleges visszatérítésére, mert a csapvíz arzéntartalma meghaladta a megengedett értéket.)

A tüdőbaj áldozatainak száma 50 év alatt tizedére csökkent a tüdőbajjelenes oltóanyag használatának köszönhetően. A környezeti ártalmak rosszabbodása (és a dohányzás hazai terjedése) miatt viszont közel tízszeresére emelkedett a

tüdőrák okozta elhalálozások évi száma. Az asztmás megbetegedések száma a hetvenes évek óta tízszeresére nőtt. Jelen szakmai becslések szerint *házánkban évente a halálokok 6%-a levegőszennyezés: 10 000/év.* (Ezt a városi és falusi életmód kockázatainak egybevetéséből lehet kiolvasni.) Százhalombattán (ahol az olajerőműben a feldolgozás után visszamaradt nehézolaj eltüzelésével termelik a villamos energiát) a gyerekek légzőszervi megbetegedéseinek száma még a magas budapesti értéknek is a háromszorosa! (A környezetvédők az 1990. évi Föld Napján tett nyilatkozatukban e környezeti ártalmak áldozatainak hazai számát 30 000/év értékűre becsülték.)

A világ évente 5 billió (öt milliószor millió) cigarettát gyárt. A magyar dohányipar évi termelése 1960 óta több mint megduplázódott, a lakosság egyharmada dohányzik. 1990-ig nálunk tilos volt cigarettát reklámozni, ma minden gyerek ismerheti a Marlboro és más szavak által fémjelzett „modern-sportos-vadnyugati” életmód vonzó voltát. Kelet-Európában az 1990-es években évi 1–2%-kal nőtt a dohányfogyasztás. Az Egészségügyi Világszervezet évente 3 millióra becsüli a dohányzás áldozatainak számát, ezek 1%-a Magyarországon hal meg. (A WHO szerint évi 29 000. Ennyivel kedvezőtlenebb a dohányosok hazai életstatisztikája a nemdohányosokéval szemben.) Ha ezt az adatot összevetjük a hazai 31 milliárdos cigarettafogyasztással, megértjük, hogy jött ki az *1 cigaretta=1 mikrorizikó* kockázatbecslés. A dohányzás áldozatainak száma világszerte messze fölülmúlja a kábítószerkéét, mégis a kábítószer kockázata felé fordul a nagyobb figyelem. (Talán a dohánygyárak szorgalmasabb adófizetők?)

Ha valaki napi 8 órát tölt dohányfüstös szobában, ez a közvetett dohányzás annak felel meg, mintha havonta két cigarettát elszívna.  $R = 24$  mikrorizikó/év kockázat pedig meghaladja, amit másoknak (gyermekeinknek) — azok beleegyezése nélkül — okozni szabad. Házánkban 3 millió gyerek él. Ha szüleik egyharmada dohányzik, legalább millió gyerek van érintve. Könnyű megbecsülni, hogy dohányos szülők által gyermekeiknek okozott kollektív kockázat hány fő/év Magyarországon.

A tényleges hatást elbonyolítja a mérge szervezetben történő visszatartásának mértéke, különböző rákkeltő anyagok együttes támadása, a biológiai immunválasz nemlineáris jellege. Például tekintsük a cigaretta és az alkohol együttes rákkeltő hatását. Nemdohányos (aki 10 cigarettánál kevesebbet szív naponta) és nemivó (aki 40 g alkoholnál kevesebbet iszik naponta) számára is létezik valamelyes rákkockázat. Ha viszont valaki erős dohányos (20-nál több cigarettát szív naponta), kockázata 8-szoros. Ha valaki erősen iszik (80 g-nál több alkoholt naponta), a kockázat 18-szoros. De ha valaki füstöl és iszik, kockázata 44-szeres. A kockázatok nem csak összeadódtak! A szervezet védekező, hibajavító rendszere több rákkeltő anyag együttes támadását nem képes leküzdeni.

## Napozni jó?

„*Angolkóros leszel, ha nem mégy a napra*” — mondta gyerekkorunkban a nagypapa. Valóban: a közeli lány ultraibolya sugárzás elősegíti a D-vitamin szintézisét.

Az első emberek Afrikában jelentek meg, ők nyilván feketék voltak. Mikor a túlnépesedés egy részüket Európába szorította, egy pigmentképződést csökkentő mutáció előnyös volt, mert a bőr több napfényt hasznosíthatott, így a

szervezet gyengébb napfényben is elegendő D-vitamint termelhetett. Európában sötét téli délutánokra kvarcolást ajánlanak a doktorok.

A napfény kemény ultraibolya fotonjai szétverik a légkör molekuláit, így jön létre az ionoszféra. A mélyebb légrétegeket csak a lágyabb ultraibolya fotonok (0,5—0,7 aJ) és a látható fotonok (0,25—0,5 aJ) érik el. A Föld létének első milliárd éve során komplex szerves molekulák fennmaradását lehetetlenné tette az ultraibolya fotonok támadása. Élet nem merészkedhetett ki a szárazföldre. A tengerek zöld planktonjai azonban oxigént pumpáltak a légkörbe fotoszintézis révén ( $hv + CO_2 \rightarrow C + O_2$ ), amiből a sztratoszférában ózon keletkezhetett ( $hv + O_2 \rightarrow O + O$ ,  $O_2 + O \rightarrow O_3$ ). A nagyobb ózonmolekulában 0,25 nm hosszú pályára delokalizált elektronok is vannak. Ezek elnyelik a lágy ultraibolya fotonokat ( $hv = 0,6$  aJ). Így az élet az ózonpajzs védelme alatt elfoglalhatta a szárazföldeket.

A nyolcvanas években vették észre angol kutatók, hogy az ózonpajzs az Antarktisz fölött néha tizedrészére is elvékonyodik. Az ózonveszteség még Ausztrália fölött is elérte 15%-ot. Ekkor ott azon kezdtek gondolkodni, hogy az utcákat veszélyesen napos időben fóliasátor védelme alá kell helyezni. A tetteseket sikerült a színhelyen tetten érni: a freon típusú (C-,F-,Cl-ből összetett) molekulák (spray, hűtőszekrény és légkondicionáló hatóanyagai) nagyon tartósak, kidiffundálnak a sztratoszférába, ott szétesve  $Cl_2O$  keletkezik, ami katalizálja az ózon lebontását. Az ózonpajzs összetörése a szárazföldek ultraibolya besugárzását, az élővilág károsodását, emberek számára a bőrrákot jelentené. Ezért határozta el a Torontói Konferencia (amelyen 1987-ben a magyar kormány képviselője is részt vett) a freon típusú vegyületek gyártásának felére történő visszaszorítását 2000-ig.

Az Egyesült Államok (a napot kedvelő Reagan elnök bőrrákot szenvedett orra miatt is) különösen érzékeny az ózonpajzs védelmére. A Környezetvédelmi Hivatal becslése szerint az ózonréteg 1%-nyi ritkulása is már az ultraibolya besugárzás 2%-os növekedését eredményezi, ami 3%-kal növelheti a bőrrák-esetek gyakoriságát. Amerikában fehérbőrűek közt a rákesetek 40%-a bőrrák; háromszor akkora gyakorisággal fordul elő a napfényes Texasban, mint az esős Iowában. A legtöbb a bőrrák Ausztráliában, melynek sivatagi szubtrópusi éghajlata, antarktisi közelsége különösen érinti a szőke és vörös hajú lakosságot. Ott a bőrrák-esetek száma 10 év leforgása alatt megkétszereződött. De a bőrrák-esetek száma hazánkban is mintegy 2-szeresére nőtt 20 év, 4-szeresére 40 év alatt. Mivel a strandolás és leburnulás divatos lett, a magyar huszonévesek bőrrákgyakorisága 10 év alatt megháromszorozódott.

Az F-C-Cl kémiai kötések nagyon polárosak, így nagyon erősek. (Ezért olyan tartós a konyhadények teflonbevonata.) A freon típusú molekulák gyűlnek a légkörben, a ma emittált freon 10—15 év alatt diffundál fel az ózonréteggel, a föld színén akkor növekszik meg az ultraibolya sugárzás. Az általa kiváltott bőrrák lappangási ideje további 10—15 év. A freon egyes molekulái 400 esztendőt is megélnek. Így a freon jellegű vegyületek hatása halmozódik. Aki ma kap bőrrákot, annak a szülei által használt freon lehetett oka: az 1960-as években az iparosodott országok zabolátlanul eregették a freont a levegőbe. Amit mi bocsátunk ki, attól gyermekeink közül fognak egyesek szenvedni. Ezeket a vegyületeket elsősorban az északi féltekén gyártják és használják, évente több százmillió tonnát.

1991-ben a Fülöp-szigeteken kitört a Pinatubo vulkán, ami további hatalmas mennyiségű poláros molekulát juttatott a légkörbe. Így történt, hogy 1992. január 20-án minden korábbi anktarktiszi rekordot megdöntő ózonvékonyodást észleltek Kanada fölött! A  $\text{Cl}_2\text{O}$  koncentrációja 1 milliárdod részt ért el Európa (így Magyarország) egén, 1,2 milliárdod részt is meghaladt Skandinávia fölött. Hazánk felett sem ritka az (húszeves átlaghoz viszonyítva) 5–10%-os ózonréteg-vékonyodást közlő jelentés. A spray-dobozok és kilyukadt hűtőszekrények hazánkban is összehozhatnak száz megamelanomás többlet halálesetet évente. És legújabb jelentések szerint az ózonréteg vékonyodása évről évre fokozódik, 1999-re talán új rekordot ér el.

Az ultraibolya sugárzás molekulák gerjesztése, a kötések megbontása által hat. A következőkben a legjobban kikutatott, legpontosabban mért, leginkább számontartott jelenségkörrel foglalkozunk: az *ionizáló sugárzások* kockázataival. Igaz, a biológiai és kémiai kockázatok nagyságrendekkel magasabbak. Az ionizáló sugárzás azonban a többinél nagyobb szakmai figyelmet váltott ki, így példaértékű következtetéseink nagyságrendileg helytállóak.

Ezt a példát annak ellenére részletezzük, hogy a fizikusok joggal kérdezik: miért csak a fizika-tankönyv foglalkozik sugárattalommal, amikor a kémia-, biológia-, technika-tankönyvek ezeknél súlyosabb veszélyekről hallgatnak? Természettudományos gondolkodásban iskolázatlan emberek (és a publicisztika) hajlanak arra, hogy „*amelyik kockázat mérhetően különbözik zérustól, az veszélyes; amelyiket eddig mennyiségileg nem tudtak jellemezni, az veszélytelen*” érvelést alkalmazzák. Látni fogjuk: olyan parányi sugárdózisok is mérhetők, amelyek a bizonyítottan káros dózisonál 100 000-szerre kisebbek, de értékük és kockázatuk számmal megadható. Nagyságrenddel nagyobb biológiai, kémiai, mechanikai kockázatokról viszont sokkal kevesebbet tudunk. Mégsem szabad abba a hibába esnünk, hogy ágyúval lövünk verébre, mert azt napvilágnál látjuk, éjszaka pedig megesz a farkas.

## Radioaktivitás

Az *aktivitás* egysége 1 Bq (Becquerel)=1 bomlás/másodperc. (Régi egység  $1\text{g}^{225}\text{Ra}$  aktivitása volt: 1 Curie= $37 \cdot 10^9$  Bq.) Ha a felezési idő  $T$ , akkor  $N$  atomból álló minta aktivitása

$$A = N \ln 2 / T = 0,7N / T.$$

Radioaktív bomlás során ionizáló sugárzás keletkezik. Az emberi testben keltett ionok együttes ionizációs energiája tekinthető az ionizáló sugárzás által előidézett változás mértékének. A *dózis* az elnyelt ionizációs energia és testtömeg viszonya, egysége 1 Gy (gray)=1 Joule/kg. (Régi egysége volt az 1 rad=0,01 Gy.)

Egyező dózisérték esetén nem minden sugárzástípus kelt azonos biológiai hatást. A röntgensugarak vagy béta-bomlásból eredő gyors elektronok kis valószínűséggel ionizálnak, egy sejtre egy ion jut vagy egy sem, ennyit hibajavító enzimek még orvosolhatnak. Az ugyanakkora energiájú alfa-részecske nagyobb tömege miatt lassabban mozog, jut ideje arra, hogy egy sejten belül sok iont keltsen, aminek kijavítását már nem győzik az enzimek, ezért nagyobb az esélye annak, hogy az alfa-sugárzás (vagy a neutron által meglökött atommag) egy sejten belül maradandó változást idézzen elő. Ha a sugárzástípus biológiai

kvalitását egy  $Q$  faktoriall vesszük figyelembe, akkor a *hatásos dózis* (dózisegyenérték) a  $H = Q \cdot D$  képlettel értelmezhető.

- $Q = 1$  röntgen-, gamma-, béta-sugárzás esetén,
- $Q = 2$  lassú neutronokra,
- $Q = 10$  gyors neutronokra,
- $Q = 20$  alfa-részekre, maghasadás termékeire.

A hatásos dózis egysége 1 Sv (sievert)=1 J/kg. (Régi egysége 1 rem=0,01 Sv.) A lakosságot (később részletezendő kevés kivételtől eltekintve) elsősorban röntgen-, gamma-, béta-besugárzás érheti, ezért a dózis és hatásos dózis fogalmát (pongyolán, de menthetően) egybemossák. Mértékéül az 1 millisievert=0,001 Sv=1joule/1000kg (foton vagy elektron hatására) mennyiséget használják, ez az átlagembert érő hatásos dózisok nagyságrendje

Az *ionizáló sugárzás által keltett ionok* durván megzavarják a sejt enzimek által finoman, komplex organikus hálózat részeként szabályozott biokémiai reakciórendszerét, ezért feltétlenül *kockázat forrásai*. Tudjuk például, hogy 10 Sv dózis feltétlenül halálos, 5 Sv pedig 50% valószínűséggel vezet halálra. 3 Sv dózis napokon belül akut tüneteket eredményez. (Eddig a legnagyobb dózist túlélt ember Pjotr Palemarcsuk: ő 1986-ban 8 mSv dózist kapott Csernobilban, és ma már egészséges.) Ezek a determinált testi (szomatikus) dózisok, de ekkora dózist ember csak egészen kivételes alkalmakkor szenvedett el. (Hirosimában és Nagaszakiban a bomba epicentruma körül húzott 1,5 km sugarú körön belül, Csernobilban az atomerőmű területén.) Az emberek nagy tömegét érő (fenyegető) dózisok ennél kisebbek, azok nem vezetnek szükségszerűen megbetegedésre, de évek, évtizedek múltán rákot okozhatnak. Hogyan lehet ezek késleltetett (leukémia-, rákkeltő) statisztikus kockázatát megbecsülni?

Hirosimában és Nagaszakiban volt egy zóna (az epicentrum körül 1,5 km – 2,5 km sugárral vont körgyűrűben), ahol sokan kaptak 0,1 Sv nagyságrendű hatásos dózist. Az itt túlélő emberek által elszenvedett dózisok nagyságát megpróbálták utólag rekonstruálni (házban vagy kívül tartózkodtak? a házban hol? milyen anyagból épült a tetőzet?), figyelemmel követték sorsukat, haláluk okát a következő évtizedekben. A kapott statisztikát azután egybevetették a más városokban élő japán lakosság adataival. A kivonás által nyert becslés azt mutatja, hogy 100 mSv hatásos dózis a leukémia és rák következtében történő elhalálozás kockázatát (ami összesen 20%) mintegy 5%-kal növeli meg. (Hasonló nyomonkövetés folyik Csernobil térségében is.) Ha elfogadjuk a *kockázat/dózis arányosságot*, az egyenes meredeksége 50 mikrorizikó/mSv értékűnek adódik. A Nemzetközi Sugárvédelmi Bizottság (ICRP) hivatalos becsléseiben ezt a kockázati tényezőt használja. (Különösen nagy dózisoknál e kockázati tényező dupláját kell alkalmazni.)

Hogy pontosak legyünk, tudnunk kell, hogy a különböző testrészek nem egyformán sérülékenyek. Az ionok rekombinálódásuk előtt ott keltik a legnagyobb zavart, ahol épp intenzív biokémiai reakciók folynak, tehát a különösen gyorsan osztódó sejtekben. (Hasonló okból a kisgyermekek is sugárérzékenyebbek.) Ember esetében az *ionizáló sugárzás determinisztikus és statisztikus testi kockázata bizonyított, de genetikai ártalmat nem sikerült kimutatni*. (Mintha a

női szervezet önként elvetélné a megtermékenyült, de károsultnak bizonyult petesejtet, így belőle nem fejlődik magzat.)

Mekkora is 1 millisievert hatású dózis statisztikus rákkockázata? R=50 mikrorizikó. Ezzel egyenlő

két és fél pakli cigit elszívni,  
25 liter bort megiszogatni,  
600 km hosszan kerékpározni,  
3000 km hosszan autózni,  
naponta kétszer átkelni egy forgalmas úttesten egy éven át,  
1 veseműködés-röntgenvizsgálaton átesni.

Vállalna-e Ön ekkora kockázatot? (A várt válasz: attól függ, hogy minek az érdekében.) 1986-ban Csernobilból átlagosan 0,25 mSv dózis ért minden magyart. Mekkora kockázatnak lettünk kitéve? Mintha mindenki elszívott volna egy pakli cigarettát. Ez utóbbi veszélyes cselekedetre pedig még óriásplakátok is biztatnak! De szögezzük le: mindent meg kell tennünk, hogy atomeróművi baleset kockázatát és a többi elkerülhető kockázatot is csökkentsük.

Közben ne felejtjük el a kockázat valószínűségi értelmezését! Egy rulett pörög, amin sok-sok különböző szám van, de a tét: élet vagy halál. Egyetlen nagyenergiájú részecske is halált okozhat (miként a kémiai szennyezésnél egyetlen molekula, biológiai fertőzésnél egyetlen vírus). Ezért a nemzetközi szabvány így fogalmaz: *a lakossági sugárterhelés olyan kicsivé teendő, amennyire ez ésszerűen lehetséges.* (Alacsonyítsd Le, Amennyire Racionálisan Alacsonyíthatod! ALARA-elv. Ez például a tüdőszűrés gyakorlatára így fordítható át: a fel-fedezett tüdőrák-esetek száma legyen nagyobb, mint a röntgenezés által kiváltott leukémiás megbetegedések száma.) — Hazánkban rendelet írja elő, hogy a lakosság előidézett sugárterhelése ne haladja meg az 5 mSv/év értéket. (Orvosi vizsgálatok — életveszély elhárítása érdekében — ezt túlléphetik). Foglalkozási (kedvezményekkel ellensúlyozott) sugárterhelés egy évben sem lépheti túl az 50 mSv/év értéket, többéves átlagban pedig a 20 mSv/év értéket. (A Paksi Atomeróműben dolgozók ezt a dózist messze nem érik el. Az atomeróműben eddig kapott legnagyobb dózis csak egyszer volt 33 mSv/év.)

Miként árt az ionizáló sugárzás?

Főleg vízből vagyunk. Ezért az ionkeltés valószínű folyamata:  $\text{foton} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}^+ + \text{OH}^-$  (töltött ion!),  $\text{OH} + \text{OH} \rightarrow \text{H}_2\text{O}_2$  (oxidálószer!)

Mind a töltött részecske, mind a hidrogén-peroxid erősen megzavarja az enzimek által finoman szabályozott biokémiai ciklus-hálózatot. (A sejt belseje H-gazdag redukált összetételű, ezt a kémiai állapotot az oxidáció tönkretelheti.) Hasonló ártalmas hatása volt egykoron annak, hogy a növényi fotoszintézis oxigénnel dúsította fel bolygónk légkörét. Ez volt az első nagyszabású légkör-szennyezés, amely pusztítóan hatott a felkészületlen sejtekre. Később az élőlények hatékony  $\text{H}_2\text{O}_2$ -ellenes védelmet fejlesztettek ki, amely ideig-óráig véd az oxigéntámadás ellen (kataláz, szuperoxid-diszmutáz enzimek). E szerint az *oxigénlégzés és az ionizáló sugárzás hasonló módon támadja a sejt működést.* A szárazföldi életre felkészült sejtek ezt késleltetni képesek, de kivédeni nem. (A relatívan több oxigént fogyasztó, gyorsabb anyagcseréjű egér csak 1 évet él meg.) Ha 1 mSv/év sugárdózis 50 mikrorizikó/év kockázattal jár, 60 éves

életkorral számolva ez 0,3% kockázat. De az emberek közel fele megbetegszik rákban, 20%-uk rákban pusztul el. Ezt *James Lovelock* légkörkémikus (a bioszféra-organizáció GAIA-modelljének megalkotója) legújabb könyvében úgy értelmezi, hogy a lélegzés ténye kb. 70 mSv/év sugárdózisnak megfelelő, vele azonos kockázatnak tesz ki mindnyájunkat. Hagyjuk abba a lélegzést? Ostoba kérdés. A légkör szabad, kémiailag aktív oxigénje fokozott aktivitást tett lehetővé, fákat, állatokat, embereket, kultúrákat teremtett. Szervezetünk elég jól védekezik ellene. Ugyanilyen dilemma az ionizáló sugárzás is. Gyógyíthatatlan leukémiát kelthet és gyógyítható tüdőrákot fedezhet fel. A nukleáris energia realizálódhat radioaktivitást szétszóró atombomba és a radioaktivitást fedő alatt tartó atomerőmű formájában. (Részletezés később.)

## Milyen aktív vagy?

Egy kg vízben vagy húspanban összesen összesen  $10^{26}$  db atom van. A hidrogén (10 súly%), oxigén (60%), szén (20%), nitrogén (5%), nátrium (3%), kalcium (1%), foszfor (1%), kén (0,5%), kálium (0,3%) atomjaiból épülnek föl a biokémiailag legfontosabb vegyületek.

A légkört kívülről a kozmikus sugárzás nagyenergiájú protonjai bombázzák. Ezek a felsőlégkörben atommag-rombolást végeznek, többek közt neutronokat szabadítanak ki. A neutronok a levegő nitrogénjéből a  $n + {}^{14}\text{N} \rightarrow {}^{14}\text{C} + p$  reakció szerint folyamatosan termelik a  ${}^{14}\text{C}$  izotópot, amely radioaktív: 5700 év felezési idővel bomlik. (Egyensúlyi koncentrációja  ${}^{14}\text{C}/\text{C} = 10^{-12}$ .) A megadott adatok szerint egy 75 kg tömegű úr testében ez 750 billió darab  ${}^{14}\text{C}$  atom jelenlétét jelenti. Közülük másodpercenként 3 000 bomlik el:

$$A({}^{14}\text{C}) = 3\,000 \text{ Bq.}$$

A Napban hidrogénatomok héliummá fuzionálnak, ez termeli a napfény energiáját. Ezenközben radioaktív hidrogén (trícium,  ${}^3\text{H}$ ) is keletkezik, amiből egy keveset a napszél Földünkre sodor. A trícium radioaktív: 12 év felezési idővel bomlik. (Az utánpótlás és bomlás egyensúlyaként az esővíz tríciumkoncentrációja  ${}^3\text{H}/\text{H} = 10^{-18}$ .) A 75 kg tömegű úr teste sok H-atomot tartalmaz, van benne 4,8 milliárd tríciumatom is, ebből másodpercenként 10 bomlik el:

$$A({}^3\text{H}) = 10 \text{ Bq.}$$

A Tejútrendszer közeli vidékén 5 milliárd éve szupernóvarobbanás történt. A szupernóva több milliárd fokos hőmérsékletén sok volt a szabad neutron. Ezek a szupernóvában gyakori  ${}^{40}\text{Ca}$  atomok egy részét  ${}^{40}\text{K}$  atomokká alakították. A szupernóva által kidobott anyag csillagközi gázokon torlódva csomósodásokat idézett elő. Ilyen csomókból született a Nap is és bolygói 4,6 milliárd évvel ezelőtt. A  ${}^{40}\text{K}$  atommag felezési ideje 1,28 milliárd év, ezért számuk igencsak megfogyatkozott, mai földi gyakoriságuk alig  ${}^{40}\text{K}/\text{K}=0,0118\%$ . De ez azt jelenti, hogy a 75 kg tömegű úr szervezete ma is tartalmaz 3 000 trillió  ${}^{40}\text{K}$  atomot, közülük viszonylag sok bomlik el másodpercenként:

$$A({}^{40}\text{K}) = 5\,500 \text{ Bq.}$$

Ha összevetjük testünk eme fő radioaktív összetevőit, azt kapjuk, hogy az átlag emberi test aktivitása mintegy 8 500 Bq. *Közel tízezer atom bomlik el bennünk két szívdobbanás közt.*

*Saját testünk anyaga olyan sugárterhelésnek tesz ki bennünket, ami meghaladja a 0,18 mSv/év értéket. 55 éves élettartammal és kockázat/dózis ará-*

nyossággal számolva ez 10 mSv dózissal és 0,05% teljes kockázatnak felel meg. Fél ezrelék annak esélye, hogy saját testünk sugárzása miatt halunk meg. Ettől csak úgy mentesíthetnénk magunkat, ha kibújnánk saját bőrünkéből.

De van önként vállalt kockázat is. Ha egy leány ágyát megosztja egy úrral, gondoljon arra, hogy az úr 8 500 Bq aktivitású radioaktív készítmény. Az úrban másodpercenként 5 500 K-atommag esik szét. Ezek 10%-a 0,23 pJ energiájú gammafotonokat is kelt, amik a leányt is elérhetik! Ha a szoros kapcsolat miatt csupán 8% nyelődik el az 50 kg tömegű leány testében, ez 0,2 billiomod Sv/s sugárterhelést, egy 8 órán át tartó éjszaka során pedig mintegy 15 nanosievert hatásos dózist jelent. *Ezeregy éjszaka során ez bizony 0,01 mSv önként vállalt dózis!* Kockázatát bárki kiszámíthatja: az 1/2 mikro-rizikó, ami megfelel egy fél cigaretta kockázatának. Megérte? (Láttuk, hogy a szüzsies életnek is élettartam-rövidítő hatása van.) Az urak kockázata kisebb, mert a lányok általában kisebb tömegűek, bennük kevesebb a radioaktív atom.

## Lélegezni veszélyes

A tórium felezési ideje 14 milliárd év, az urán felezési ideje 4,5 milliárd év. Az 5 milliárd éve szétrobbant szupernóvában keletkezett tórium és urán javarésze még ma is megvan Földünk talajában. Ezek bomlása (no meg a  $^{40}\text{K}$ ) szolgáltatja Földünk belső melegét, amely pl. hazánk területén átlagosan 100 kW/km<sup>2</sup> energiával áramlik kifelé. (Erre gondolhatunk a hévizi meleg tóban fürödve.) De nem csupán hő áramlik a talajból. A Th-család bomlássorozatában a  $^{220}\text{Rn}$  izotóp (a toron) nemesgáz, 1 perc felezési idővel. Az U-család bomlássorozatából a  $^{222}\text{Rn}$  izotóp (a radon) nemesgáz, 3,8 nap felezési idővel. A talajból kidiffundáló gázok radioaktivitást visznek a légkörbe. Tóriumból több van, de a diffúzióhoz idő kell, ezért végül is mintegy százszor annyi radon van a levegőben, mint toron. A levegő innen származó aktivitása erősen függ a helytől és időjárástól. Tájékoztató koncentrációértékek:

külső levegő mintegy	10 Bq/m <sup>3</sup>
trópusi lakások	20 Bq/m <sup>3</sup>
felére csökkent légcirkuláció	40 Bq/m <sup>3</sup>
lakások világátlagos	40 Bq/m <sup>3</sup>
huzatos magyar szoba	40 Bq/m <sup>3</sup>
átlagos magyar lakás	60 Bq/m <sup>3</sup>
magyar falusi földszintes házban	130 Bq/m <sup>3</sup>
magyar lakások 1%-ában több, mint	300 Bq/m <sup>3</sup>
pince	250 Bq/m <sup>3</sup>
régi svéd háznál megengedett maximum	400 Bq/m <sup>3</sup>
erősen radonos lakás	1 000 Bq/m <sup>3</sup>
barlang, bánya lehet	30 000 Bq/m <sup>3</sup>

A Rudas-fürdő Iuventus-forrás vizével táplált uszodájában 4 000 Bq/m<sup>3</sup>. Hazánkban lakószobában mértek 10 000 Bq/m<sup>3</sup> értéket meghaladó aktivitáskonzentrációt is. Azóta az utóbbi kiugróan magas értékeket a szobák megfelelő átépítésével kiküszöbölték.

A radont belélegezzük, majd — nemesgáz lévén — kilélegezzük. De a radon radioaktív bomlástermékei fématomok, ezek ráülnek a lebegő porszemekre, belélegezve a tüdő falára. Több közülük alfa-bomló, ami a tüdőfal roncsolásához és tüdőrákhoz vezethet. Ma az uránbányákat igen intenzíven szellőztetik. Régen a radon tüdőrákkeltő hatása még nem tudatosult. Az uránbányászok a század első felében több ezer Bq/m<sup>3</sup> aktivitású levegőt szívtak be. Az innen gyűjtött tapasztalat szerint 1000 Bq/m<sup>3</sup> aktivitású munkahely 0,6%-kal növelte a tüdőrák valószínűségét.

A szoba radon tartalmú levegőjének belégzése az embert sugárdózisnak teszi ki. A radon-koncentráció dózisteljesítményre való átszámítására többféle átváltási tényezőt használnak: 1 mSv/év dózisteljesítményt 20 és 60 közé eső radonkoncentráció okozhat. Feltételezve, hogy a radon-bomlástermékek koncentrációja az egyensúlyi koncentráció fele, és hogy időnk nagy részét a hálszobában töltjük, 40 Bq/m<sup>3</sup> radon-koncentráció jelenthet 1 mSv/év dózisteljesítményt. (Munkahelyen rövidebb ideig tartózkodunk, ezért 60 Bq/m<sup>3</sup> koncentrációnak felelhet meg 1 mSv/év dózisterhelés.) Így a következőket mondhatjuk:

- a vadon élő ember (10 Bq/m<sup>3</sup>) hatásos radon-dózisa volt 0,25 mSv/év szellőzött házban élő ember (40 Bq/m<sup>3</sup>) hatásos radon-dózisa lehet 1 mSv/év
- jó nyílászárókkal ellátott lakásban (100 Bq/m<sup>3</sup>) a hatásos dózis lehet 2,5 mSv/év
- nagyon radonos házban (1000 Bq/m<sup>3</sup>) a hatásos dózis 25 mSv/év.

(Az ezeknek megfelelő rák-kockázatértékek — dózissal arányos kockázatot feltételezve — 50 év során 0,06%, 0,25%, illetve jó nyílászárókkal felszerelt „energiatakarékos” lakásban 0,6%, nagyon radonos házban 2,5%. Nem nagy érték, hiszen 20% a rákelhalalozás teljes valószínűsége, és ebben a tüdőrák jelentős hányadot képvisel. A tüdőrák gyakorisága hazánkban az elmúlt évtizedekben háromszorosára nőtt, de ez inkább irandó a dohányzás és közlekedési eredetű légműszennyezés rovására, mint az „energiatakarékos” ablakszigetelésére. Hogy a lakóhelyi radon-földűsulás mégsem elhanyagolható probléma, azt láthatjuk, ha a kollektív kockázat értékére térünk át. Magyarország lakossága  $N = 10$  millió fő. Érthető tehát a növekvő nemzetközi érdeklődés a radon-probléma iránt, hiszen a radon a *modern építkezésre visszavezető lakossági sugárterhelés legnagyobb és leginkább változó összetevője*. Ha a lakosság — bizonyos hirdetésekre hallgatva — energiatakarékosság céljából jó nyílászárókat szerelne fel lakásába és kevesebbet szellőztetne, és így évi 1 mSv-tel megnövelné az elszennvedett dózist, ami egyáltalán nem volna ártatlan változás. A kollektív kockázat  $N \cdot R = 500$  fő/év!

A radon-dózis különösen jelentős Svédországban, ahol urántartalmú kőzet van a felszínen, és a legtöbb lakás egyszintes. Érthető a svédek nagy érdeklődése házuk radonmentesítése iránt. Megtiltják 70 Bq/m<sup>3</sup> -nél nagyobb belső aktivitású házak építését. A 400 Bq/m<sup>3</sup> -nél magasabb aktivitású házaknál Svédországban szükségesnek ítélik az átépítést (alagcsövezés, radonelszívó ventilátoros kutak, gázátszivárgást elszigetelő cement és kátrányszigetelés). Magyarországon az 1996-os atomtörvény ugyan megkivánná a hatóságai radon-korlátot,

de lakásokra jogilag nálunk ilyen még nem létezik. Más országokban a következő korlátok érvényesek:

Egyesült Államok	150 Bq/m <sup>3</sup>
angol, cseh, kínai, német, orosz, szlovák	200 Bq/m <sup>3</sup>
svéd	40 Bq/m <sup>3</sup>
svájci kötelező cselekvési határ	1 000 Bq/m <sup>3</sup>
Európai Közösség ajánlása	200 Bq/m <sup>3</sup>
Egészségügyi Világszervezet ajánlása	200—600 Bq/m <sup>3</sup>

## Csak egy fogröntgen

Magyarországon 2500 orvosi röntgenkészülék működik. Mindnyájunkat megröntgeneztek már. A röntgensugár ugyan szervezetünk molekuláit is ionizálja, de az érzékeny filmen nyomot hagyva információt ad orvosunknak belsónkről, megkönnyítve a gyógyítás munkáját. Ezért a magyar jogi szabályozás szerint az orvosi röntgendózis nem számít be a lakossági 5 mSv/év dóziskorlátba.

A röntgenkészülék egy vákuumcső, amelyben az izzó katódról kilépő és magas elektromos feszültséggel felgyorsított elektronok fémlapba csapódva lefékeződnek, mozgási energiájukat nagyenergiájú fotonok formájában adják le. Régi röntgenkészülékeknél a röntgenfotonok energiája erősen különbözik; hogy elég kontrasztos képet nyerjenek, a besugárzás 1—2 másodpercig is eltarthat. (Halljuk a zúgás hosszát a vizsgálat alatt. Ilyenkor figyelmeztet a röntgenorvos, hogy ne mozogjunk, amíg a felvétel tart. Közben, amíg pl. egy fogunkat a felső fogsorban felülről átsugározzák, ólomkötény-védelem híján áradnak a röntgenfotonok a tudónk felé. Néha azért még jobban megnövelik a sugáradagot, hogy előhíváskor hamarabb kijöjjön a kép, a betegnek ne kelljen annyit várakoznia. Egyetlen felvétel régebbi röntgenkészülékkel túlléphet 1 mSv dózist, ami több, mint 50 mikrorizikót jelent! Nem is engedik a várandós kismamák röntgenvizsgálatát.) Magyarországon 1973-ban 7,4 millió, 1988-ban 10,9 millió röntgenfelvétel készült. Egy lakos orvosi célú átlagos sugárterhelése 0,35 mSv. Egyszerű szorzásból: a kollektív kockázat értéke hazánk lakosságára 175 fő/év.

Egy modern készülék ára 6000 dollárt is elér. Vele (elavulásig) 60 000 felvétel is elkészíthető. A kollektív dózist 60 000 mSv-tel, a kollektív kockázatot 3-mal csökkentheti. Az adózó állampolgár joggal kérdezheti: *az általunk fizetett adóból e célra rendelkezésre álló pénzkereteket hogyan kell befektetnünk, hogy minél több emberéletet mentünk meg?* Egy emberélet ára (nemzetközi megítélés szerint) például

szülési higiénia fejlesztésével (harmadik világban)	50 dollár
fertőtlenítéssel (nők iskolázása, Indonézia)	100 dollár
modern röntgenkészülékek beszerzésével	2 000 dollár
új autópálya építésével	20 000 dollár
orvosi szűrővizsgálatokkal	1 50 000 dollár
autóvezetőknél ütközéskor felfűvödő légzsákkal	320 000 dollár
alacsony szintű atomhulladék üvegesítésével	10 millió dollár

## Jót tenne egy kis sugárzás?

Egyes fürdőorvosok légzőszervi panaszok esetén barlangi kúrát ajánlanak. Osztrák orvosok Bad Gastein bányabarlangját javallják, ahol a felgyülemelő radon aktivitása  $1000 \text{ Bq/m}^3$  értéket magasan meghaladhat.

A kockázat/dózis  $R/D = 50$  mikrorizikó/millisievert arányának feltételezett állandósága izgatja a tudományt, hiszen az  $N \cdot R$  kollektív kockázat másik tényezője ( $N$ ) millió, tízmillió fő lehet. A szigorú arányosságot pl. a következő érvelés sugallja. Az ionizáló sugárzás támadása statisztikus jelenség: a nagy-energiájú részecske vagy ionizálja a DNS-molekula egyik érzékeny pontját, vagy nem. Ha igen, a hibás DNS replikációja ráknövekedésre vezethet.

Először az angol nukleáris ipar átlagosnál nagyobb (10–50 mSv/év) sugárterhelésnek kitett dolgozóinál figyeltek fel arra, hogy köztük alacsonyabb a leukémia és rák gyakorisága, mint az átlagpopulációban. Ez ébresztette az első gyanút a föltételezett arányossággal kapcsolatban.

Bernard Cohen pittsburghi professzor kiszemelte az Egyesült Államok azon 3 államát, ahol a talaj összetétele miatt a lakosságot érő sugárterhelés legmagasabb, és azt a 3 államot, ahol a legkisebb. A dózist összevetette a rákhalálzási statisztikával. Azt találta, hogy a  $100 \text{ Bq/m}^3$  radonkoncentrációnál magasabb sugárterhelésű államokban (Colorado  $145 \text{ Bq/m}^3$ , Észak-Dakota  $135 \text{ Bq/m}^3$ , Iowa  $115 \text{ Bq/m}^3$ ) a tüdőrák-elhalálozás gyakorisága kisebb (410/millió fő évente), a legalacsonyabb sugárterhelésű államokban (Delaware  $29 \text{ Bq/m}^3$ , Louisiana  $35 \text{ Bq/m}^3$ , California  $36 \text{ Bq/m}^3$ ) pedig nagyobb (660/millió fő évente). Nem akarta elhinni az eredményt, ezért vizsgálatait kiterjesztette Svédországra, Finnországra, Kína olyan vidékeire, ahol a felszínen lévő (uránban viszonylag dús) gránit miatt különösen nagy a sugárterhelés, és ezeket ismét egybevetette a normálisnál alacsonyabb terhelésű helyek statisztikájával. Az eredmény megint az volt, hogy *magasabb lakossági sugárterhelés* ( $100 \text{ Bq/m}^3$  táján) *csökkenti a leukémia és rák gyakoriságát*. Hazánkban Mátraderecske az egyik legradonosabbnak ismert település, ott nemdohányzó nőknél hasonló jelenség mutatkozik:  $150\text{--}200 \text{ Bq/m}^3$  táján kevesebb a rákos eset, mint  $100 \text{ Bq/m}^3$  alatt.

A tüdőrák-elhalálozás gyakorisága Mátraderecskén az országos átlag *alatt* van.

A gondolatsorban fontos láncszemet Nagaszaki városának atombomba által sújtott lakossága szolgáltatja. Erről Sohei Kondo könyve számol be: a hatásos dózis függvényében a leukémia valószínűsége először *esni kezd*, majd minimumon megy át és csak magas dózisoknál mutatja az elméletileg várt lineáris emelkedést. (Ilyen hatásküszöb — esetleg védőhatás? — Hirosimában nem mutatkozott, ott ugyanis a bomba eltérő szerkezete miatt a sugárterhelés főleg gyorsneutronoktól származott, amelyek atommagokat meglökve koncentráltan támadnak meg egyetlen sejtet.) Akik Nagaszakiban túléltek az első évet, azok átlagos életkora 4 évvel hosszabbnak bizonyul az átlagos japán életkornál.

Ezek után kezdtek laboratóriumi kísérleteket folytatni az alacsony sugárdózis *kockázatküszöbének*, esetleg *védőhatásának* tárgyában. Az egyszéjtű papucsállatka szaporodását vizsgálták azonos légnymási és kémiai feltételek mellett „lombikban”; mégpedig tengerszinten, 200 m mélyen (kevesebb kozmi-

kus sugárzás). 1 000 m és 3 800 m magasan (50, ill. 300%-kal több kozmikus sugárzás hatása alatt). A nagyszámú papucsállatkával végzett kísérlet statisztikailag biztos eredménye: lenn lassúbb, fenn gyorsabb a szaporodásuk, mint tengerszinten.

Más kísérletek fehéregerek és patkányok élettartamának alakulását vizsgálták különböző napi dózisterhelés mellett. Mindkét kísérlet mérsékelt dózis alkalmazásánál élettartam-növekedést szolgáltatott. Hihetetlenül hangzik. Ha így lenne, mi lehet az oka? Egy újabb kísérletben a besugárzott egerek vérében lévő antitestek mennyiségét mérték meg a sugárdózis függvényében (42 nap folyamatos besugárzás után). Az antitestek mennyisége meredeken a normális érték ötszörösére növekszik 200 mSv/nap dóziséig, a fölött azonban meredeken zuhan a normális érték alá.

*Hevesy György* emlékének tisztelő előadásában *L.E. Feinemengen* sejtenyészeten végzett vizsgálatairól számolt be. Ha egy sejtet nagyenergiájú elektron találat ér, ez  $R_0$  valószínűséggel sejtpusztulást okoz. Két *egyidejű* találat viszont  $2R_0$ -nál *nagyobb* valószínűséggel vezet sejtpusztulásra. Ha viszont az első ( $R_0$  kockázattal járó) találatot pl. *4 óra múlva követte* a második találat, ez utóbbi nem okozott számottevő kockázatnövekedést az első találat  $R_0$  kockázatához képest. Magyarázat: *a második elektron érkezésekor a sejt immunvédelme már mozgósítva volt az első ionizáló találat által!* De ha a második találat 12 órával később történt, mint az első, a kettő együtt a várt  $2R_0$  kockázattal okozott sejtpusztulást.

Egy lehetséges modell mozaikjai látszanak rendeződni. A védőoltások kontrolláltan kismennyiségű toxint visznek az egészséges ember vérébe azért, hogy aktiválják annak védekező rendszerét a toxin termelésére képes mikroorganizmusok várható jövő támadásával szemben. Meglehet, hogy *az alacsony szintű (illetve hosszabb időre széthúzott) sugárterhelés hasonló védelmet aktivál, amelynek feladata az ionizáció és oxidáns közömbösítése*. Ez kis dózisos, illetve mérsékelt oxidatív (tehát rákkeltő) támadások ellen véd, de nagyobb adagokkal szemben erre már nem képes. Ugyanez a nemlineáris viselkedés lehet a magyarázata annak, hogy a dohányosok sugárérzékenyebbek: két egyidejű támadás biológiai kivédése nehezebb. Ezt a modellt általánosan még nem fogadták el. Ezért *a következőkben használt sugárkockázati értékeket felső korlátnak lehet tekinteni:  $R/D \leq 50$  mikrorizikó/mSv*.

## Számítsd ki saját évi sugárdózisod!

Az eddig bemutatott fogalmak alapján vállalkozhatunk e feladat elvégzésére. Tekintsük először a természetes sugárterhelést:

kozmosz sugárzás tengerszinten	0,30 mSv/év
100 m magasság okozta többlet	0,02 mSv/év

Pontosabban: a kozmikus sugárzástól tengerszinten a légkör véd, értéke 1800 m-enként duplázódik. (Találós kérdés: vajon mégis miért hosszabb az átlagos életkor a Mátra falvaiban, mint Budapesten?) Kozmikus eredetű radioaktív anyagokból adódó terhelés:

$^{40}\text{K}$ testben és táplálékban	0,15+0,15	mSv/év
$^{14}\text{C}$ testben és táplálékban	0,015	mSv/év
$^{87}\text{Rb}$ testben és táplálékban	0,06	mSv/év
U-család tagjai a környezetben	0,10	mSv/év
Th-család tagjai a környezetben	0,16	mSv/év
Rn szabad levegőn	0,4	mSv/év

A természetes sugárterhelés átlaga 1 mSv/év.

Ennyit kapnánk, ha az erdőben élnénk, fára telepített fészekben. De az ipari forradalom nem csak azáltal változtatta meg életmódunkat, hogy kiirtottuk a farkast, a pestist és a himlőt. Járulékos sugárterhelési ok, hogy házban lakunk:

Talajból földszinten gyűlő radon	0,5	mSv/év
U-dús könnyűbeton építőanyag (9g U/t)	1,8	mSv/év
Tégla építőanyag (3,5g U/t)	0,7	mSv/év
Gipsz építőanyag (1,5g U/t)	0,3	mSv/év
Faház	0,2	mSv/év
Átlag radon- és toron-terhelési többlet házban	1,5	mSv/év

(\*Megjegyzés: számíts 1 mSv/év terhelést minden gramm uránra a talajban tonnánként.) Ajánlat: költözz cölöpökön álló faházba! A civilizációs radonterhelés értéke ötödére fog csökkenni! További mesterséges sugárterhelések:

Repülőút, minden 2500 km után	0,01	mSv/év
Világító számlapú karóra	0,02	mSv/év
Fekete-fehér TV nézése 1 óra/nap	0,01	mSv/év
Színes TV nézése 1 óra/nap	0,02	mSv/év
Atombomba-kísérletek maradványa ( $^{90}\text{Sr}$ )	0,01	mSv/év
Orvosi röntgen- és sugárkezelés átlaga	0,35	mSv/év
Technikai eredetű sugárterhelés (magyar átlag)	0,5	mSv/év

Következésképp a magyar lakosság átlagos sugárterhelése fejenként 3 mSv/év, a gránittáblán, hideg éghajlat alatt élő svédeké 7 mSv/év, Dél-Indiában tóriumos talaj miatt a keralaiaké 10 mSv/év. Összehasonlítási alapként ezekre a számokra támaszkodhatunk, amikor a nukleáris ipar által okozott sugár-szennyezést vizsgáljuk.

## Radioaktív kihullás

A Paksi Atomerőmű környezetében maximálisan 0,0001 mSv/év volt az erőmű üzeme miatt fellépő többlet lakossági szennyezés. Másik megfogalmazást Teller Ede ajánlott: az atomerőmű kapujában ülve kisebb a többlet sugárdózis ( $10^{-14}\text{Sv/s}$ ), mint valaki mással egy ágyban hálva ( $2 \cdot 10^{-13}\text{Sv/s}$ ). Az erőművi sugárszennyezés elsősorban a maghasadáskor szükségszerűen keletkező radioaktív nemesgázok ( $^{85}\text{Kr}$ ,  $^{133}\text{Xe}$ ,  $^{135}\text{Xe}$ ), valamint  $^3\text{H}$  légkörbe jutásának tudható be. A nemesgáz hasadási termékek kidiffundálhatnak a fűtőelem fém-burkolatán, így a levegőbe juthatnak. A radioaktív nemesgáz önmaga nem veszélyes, csak aktív bomlástermékei. (A nemesgáz-aktivitás 4 millió Bq/s.) A

paksi szellőztetőkémények által a levegőbe eresztett szemcsék aktivitása mintegy 16 Bq/s.

A földkéreg átlagos urántartalma mintegy 4 g/tonna. A vízben oldódó uranil-sókat a humuszsav oldhatatlan vegyület formájában kicsapja, így a korhadó növényekből képződött szenek urántartalma ennél magasabb, a dunántúli szekben eléri a 100 g/tonnát. A szénérőművek pernyéjében tovább dúsul az urán, koncentrációja meghaladhatja a 300 g U/tonna értéket (Szalay Sándor), ami 1 000 Bq/kg aktivitást is túlléphet. Ezzel összemérhető lehet a  $^{40}\text{K}$ -tól származó aktivitás, a kettő együtt elérheti a 2 000 Bq/kg értéket. Az ajkai és inotai erőmű ilyen magas urántartalmú szénnel tüzel, a pernyeemisszió aktivitása 1988-ban Ajkán 17 000, Inotán 22 000 Bq/másodperc volt. Így az 1 MW villamos teljesítményre eső pernyeaktivitás-emisszió az országban 1988-ban így alakult:

Inota	2 700 Bq/s	Komló	7 Bq/s
Ajka	1 300 Bq/s	Borsod	2 Bq/s
Dorog	34 Bq/s	Visonta	1 Bq/s
Tatabánya	30 Bq/s	Paks (atom)	0,01 Bq/s

Ajkán a lakossági sugárterhelés a szálló pernye miatt átlagosan 0,075 mSv/év (maximálisan 0,097 mSv/év) többletet mutatott, ami számukra 5 mikrorizikó plusz kockázatot képezett. Ajkán 0,0976 mSv/év, Pakson 0,0005 mSv volt a maximális évi lakossági dózis. Azóta az üzembehelyezett pernyeleválasztónak köszönhető módon az 1 MW villamos teljesítményre eső szállópernyeaktivitás Ajkán negyedére, Inotán századára csökkent. Inota villamos teljesítménye 100 MW, Paksé 1800 MW.

A világ atomerőművei jelenleg 200 000 MW elektromos teljesítménnyel működnek, többségük az északi féltekén. A velük kapcsolatos nukleáris ipar is szennyezi bolygónkat. Ennek fő forrása a kibányászott urán feldolgozása során légkörbe kijutó radon, ill. az elhasznált fűtőelemek újrafeldolgozása során kémiailag megköthetetlenül kiszabaduló aktív Kr és Xe nemesgáz. A világ nukleáris iparától a magyar polgárt átlagosan 0,00015 mSv/év terheli. Lágú és szétoszló sugárzásról lévén szó, a kockázatra felső korlátokat tudunk adni, de azokat fentiek alapján bárki összevetheti pl. egyetlen cigi, egy úttest-átkelés vagy egy autós kirándulás nagyobb kockázatával. Műszaki eredetű sugárzási kockázatokra az atomerőművek üzemzavarai irányították rá a közfigyelmet. Az idevágó adatok jól mértek és nyilvánosan ismertek. Egy korszerű hidrogénbomba légköri robbanásakor kb. 1 EBq (exabecquerel) =  $10^{18}$  (trillió) Bq aktivitású anyag szóródik szét a légkörben. Viszonyítsuk ehhez a nagyobb nukleáris események által földi légkörbe szórt aktivitást:

1945 Hirosimai atombomba	0,01 EBq
1961 Legnagyobb szovjet hidrogénbomba-kísérlet	10 EBq
1945—1963 Összes légköri atombomba-kísérlet	100 EBq
1957 Windscale reaktor-baleset	0,04 EBq
1957 Kyshtym hulladéktároló balesete	0,1 EBq
1979 Harrisburg reaktor-baleset	0,0001 EBq
1986 Csernobil reaktor-baleset	4 EBq

1992 El Chicón vulkán kitörése	0,4 EBq
A világ széniparának éves kibocsátása	0,6 EBq

A világon ma közel 6 milliárd ember él. Mindenki kap kb. 1 mSv dózist természetes radioaktív forrásoktól. Ezt megnöveli a civilizációs terhelés: házakba költöztünk, fűtünk, világítunk, orvosok gyógyítanak. ENSZ adatok alapján közüljük a Föld lakosságának különböző okokból kapott évi  $N \cdot D$  kollektív dózisát:

világító mutatók karórák	1 ezer Sv
repülő-utazások	10 ezer Sv
orvosi sugárterápia	1 500 ezer Sv
orvosi röntgendiagnózis	1 800 ezer Sv
földgáz hasznosítása	0,003 ezer Sv
geotermikus energia	0,005 ezer Sv
kőolaj hasznosítása	0,1 ezer Sv
nukleáris ipar, lakossági terhelés	10 ezer Sv
nukleáris ipari dolgozók	20 ezer Sv
szénipar és széntüzelés	100 ezer Sv
foszfát műtrágyaipar	300 ezer Sv
házban lakni (radon)	6 000 ezer Sv
természetes radioaktivitás	6 000 ezer Sv

Ezt a folyamatos évenkénti terhelést össze lehet vetni egyszeri nukleáris események kollektív dózisával:

1945 Hirosimai atombomba	1 ezer Sv
1957 Windscale reaktor-baleset	2 ezer Sv
1957 Kyshtym hulladékártoló balesete	2,5 ezer Sv
1961 Novaja Zemplja hidrogénbomba-kísérlet	1 000 ezer Sv
1979 Harrisburg reaktor-baleset	0,04 ezer Sv
1986 Csernobil reaktor-baleset	600 ezer Sv
1992 El Chicón vulkán kitörése	10 ezer Sv
Összes légtéri atomfegyver-kísérlet	30 000 ezer Sv
Összes földalatti atomfegyver-kísérlet	0,2 ezer Sv

Ez utóbbi számokat érdemes összevetni azzal, hogy *normális üzemmódban minden évtized során* az atomipar 300, a szénipar 1000, a foszfátipar 3000 ezer Sv kollektív dózist okozott a világ lakosságának. Dózis/kockázat arányosságot feltételezve ezer Sv kollektív dózis 50 áldozatot jelent. Küszöbhatást feltételezve viszont az ilyen alacsony dózisos kockázata elenyésző. Emlékezzünk: világszerte autóbalesetben is, dohányzástól is több millió ember hal meg évente. Tiltjuk be az autókat? Talán inkább tanuljunk meg biztonságosan vezetni, felelősségteljesen alkalmazni a technikát. Ez a komfortos élet feltétele. És ez lehetséges.