

BELTÉRI GAMMA-SUGÁRZÁS MÉRÉSEK TAPASZTALATAI ÉS JAVASLAT AZ ÉRTÉKELÉS MÓDSZERÉRE

Homoki Zsolt^{1,2*}, Szigeti Ágnes²

¹Pannon Egyetem, Vegyészmérnöki és Anyagtudományok Doktori Iskola

²Nemzeti Népegészségügyi Központ, Sugárbiológiai és Sugáregészségügyi Főosztály

1221 Budapest, Anna u. 5.

*homoki.zsolt@nnk.gov.hu

A kézirat beérkezett: 2021.08.11.

Közlésre elfogadva: 2023.02.27.

Assessment and proposal for methodology of indoor gamma radiation measurements

The public interest grows rapidly in radiation measurements in buildings and therefore more and more people undertake to do such kind of measurement using different approach. At this time, there is no official guideline or commonly applied practice on indoor gamma dose rate measurements. First of all, it was needed to analyse the gamma radiation levels in existing dwellings. Additionally, we developed a practical guideline for the survey of indoor gamma dose rate. The described protocol and statistical data give a good basement the radiation protection experts to the evaluation of measurements results.

Keywords – gamma radiation, gamma dose rate, radiation dose, slag, slag concrete block

Jelentősen növekszik a lakosság érdeklődése az épületek beltéri sugárzása iránt és ennek köszönhetően egyre többen végeznek ilyen célú méréseket különféle műszerekkel. Az épületen belüli gamma-sugárzások vizsgálatának jelenleg nincs kialakult, egységes módszere és nincs megállapított vonatkoztatási szintje sem. Szükségesnek láttuk ezért egy gyakorlati mérési és értékelési útmutató kidolgozását. A leírt protokoll segítséget ad az ezzel foglalkozó sugárvédelmi szakemberek számára a helyszíni mérések elvégzéséhez és az eredmények értelmezéséhez.

Kulcsszavak – gamma-sugárzás, gamma-dózteljesítmény, sugárterhelés, salak, salakbeton

BEVEZETÉS

A sugárvédelemi ajánlások fejlődésével a figyelem a nukleáris fenyegetettséggel szembeni védekezés és a dolgozók sugárvédelme után a lakosság természetes forrásokból származó sugárterhelése felé fordult.

Természetes sugárterhelésünk legnagyobb részt a beltéri radontól és az építőanyagok gamma-sugárzásától származik. 2016 óta hazánkban is van mindkét kockázati tényezőre jogszabályban meghatározott vonatkoztatási szint. A forgalomba hozható építőanyagok gamma-sugárzásától származó többlet külső sugárterhelést évi 1 mSv-ben korlátozták. A teljesülésének ellenőrzésére a laboratóriumi méréssel meghatározott aktivitáskoncentrációkból számolt építőanyag-index használatos. Forgalomba hozni olyan építőanyagot lehet, amelyre teljesül, hogy az index értéke kisebb, mint 1. Ekkor az

feltételezhető, hogy az annak felhasználásával készült épületben a bent tartózkodók többlet éves gamma-sugárterhelése kisebb, mint 1 mSv. Ez az eljárás azonban nem alkalmazható a már meglévő épületekre, amikor a lakóterek beltéri gamma-sugárzását kell értékelni. Az ilyen fennálló sugárzási helyzetekben az elfogadható szintet minden esetben az épület állapotának, használati módjának, a beavatkozási lehetőségek figyelembevételével kell meghatározni. Ezen vizsgálatoknak jelenleg nincs szakmailag megalapozott módszertani háttere. Célunk volt vizsgálataink eredményének közreadásával segítséget adni az ezzel foglalkozó sugárvédelmi szakemberek számára a helyszíni mérések végzéséhez és a kapott eredményeik értelmezéséhez.

GAMMA-SUGÁRZÁS AZ ÉPÜLETEKBEN

A beltéri gamma-sugárzás forrása és nagysága hazai épületekben

A radioaktivitás környezetünk természetes jellemzője. Forrásai a Föld keletkezése óta jelen lévő, természetes eredetű, földkérgi radioizotópok, amelyek a milliárd éves felezési idejük miatt még nem bomlottak le – és ezek bomlástermékei, valamint a kozmikus sugárzás és annak hatására a magas légkörben folyamatosan keletkező ún. kozmogén radionuklidok jelenléte. A földkérgi radioizotópok megtalálhatók minden környezeti elemben, anyagtypustól függően akár jelentősen különböző koncentrációban. Külső sugárterhelésünk legnagyobb részt ezen izotópok gamma-sugárzásától származik. Az emberi test sugárterhelésének meghatározásához az 1 m magasságban mért értékeket szokás alapul venni, mert kb. ez a magasság felel meg az álló, felnőtt ember geometriai középpontjának, illetve ebben a magasságban helyezkednek el a sugárzásra legérzékenyebb szövetek, az ivarszervek. [RP 106], [UNSCEAR 2000]

A szabadban és épületekben mérhető dózisteljesítmény kétféle sugárzásból tevődik össze. Forrása a mérési pont környezetében lévő természetes radionuklidok gamma-sugárzása és a kozmikus sugárzás ionizáló komponense. A kozmikus sugárzás intenzitása időben közel állandó és hazánk földrajzi szélességén kb. 32 nSv/h. A gamma-sugárzás intenzitása a mérési pont környezetében jelen lévő gamma-sugárzó radionuklidok mennyiségétől és minőségétől függ. A szabadban, a felső 30 cm-es talajréteg természetes radioizotópjainak koncentrációja határozza meg elsődlegesen a mért dózisteljesítmény gamma-sugárzásból származó járulékát. [Sas PhD] Tapasztalatunk szerint, összhangban az irodalmi adatokkal, egy adott helyszínen a háttérsugárzás értéke csak legfeljebb kismértékű ingadozást mutat és egy adott ponton a hosszú idejű (pl. éves) átlagérték az idővel nem változik. Számottevő, ideiglenes növekedést bizonyos időjárási körülmények mellett lehet csak megfigyelni, ilyen pl. a nagyobb esőzés, amikor a csapadék a talajfelszínre mossa az addig a levegőben eloszlott radioaktivitást hordozó port. [RP 106], [UNSCEAR 2000]

Intézetünk több évtizede méri passzív és aktív mérőeszközökkel a szabad környezetben és épületekben a dózisteljesítményt. A 626 helyszínen, természetes környezetben, 1 m magasságban végzett mérések alapján a hazai háttérsugárzás dózisteljesítményének mediánja 98 nSv/h, környezeti dózisegyenérték-teljesítményben, $H^*(10)$ -ben kifejezve (számtani átlag: 99 nSv/h,

10–90% percentilis: 77–122 nSv/h). A városi, beépített környezetben általában a természetes környezethez képest kisebb értékek mérhetők. A 10–90% percentilisként megadott tartományt a gyakoriság szerint növekvő sorrendbe rendezett teljes halmazból a 10%-ot kitevő legkisebb és legnagyobb értékek elhagyásával kapjuk, az így megadott értékek az összes érték 80%-át teszik ki.

Tapasztalatunk szerint a külső természetes környezethez képest az épületekben rendszerint nagyobb, ritkábban kisebb dózisteljesítmény értékek mérhetők. Mitől függ ez?

Minden építőanyagban van valamekkora természetes radioaktivitása. Az építőanyagok radioaktivitását ugyanazon földkérgi radionuklidok adják, amelyek a természetes környezetünkben is jelen vannak. Közülük a mennyiségük és a dózisteljesítmény-járulékuk alapján az ^{238}U és ^{232}Th bomlási sorok elemeinek, valamint a ^{40}K -nek a legnagyobb a jelentősége. Az ^{238}U bomlási sor dózisteljesítmény-járulékaért elsősorban a ^{226}Ra és leányelemei felelősek, ezért az ^{238}U sor aktivitáskoncentrációját gyakran a ^{226}Ra radionuklid koncentrációjával fejezik ki. [RP 112].

A beltérben mért dózisteljesítmény legfőbb forrása az épület szerkezeti elemeit alkotó építőanyagokban lévő radioizotópok gamma-sugárzása. [RP 112] A beltéri gamma-sugárzás nagyságát tehát elsődlegesen a felhasznált építőanyagok mennyisége, radioaktivitása és az épület szerkezeti kialakítása határozza meg. Egy adott helyiség adott pontjában mérhető dózisteljesítmény függ tehát a belső terek méreteitől, a padló, a mennyezet és a falak anyagától, azok radioaktivitásától, szerkezeti kialakítástól, illetve a mérés során a műszernek a határoló felületektől való távolságától.

Az épület szerkezeti anyagok nem csak forrásai a beltéri sugárzásnak, de árnyékoló (elnyelő) képességük is van a vastagságuk és sűrűségük függvényében. Minél vastagabb és nehezebb egy anyag, annál nagyobb az árnyékoló képessége a gamma-sugárzással szemben. A külső térből jövő gamma-sugárzást az épületek fala és födémje a legtöbbször jelentős mértékben leárnyékolja, ezért a beltérben már nem, vagy csak alig mérhető járulékot ad. A kozmikus sugárzást az épületrészek csak kis mértékben nyelik el. Az árnyékoló-képességüket az egyes irodalmi források eltérően becsülik, de abban megegyeznek, hogy a kozmikus sugárzás beltéri értéke általában nagyságrendileg összevethető a szabadban mérhetővel. A későbbi kalkulációk során ezért 32 nSv/h-val vettük figyelembe. [UNSCEAR 2000], [IAEA SSG-32], [RP 112]

Az intézetünk által végzett vizsgálatok alapján, összhangban az irodalmi adatokkal, az építőanyagok radioaktivitása típusonként jelentősen változó, de egy-egy anyagfajtán belül jellegzetes értékeket mutat. Radioaktivitásuk közvetlenül értékelhető a megfelelően előkészített minták laboratóriumi gamma-spektrometriai méréséből kapott aktivitáskoncentrációk alapján. [RP 112]

Az 1. és 2. táblázat mutatja néhány építőanyag típus átlagos aktivitáskoncentrációját az irodalmi adatok és az intézetünk által végzett mérések alapján, valamint az átlagos értékekből a (2) és (3) képlet alapján számított dózisteljesítmény hozzájárulást $H^*(10)$ egységben.

1. táblázat. Építőanyagok átlagos aktivitáskoncentrációi nemzetközi mérések alapján [RP 112]

Építőanyag	Aktivitáskoncentráció (Bq/kg)			Építőanyag index	Dózistelj. hozzájárulás (nSv/h)
	^{226}Ra	^{232}Th -sor	^{40}K		
cement	40	30	400	0,42	57
gápszilikát	60	40	430	0,54	75
agyagtégla	50	50	670	0,64	86
homoktégla	10	10	330	0,19	26
terméskő	60	60	640	0,71	96
természetes gipsz	10	10	80	0,11	15

2. táblázat. Építőanyagok átlagos aktivitáskoncentrációi az intézetünk mérései alapján

Építőanyag	Aktivitáskoncentráció (Bq/kg)			Minta szám	Építőanyag index	Dózistelj. hozzájárulás (nSv/h)
	²²⁶ Ra	²³² Th-sor	⁴⁰ K			
pernye	127	62	422	56	0,87	128
kohósalak	108	52	282	16	0,72	105
cement	36	20	155	63	0,27	39
homok	14	16	361	11	0,25	33
agyagtégla	44	43	707	56	0,60	80
gápszilikát	25	33	176	1	0,31	40
Ytong	15	9	186	2	0,16	22
fa	1,8	1,9	41	22	0,03	4

Megjegyzés: Az 1. és 2. táblázatban közölt építőanyag index értékeket a (1) képlet alapján számoltuk.

Véleményünk szerint, gyakorlati szempontból az építőanyagok radioaktivitásának jellemzésére a belőlük készült szerkezeti elemek felszínén mérhető dózisteljesítmény értékek is használhatók megkötések mellett. Az értékek felhasználásakor figyelembe kell venni, hogy az adott padló, fal, mennyezet felületén mért dózisteljesítmény függ a vizsgált helyiségben lévő többi szerkezeti elem (felület) radioaktivitásától és azoknak a mérési ponttól való távolságától is. Ha egy helyiségben nem mérhető az átlagos beltéri szintet számottevő mértékben meghaladó dózisteljesítmény, az egyes felületeken mért értékek alkalmasak lehetnek az építőanyag radioaktivitásának értékelésére. Az átlagos szintet jelentősen meghaladó radioaktivitású építőanyagokat tartalmazó épületrészek sugárzása jelentősen megnövelheti (torzíthatja) a többi felületen (távolabbi pontokban) mért értéket. Ilyen esetekben a kapott értékek nem fognak megfelelni az építőanyag típusa alapján várt értéknek.

Tapasztalatunk szerint, összhangban a laboratóriumi mérések eredményével, a legkisebb radioaktivitása a fának van (lásd 2. táblázat). Minden más építőanyagé jóval nagyobb, ezért a fából készült szerkezeti és burkoló elemeknek nincs érdemi hozzájárulása a mért beltéri dózisteljesítmény értékéhez. A faburkolatok felszínén mért dózisteljesítmény értéket elsődlegesen a környezetük és nem a saját radioaktivitásuk határozza meg.

Az építőanyagok között a fa után a gipszkartonnak, Ytongnak, mészkőnek (terméskőnek), homoktéglának és betonnak a legkisebb a radioaktivitása. A belőlük készült falak felszínén a hazai átlagos külső háttérsugárzásnak megfelelő vagy annál kisebb dózisteljesítmény értéket mértünk. A mért értékek mediánja 97 nSv/h volt (számtani átlag: 96 nSv/h, 10–90% percentilis: 80–110 nSv/h). Ily módon ezen építőanyagok típusoknak a legkisebb a hozzájárulása a beltéri gamma-sugárzáshoz.

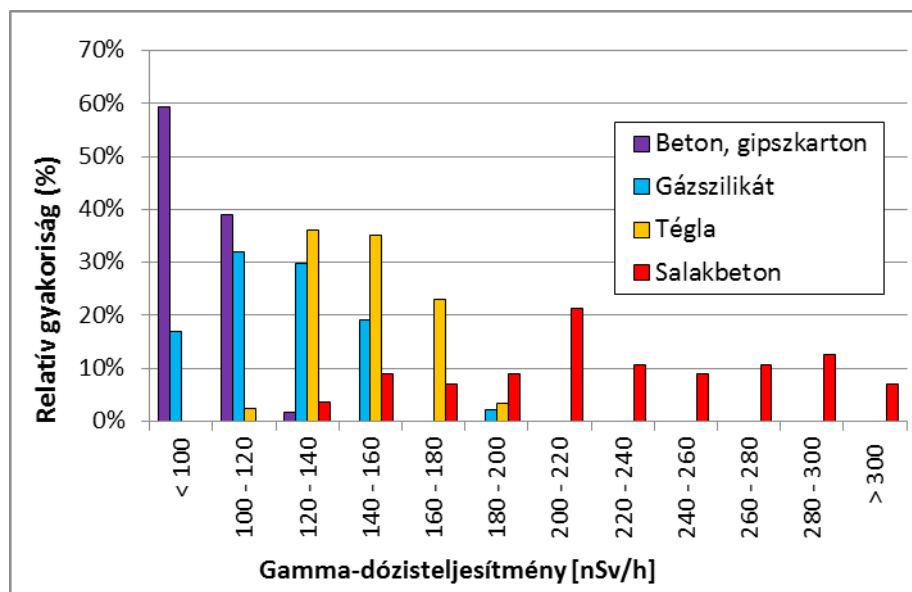
Az előbbieknél valamivel nagyobb, de szintén alacsony dózisteljesítményt mértünk a gápszilikát blokkokból készült falak felszínén. Az értékek mediánja 121 nSv/h volt (számtani átlag: 120 nSv/h, 10 - 90 % percentilis: 94 – 156 nSv/h).

A normál építőanyagok közül az égetett agyagtéglák felszínén mértük a legnagyobb értéket. A medián 146 nSv/h volt (számtani átlag: 148 nSv/h, 10–90% percentilis: 127–171 nSv/h). A mért legmagasabb érték 200 nSv/h volt.

Ennél nagyobb értékeket csak a vulkáni eredetű tufák és az erősen radioaktív salakot tartalmazó beton (ún. salakbeton) elemek felszínénél mértünk. A vizsgált salakbetonon mért

értékek mediánja 221 nSv/h volt (számtani átlag: 227 nSv/h, 10–90 % percentilis: 163–291 nSv/h). A mért legmagasabb egyedi érték 570 nSv/h volt.

Az egyes építőanyag fajták felszínénél általunk mért gamma-dózisteljesítmény értékek relatív gyakoriságát az 1. ábra mutatja.



1. ábra. Egyes építőanyagfajták felszínén mért gamma-dózisteljesítmény értékek százalékos gyakorisági eloszlása.

Az intézetünk által 2002 és 2020 között 436 épületben, illetve lakásban 1 m magasságban aktív műszerrel végzett több mint 4600 dózisteljesítmény mérés mediánja 145 nSv/h volt (számtani átlag: 158 nSv/h, 10–90% percentilis: 109–216 nSv/h). A méréseket legnagyobb részt a szcintillációs elven működő Automess típusú műszerrel végeztük.

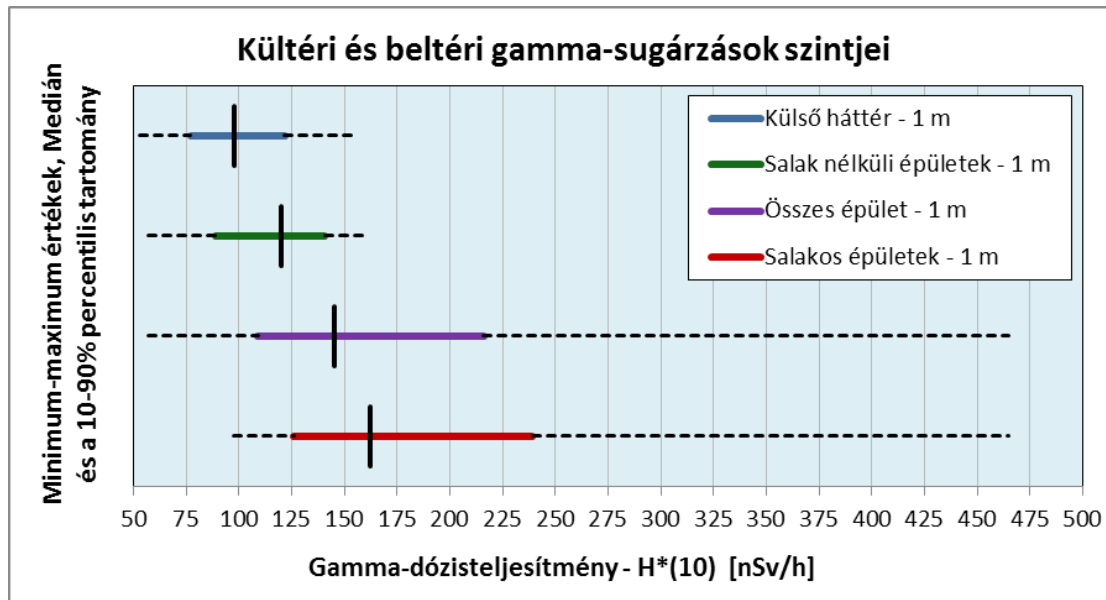
Eredményeink elemzésekor azt láttuk, hogy a salakfeltöltést, vagy salakbeton elemeket tartalmazó épületekben gyakran az átlagnál nagyobb, azt akár jelentősen meghaladó dózisteljesítmény értékeket mértünk. A többletsugárzás mértékét a salak beépítési módja, a mennyisége és a radioaktivitása határozta meg. A salakbeépítéses épületekben a legnagyobb dózisteljesítmény értékeket rendszerint a salakot tartalmazó részek környezetében, általában a szabadon lévő (takarás nélküli) salakfeltöltés felszínén mértük.

A salakbeépítések miatti többlet gamma-sugárzás értékének becsléséhez a salak nélküli helyiségekben mért értékek statisztikájának adatait célszerű alapul venni. A kettő különbsége adja a többletet. Eredményeink elemzése alapján a salakot nem tartalmazó épületekben az 1 m magasságban mért dózisteljesítmény értékek mediánja 120 nSv/h volt (számtani átlag: 118 nSv/h, 10–90% percentilis: 89–141 nSv/h). A padlószinten és a mennyezetnél mért értékek is kb. ugyanakkorák voltak, mint középen, 1 m magasságban. A mediánjaik 120 és 123 nSv/h voltak. Látható, hogy az itt mért értékek csak alig voltak nagyobbak, mint az átlagos külső háttérszint. Az is elmondható, hogy a salak nélküli épületekben a legnagyobb értéket rendszerint a szobák falán (téglafalon) vagy a fürdőszoba padlóján, ill. falán, esetleg a konyhában (csempén, kerámia burkolaton) mértük. Ugyanakkor az értékek sosem haladták meg a 200 nSv/h-t.

Eredményeink elemzése alapján a salakbeépítéses helyiségekben 1 m magasságban a dózisteljesítmény értékek mediánja 168 nSv/h volt (számtani átlag: 183 nSv/h, 10–90% percentilis: 133–253 nSv/h). Látható, hogy a salakos beépítések miatt, az érintett

helyiségekben az átlagos dózisteljesítmény, 1 m-en kb. 1,5-szer (65 nSv/h-val) nagyobb volt, mint a salak nélküliekben. A 90% percentilisnek megfelelő érték, kb. 1,8-szor (112 nSv/h-val) volt nagyobb. Ugyanakkor megállapítható az is, hogy a salakbeépítések miatt a legtöbbször csak mérsékelten nagyobb dózisteljesítményt mértünk, amelyek nem haladták meg a hazai háttérsugárzás 2,5-szeresét (250 nSv/h-t).

A salakbeépítéses és salak nélküli épületekben, valamint a szabad térben mért dózisteljesítmény értékeink statisztikáját az 2. ábra foglalja össze. Az ábrán a vízszintes szaggatott vonal a minimum és maximum értéket, a vízszintes kivastagított színes vonal a 10 és 90% percentilisnek megfelelő tartományt, a függőleges fekete vonal a medián értéket mutatja.



2. ábra Szabad térben és épületekben mért dózisteljesítmény értékek tartományai

1.1. Az építőanyagok radioaktivitása és a beltéri gamma-dózisteljesítmény kapcsolata

A 2/2022. (IV. 29.) Korm. rendelet 51. §-a alapján a kereskedelmi forgalomba kerülő „építőanyagok által kibocsátott beltéri külső gamma-sugárzás vonatkoztatási szintje a kültéri külső sugárterhelésen felül 1 mSv/év” [2/2022.]. Ez a hazai szabályozás a 2013/59/EURATOM direktíva ide vonatkozó részének majdnem szó szerinti átvétele [2013/59/EURATOM]. Az uniós rendelkezés elméleti hátterét az Európai Közösség Radiation protection 112-es kiadványa (RP 112) adja. Az RP 112-ben leírt koncepció szerint az épületben tartózkodáskor az építőanyagok gamma-sugárzásából származó külső sugárterhelésünket a szabadban való tartózkodás külső dózisához kell hasonlítani és a kettő különbsége adja meg a többlet dózisunkat. Ez utóbbi korlátozható a forgalomba kerülő építőanyagokban megengedett radioaktivitás szabályozásával és így az építőanyagból felszabadulni képes radon mennyisége is korlátos lesz, elősegítve az erre vonatkozó külön rendelkezések teljesülését [RP 112].

A feltétel teljesülésének ellenőrzésére az (1) képlet szerint számított építőanyag index (I) meghatározása szolgál. Ha $I < 1$ akkor további számítások nélkül is az feltételezhető, hogy a vizsgált anyag felhasználásával készült épületben a gamma-sugárzásból származó éves többlet sugárterhelés kisebb, mint 1 mSv 7000 óra expozíciós időt feltételezve.

$$I = \frac{C_{Ra-226}}{300} + \frac{C_{Th-232}}{200} + \frac{C_{K-40}}{3000} \quad (1)$$

ahol

- C_{Ra-226} ^{226}Ra radionuklid aktivitáskonzentrációja (Bq/kg),
 C_{Th-232} ^{232}Th bomlási sor elemeinek átlagos aktivitáskonzentrációja (Bg/kg),
 C_{K-40} ^{40}K radionuklid aktivitáskonzentrációja az építőanyagban (Bq/kg).

Az RP 112 koncepciója egy az alábbi paraméterek rendelkező referenciahelyiségre vonatkozó modellszámításon alapul:

- szélesség \times hosszúság \times magasság: 4 m \times 5 m \times 2,8 m
- falak és födémek vastagsága 20 cm, anyaga beton, sűrűsége 2350 kg/m³
- tartózkodási idő 7000 óra/év
- az effektív dózis és levegő Kerma közötti átváltási faktor: 0,7 Sv/Gy
- háttér gamma-sugárzás: 50 nGy/h (kivonandó a beltéri gamma-sugárzásból)
- dózisterhelés szempontjából a referenciapont a szoba középpontja. [RP 112]

Az RP 112 koncepciója szerint az építőanyagok elfogadható aktivitáskonzentrációjának felső szintje a ^{226}Ra -ra és ^{232}Th -re 100 Bq/kg, a ^{40}K -re 1000 Bq/kg. Ezen értékekhez a nevezőkbe olyan számértéket választottak, hogy az így képzett hányadosok által kifejezett dóziszárulékok külön-külön kb. 1/3-ot, együttesen kb. 1-et tegyenek ki [RP 112]. Számításaink szerint az $I = 1$ feltétel pontosabban akkor teljesül, ha például a C_{Ra-226} és C_{Th-232} értéke 90 Bq/kg és a C_{K-40} értéke 750 Bq/kg.

Az RP 112-ben megadták az egyes épületrészek (padló, plafon, falak) építőanyagainak aktivitás-konzentrációja és az abból modellszámítással nyert dózisteljesítmény-járulékok közötti konverziós tényezőket (nGy/h)/(Bq/kg) egységben. Ezeket mutatja be a 3. táblázat [RP 112].

3. táblázat Épületrészekhez tartozó dózisteljesítmény-konverziós tényezők

Épületszerkezeti elem	Dózisteljesítmény-konverziós tényező (nGy/h)/(Bq/kg)		
	f_{Ra-226}	f_{Th-232}	f_{K-40}
Padló + plafon + falak	0,92	1,1	0,080
Padló önmagában	0,24	0,28	0,020
Plafon önmagában	0,25	0,32	0,023
Falak önmagukban	0,43	0,50	0,037

A 3. táblázatban lévő dóziskonverziós tényezőket felhasználva kapjuk a (2) képletet, amivel kiszámítható az ismert aktivitáskonzentrációjú építőanyagból készült épületrészek dózisteljesítmény-járuléka a referenciahelyiség középpontjában mérve.

$$D_a = f_{Ra-226} \cdot C_{Ra-226} + f_{Th-232} \cdot C_{Th-232} + f_{K-40} \cdot C_{K-40} \quad (2)$$

Az UNSCEAR 1988 Report-ban meghatározott és azóta is elfogadott dóziskonverziós tényező a levegőben elnyelt dózis és az effektív dózis (E) között 0,7 Sv/Gy.

$$E = D_a \cdot 0,7 \frac{\text{Sv}}{\text{Gy}} \quad (3)$$

A (2) és a (3) képlet alapján számítható az éves többlet effektív dózis értéke.

$$E = (D_a - D_{Bg}) \cdot \frac{1}{1.000.000} \cdot 7000 h \cdot 0,7 \frac{Sv}{Gy} \quad (4)$$

ahol

D_a a teljes mért levegőben elnyelt dózisteljesítmény a középpontra megadva (nGy/h),

D_{Bg} háttér gamma-sugárzás levegőben elnyelt dózisteljesítményben (nGy/h),

E effektív dózis (mSv/év).

Ellenőrzésként kiszámítottuk, hogy a (2) képletbe behelyettesítve az $I=1$ feltételnek megfelelő általunk választott $C_{Ra-226} = C_{Th-232} = 90 Bq/kg$ és $C_{K-40} = 750 Bq/kg$ értékeket a D_a értékére 242 nGy/h-t kaptunk, amiből a (3) képlet alapján 0,94 mSv/év többletdózis számítható.

A gamma-sugárzás biológiai kockázata energiafüggő. Egy tipikus szabad környezetben felvett spektrumban a gamma-fotonok fluxusának ~70%-át az 500 keV alatti energiájú fotonok adják, azonban a tényleges teljes elszennvedett dózis ~70%-áért az 500 keV-nél nagyobb energiájú fotonok felelősek. A levegő Kermában megadott fotonenergia szerint összegzett kumulatív dózis feléhez tartozó fotonenergia ~ 900 keV, míg a környezeti dózisegyenértékben ($H^*(10)$) kifejezett kumulatív dózis feléhez ~ 750 keV tartozik. A 700 keV energiához a ^{137}Cs radionuklid fotonenergiája áll közel (661,6 keV). Ezt használják leggyakrabban a dózisteljesítményt mérő műszerek kalibrációjára. [RP 106]

Az irodalomban a környezeti dózisegyenérték ($H^*(10)$) és a levegőben elnyelt dózis (D_a) közötti átváltási tényező helyett a levegő kermára (K_a) vonatkozót adják meg. Ennek értéke a ISO 4037-3 szabvány szerint ^{137}Cs radionuklid energiáján 1,21. [ISO 4037-3]

$$H^*(10) = K_a \cdot 1,21 \frac{Sv}{Gy} \quad (5)$$

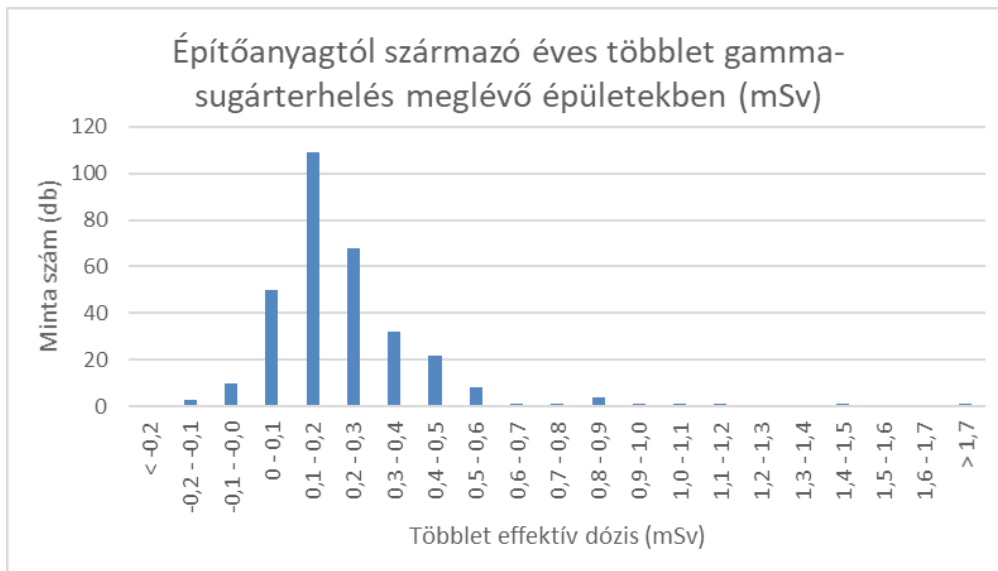
Bár a kermát és az elnyelt dózist ugyanazon mértékegységgel fejezik ki (Gy=J/kg), de a helyettesíthetőség feltételhez kötött. A különbség a dózis számításakor figyelembe vett energiaközlés módjában van. A MSZ 14341 szabvány 72.1. pontja szerint a D_a és K_a közötti energiafüggő átváltás a (6) képlet szerint számítható, ahol g_a értéke 600 keV fotonenergia esetén 0,00148 és 3 MeV energiánál is csak 0,00820. Vagyis a különbség elhanyagolható mértékű. [MSZ 14341]

$$D_a = K_a \cdot (1 - g_a) \quad (6)$$

A fentiekből (3, 5, 6 képlet) az következik, hogy a $H^*(10)$ egységben mért érték kb. 40%-os felülbecslést jelentenek az effektív dózishoz képest 600 keV fotonenergián.

$$E = D_a \cdot 0,7 \frac{Sv}{Gy} = K_a \cdot (1 - g_a) \cdot 0,7 \frac{Sv}{Gy} = \frac{H^*(10)}{1,21 \frac{Sv}{Gy}} \cdot (1 - g_a) \cdot 0,7 \frac{Sv}{Gy} = H^*(10) \cdot 0,58 \frac{Sv}{Sv} \quad (7)$$

A 3. ábra mutatja az általunk vizsgált épületeknél az átlagos beltéri dózisteljesítmény értékéből a (7) képlet alapján meghatározott éves többlet sugárterhelések gyakoriság eloszlását mSv-ben.



3. ábra. Építőanyagoktól származó többlet sugárterhelés meglévő épületekben

Az (5) és (7) képletek felhasználásával kiszámoltuk a korábban hivatkozott értékek környezeti dózisegyenértékben kifejezett dózisteljesítménnyé átváltott értékét. A referenciaépület középpontjára általunk számított 242 nGy/h levegőben elnyelt dózisteljesítmény az (5) képlet szerint átváltva környezeti dózisegyenértékké és a kozmikus sugárzás értékét hozzáadva 325 nSv/h-nak felel meg.

Ha az 1 mSv/év többlet dózis kritériumból indulunk ki, akkor a (4–6) képletek felhasználásával a többlet gamma-dózisteljesítményre környezeti dózisegyenértékben kifejezve 250 nSv/h-t kapunk.

Meglévő épületek esetében, amelyeket sugárvédelmi szempontból fennálló sugárzási helyzetként kell kezelni az 1 mSv-es referencia szint csak iránymutatásként használható, az adott helyzetben elfogadható gamma-sugárzási szintet minden esetben az épület állapotának, használati módjának, a beavatkozási lehetőségek figyelembevételével kell meghatározni.

Beltéri gamma-sugárzás felmérésének és értékelésének módszere:

A megfelelő műszer kiválasztásának nagy jelentősége van. Adott sugárzási térben a műszer által kijelzett érték függ a műszer működési elvétől, kialakításától, érzékenységétől, energiafüggésétől, stb. A leolvasott érték értelmezésekor mindig tekintetbe kell venni a műszer teljesítményjellemzőit és a vizsgált sugárzási tér jellegét.

Magyarországon a 127/1991. (X. 9.) Korm. rendeletet alapján a dózisteljesítmény mérő készülékek hitelesítésre kötelezettek. A mérésekhez olyan műszertípust ajánlott választani, amely legalább 100 nSv/h-tól rendelkezik hitelesítéssel, mivel az értékelés szempontjából releváns tartomány 100 nSv/h–1000 nSv/h.

A dózisteljesítményt mérő műszerek többsége a háttérsugárzási szintet jelentősen meghaladó dózisterek mérésére lett kifejlesztve, ezért fontos az alkalmazott műszer körültekintő megválasztása. Ausztrál metrológusok 116-féle típusú, összesen 1158 db műszert teszteltek referencia sugárzási térben. Az 1–5 μ Sv/h-s gamma-sugárzási térben a műszerek kb. 90%-ának kijelzése legfeljebb $\pm 10\%$ -os eltérést mutatott az elvárt értékhez képest. Ugyanakkor a laboratórium épületében mért háttér értékek szórása igen nagy volt. A 4. ábra alapján látható, hogy leggyakoribb és véleményünk szerint legrealisabb értéknek megfelelő

eredmény ($140 \pm 10\%$ nSv/h) az összes feljegyzett értéknek csak kb. negyedét, azaz 25%-át tette ki. [Aqeel, 2019]

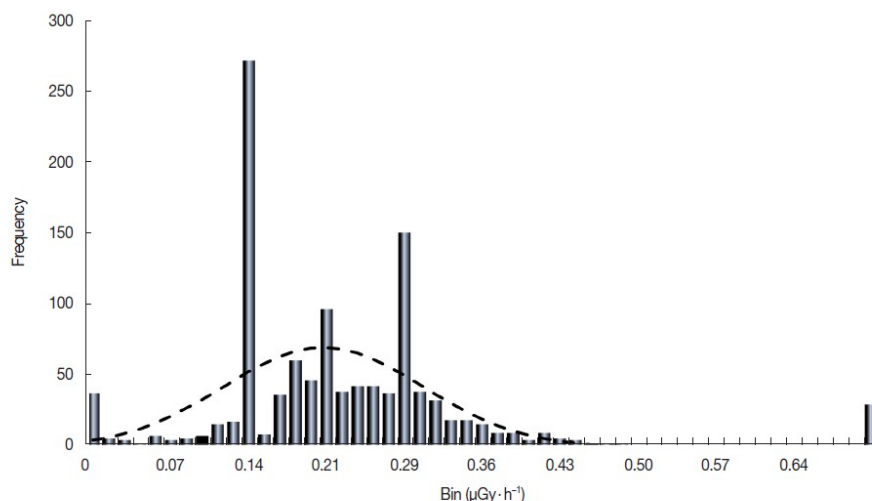


Fig. 3. Frequency distribution of ambient background radiation dose rate as registered by different measurement devices. The dashed line is a normal distribution fit to the data.

4. ábra Laborépületben mért háttér gamma-sugárzás értékek gyakoriság eloszlása

A beltéri gamma-sugárzás felmérését az alábbi információk összegyűjtéssel érdemes kezdeni, amelyek az eredmények értékelését segítik majd:

- az épület építési éve
- tagoltsága (felszín alatti és feletti szintek száma)
- az aljzat és a födémek anyaga, kialakítása
- a fő- és közfalak anyaga
- padló burkolati anyagok típusa (helyiségenként)
- salak jelenléte az épületben (a beépítés helye, módja)
- utólagos átépítések és bővítések helye, módja, ideje

Tapasztalatunk szerint, a beltéri dózistér nagyságának részletes helyszíni vizsgálatokor érdemes a falaktól távolabb, a helyiség nagyságától függően egy vagy több pontban dózisteljesítményt mérni. Egy adott vizsgálati pontban célszerű a mérést 3 különböző magasságban: padlószinten, 1 m magasságban és a mennyezet irányában elvégezni, továbbá néhány kiválasztott fő- és közfal felszínénél. A mérési pontok számát aszerint érdemes sűríteni, hogy az egymáshoz közel mért értékek mekkora szórást mutatnak. Az eredmények rögzítéséhez szükséges egy alaprajz a vizsgált helyszínről, amelyen a mérési pontok épületen belüli helyei jelölhetők. Az eredmények feljegyzésekor a mérési pont sorszámával mellett a magasságot is fel kell jegyezni. Az ily módon rögzített információk alapján a dózistér nagyságának térbeli eloszlásáról kapunk információt. Ellenőrzésül az épület mellett, a szabadban is ajánlott mérést végezni.

Az épületekben a gamma-sugárzás mértéke emberi léptékben az idővel nem változik, független az épület életkorától. Külső környezeti paraméter nem befolyásolja. Érdemi változást csak az eredményez, ha az épület szerkezetét érintő átalakítást, felújítást végeznek benne.

Tapasztalatunk szerint, a fent és a később bemutatott eredmények birtokában, az épület szerkezeti kialakításának, az alkalmazott építőanyagok típusának ismeretében megbecsülhető,

hogy kb. mekkora dózisteljesítmény értékek várhatók a padlón, a plafonnál és a falak felszínén, ha azokban nincs salak. Az 1 m magasságban mért értékek pedig a födémek és falak radioaktivitásától és a műszer ezektől való távolságától függ. A falak és a födémek néhány méteres távolságból véges kiterjedésű lapforrásnak tekinthetők, melyeknél a dózisteljesítmény távolság szerinti csökkenésével lehet számolni.

A dózisteljesítmény mérések végzése közben az alábbiakat célszerű megfigyelni:

- a mért dózisteljesítmény értékek abszolút nagysága,
- a mért értékek viszonya az építőanyagok és épület szerkezeti kialakítása alapján várt, a salak nélküli épületekre jellemző értékekhez képest,
- az egy helyiségen belül, azonos magasságban mért értékek szórása,
- az egy pontban, különböző magasságokban mért értékek által mutatott tendencia,
- a belső térben és a falak felszínén mért értékek viszonya,
- a hasonló adottságú szomszédos helyiségekben mért értékek viszonya,
- a burkolatoknak van-e hatása a padlón és falon mért értékekre.

A következőkben további szempontokat mutatunk be a mérési eredmények értékeléséhez. Ugyanazon épületkialakítás mellett a nagyobb radioaktivitású szerkezeti anyagok alkalmazása vagy az azonos radioaktivitású, de vastagabb anyagréteg alkalmazása (pl. vastagabb falak, feltöltés) nagyobb beltéri gamma-sugárzást eredményez. Az anyagvastagság növelése azonban csak adott vastagságig (falaknál modellszámítások alapján kb. 40 cm-ig) járul hozzá a beltéri dózisteljesítmény növekedéséhez. E felett, az önabszorpció eredményeként, a további vastagságnövelés nem okoz további növekményt [IAEA SSG-32]. Méréseink alapján a nagy radioaktivitású padlójú helyiségekben ($>> 500$ nSv/h) 1 m magasságban kb. 40%-kal, 2,5 m magasságban kb. 60 %-kal kisebb érték mérhető, mint padlószinten. Mérsékeltobb radioaktivitású padlók esetében (200–500 nSv/h) a csökkenés mértéke ennél kisebb, 1 m magasságban általában csak 10–30%.

Azt láttuk, hogy a falak felszínén és a padlón mért dózisteljesítményt megnövelheti a rajtuk lévő burkolat nagyobb radioaktivitása is. A mázas kerámia lapokkal (csempék, járólapok, stb.) burkolt felületeken sokszor kb. 20–30 nSv/h-val nagyobb érték mérhető a nem, vagy fával (pl. parkettával) burkolt felületű részekhez képest, ennek azonban a külső dózisterhelésünk szempontjából nincs jelentősége.

A salak nélküli épületekben végzett mérési eredmények értékelése alapján azt a következtetést vontuk le, hogy a padlónál, mennyezetnél vagy 1 m magasságban mért 170 nSv/h-nál nagyobb érték, illetve a falak felszínén mért 200 nSv/h-nál nagyobb érték (kivéve tufa fal) salak, illetve salakbeton jelenlétére utal. Az itt megadottnál kisebb értékek sem zárják ki a salak jelenlétét a födémekben vagy a falban, csak ebben az esetben a salak jelenléte miatti többlet gamma-sugárzás elhanyagolható.

Mérési eredményeinkből azt láttuk, hogy a közvetlenül a salakfeltöltésbe ágyazott párnafára vagy vakpadlóra tett parketta csak kis mértékben árnyékolja (csökkenti) a padlószinten mért dózisteljesítményt. Ha azonban a salakfeltöltést betonréteg takarta, akár jelentősen is csökkent a felette mért dózisteljesítmény a betonréteg vastagságától függően. A salakok radioaktivitása a tapasztalataink alapján nagyon változó, sokszor egy helyiségen belül is jelentősen különböző értékeket mértünk ugyanazon felületen.

Fontos megjegyezni, ha egy lakásban van salakbeépítés, nem szükséges, hogy mindegyik helyiségben legyen. Azt láttuk, hogy építési korszaktól függően a ház építéskor sem tettek minden födémrészbe salakot. A régebbi épületeknél gyakori, hogy időközben

felújították, bővítették és eközben egyes helyiségekből eltávolították a salakot vagy betont terítették rá vagy éppen salakbeton válaszfalat építettek be.

Az alábbiakban néhány példát mutatunk be a beltéri dózistér eloszlására.

Egy betonfödémű, téglafalú, salak nélküli épületben például általában a falak felszínén mértük a legnagyobb és padlószinten legkisebb értéket, 1 m magasságban pedig a padlószintnél nagyobb, de a falnál alacsonyabb értéket. Ha a mennyezet felett volt salakfeltöltés, akkor ez előbbi profil úgy módosult, hogy a padlótól a mennyezet irányába folytonosan növekvő értéket kaptunk. Ha a padló alatt volt a salakfeltöltés, akkor a padlószinttől távolodva folytonosan csökkenő értékeket kaptunk. Ha padló alatt és a mennyezet felett egyaránt volt salakfeltöltés, akkor a feltöltések radioaktivitásának relatív viszonya, a felső födém árnyékoló képessége és a beltéri magasság határozta meg a profilt. Ilyenkor lefelé vagy fölfelé növekvő vagy közel állandó, vagy a középmagasság felé csökkenő értékeket kaptunk. Jellemzően a beton födémű és falú, salak nélküli (pl. panel technológiás) épületekben mértük a legkisebb értékeket. Az ilyen lakások fürdőszobájában és konyhájában a mázas kerámiával burkolt padlón rendszerint valamivel nagyobb értékek mértünk, mint a parkettás padlójú szobákban.

Salakos beépítésből származó többlet gamma-sugárzás

Tapasztalatunk szerint egyedül a salakos beépítések eredményeznek egy épületben emelkedett beltéri gamma-sugárzást, így kiemelten foglalkozunk ezen esetekkel. Az 5. ábra a salakbeépítések jellemző helyeit, módjait foglalja össze.



5. ábra Salakbeépítések jellemző helye az épületekben

Külön-külön meghatároztuk, hogy a salakbeépítés helyének és módjának függvényében hol mekkora dózisteljesítmény értékeket mértünk. Eredményeinket az alábbiakban foglaltuk össze. További adatokat a 6. ábrán és a 4. táblázat tartalmaz, amely az épületekben és az építőanyagok felületén mért dózisteljesítmény értékeket mutatja be.

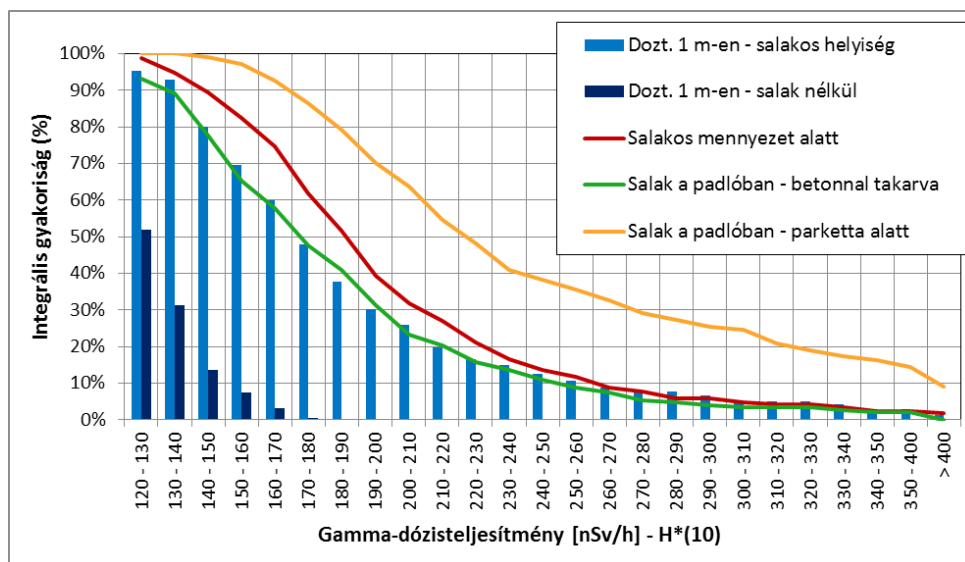
Ahol a parketta közvetlenül a salakra lett téve,

- az esetek 30%-ában a padlószinten mért érték átlaga 200 nSv/h alatt volt,
- az esetek közel felében (47%) az átlagos szint 200 és 300 nSv/h között volt,
- és kb. minden negyedik esetben (23 %) 300 nSv/h feletti értéket mértünk.

Ahol a padló alatti salak sugárzását beton árnyékolta, ott jóval kedvezőbb értékeket kaptunk. Csak minden negyedik esetben (25%) volt az átlagérték 200 nSv/h felett és csak 3% volt az, ahol meghaladta a 300 nSv/h-t. A padlón mért értékek gyakoriság eloszlása az 1 m magasan mért eredményekét követi.

A salakot tartalmazó födémek alatt, a plafonnál mért dózisteljesítmény értékek hasonló gyakoriság eloszlást mutattak, mint a betonnal takart salakos padló esetében.

A fedetlen salakon közvetlenül mért értékek csak alig, kb. 5%-kal voltak nagyobbak, mint a parkettán mért értékek. A különbség kis mértékének oka a parketta és az alatta lévő párnafa vagy vakpadló által kiadott csekély távolságból és a fa kis sűrűsége miatti csekély árnyékoló képességéből adódhat.



6. ábra A salakos és salak nélküli helyiségekben mért dózisteljesítmény értékek integrális gyakoriság eloszlása

Beavatkozási lehetőségek a beltéri gamma-sugárzások csökkentésére

Ha a lakótérben mért dózisteljesítmény értékek zöme nem érte el a 250 nSv/h-t, sosem javasoltunk beavatkozást, mivel az elérhető dózisteljesítmény csökkenés kisebb, mint 100 nSv/h és az éves többlet sugárterhelés mértéke legfeljebb 0,6 mSv.

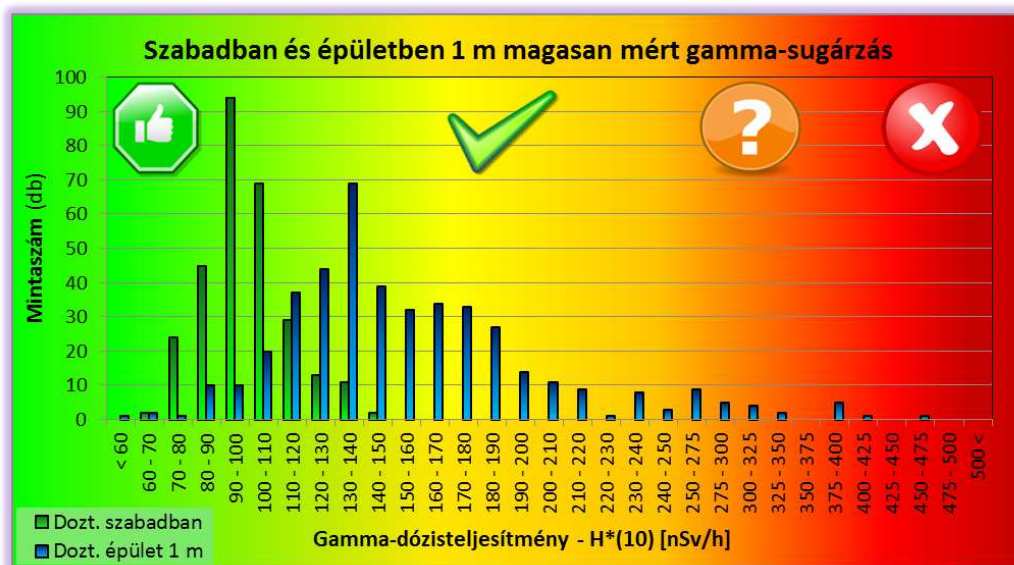
A padlószinten, mennyezet közelében mért 350 – 400 nSv/h közepes radioaktivitású salak jelenlétére utal. A födémekben lévő salak eltávolításával a salak jelenlétének tulajdonítható többlet sugárzás természetesen megszűnik, visszamaradó sugárzással nem kell számolni. A salakfeltöltés cseréje azonban gyakran igen költséges. A nem túl nagy radioaktivitású salakok esetében elegendő lehet a gamma-sugárzás csökkentésére a salak részleges eltávolítása és,

vagy betonnal való fedése. Az ilyen jellegű beavatkozásokat csak építész szakvéleménye alapján lehet elvégezni.

Ha az emelkedett beltéri sugárzás forrása a salakbetonból készült tartófalak, két elvi lehetőség merül fel. A falak takarása belülről megfelelő vastagságú árnyékoló réteggel, ez csökkenti a belső, hasznos alapterület. A másik lehetőség, a kiváltásuk. Ez a főfalak esetében meglehetősen bonyolult, speciális építészeti eljárást igényel. Mindkét lehetőség jelentős költségvonzattal jár. Ha csak a közfalak vannak salakbetonból, szükség szerint eltávolíthatók, de tapasztalatunk szerint ilyen esetekben a beltéri gamma-sugárzás csak mérsékelt emelkedést mutat a falaktól távolabb mérve.

A mért eredmények értelmezésekor az összes értéket és azok térbeli eloszlását érdemes figyelembe venni. Például, ha 1 m magasságban 350 nSv/h-t mértünk, akkor padlósínterületen általában kb. 500 nSv/h dózisteljesítmény volt mérhető.

Beavatkozás melletti döntés előtt mindig mérlegelni kell a kivitelezés költségét, időigényét, megvalósíthatóságát, kihatását az épülethasználatra és az általa nyert hasznot. A 7. ábrán a szabadban és az épületekben, 1 m magasságban mért átlagos dózisteljesítmény értékeink gyakoriságeloszlását mutatjuk be jelezve azt is, hogy mely értékek tekinthetők véleményünk szerint elfogadhatónak.



7. ábra Szabadtéri és átlagos beltéri gamma-sugárzás értékek eloszlásgyakorisága
4. táblázat A környezetünkben mért dózisteljesítmény értékek statisztikája

Dózisteljesítmény (nSv/h)	Szabadban és az épületekben mért dózisteljesítmény értékek statisztikája
--- 50 ---	Szabadban: ~ 50 nSv/h kb. a hazai háttér gamma-sugárzás alsó határa Épületben: ~ 50 nSv/h kb. a beltéri gamma-sugárzás alsó határa
--- 100 ---	Szabadban: <u>medián: 98 nSv/h</u> , (számtani átlag: 99 nSv/h, 10–90% percentilis: 77–122 nSv/h) Beton, gipszkarton, Ytong: <u>medián: 97 nSv/h</u> (számtani átlag: 96 nSv/h, 10–90% percentilis: 80–110 nSv/h)
120	Nem salakos épületben: <u>medián 120 nSv/h</u> (számtani átlag: 118 nSv/h, 10–90% percentilis: 89–141 nSv/h)

Dózisteljesítmény y (nSv/h)	Szabadban és az épületekben mért dózisteljesítmény értékek statisztikája
--- 150 ---	<p>Gázzsilikát: <u>medián: 121 nSv/h</u> (számtani átlag: 120 nSv/h, 10–90% percentilis: 94–156 nSv/h)</p> <p>Nem salakos épületben mért átlagos maximum: 147 nSv/h Szabadban: háttérsugárzás hazánkban jellemzően kisebb, mint 150 nSv/h</p> <p>Tégla (égetett agyag): <u>medián: 146 nSv/h</u> (számtani átlag: 148 nSv/h, 10–90% percentilis: 127–171 nSv/h)</p> <p>Dózisteljesítmény átlagos épületben: <u>medián 150 nSv/h</u> (számtani átlag: 157 nSv/h, 10–90% percentilis: 111–204 nSv/h)</p> <p>Salakos helyiségekben mért dózisteljesítmény</p> <p><u>Salakos helyiségben, 1 m magasságban:</u> <u>medián 168 nSv/h</u> (számtani átlag: 183 nSv/h, 10–90% percentilis: 133–253 nSv/h)</p> <p><u>Betonozott salakos padlón:</u> <u>medián 166 nSv/h</u> (számtani átlag: 178 nSv/h, 10–90% percentilis: 125–244 nSv/h)</p> <p><u>Salakos mennyezet alatt:</u> <u>medián 182 nSv/h</u> (számtani átlag: 192 nSv/h, 10–90% percentilis: 139–252 nSv/h)</p> <p>Nem salakos helyiségben 1 m magasságban mért átlag, mindig <180 nSv/h!</p>
--- 200 --- 220	<p>Salakos helyiségekben mért dózisteljesítmény</p> <p><u>Salakos helyiségben 1 m magasságban >200 nSv/h:</u> 26%</p> <p><u>Parkettán mérve alatta salakkal:</u> <u>medián 217 nSv/h</u> (számtani átlag: 260 nSv/h, 10–90% percentilis: 163–378 nSv/h)</p> <p>Vulkáni tufa fal</p> <p>Salakbeton fal: <u>medián 221 nSv/h</u> (számtani átlag: 227 nSv/h, 80%: 163–291 nSv/h)</p> <p><u>Salakon közvetlenül mért átlagos dozt.:</u> <u>medián 235 nSv/h</u> (számtani átlag: 271 nSv/h, 10–90% percentilis: 157–398 nSv/h)</p> <p><u>Salakon közvetlenül mért maximális dozt.:</u> <u>medián 274 nSv/h</u> (számtani átlag: 340 nSv/h, 10–90% percentilis: 175–524 nSv/h)</p>
--- 250 ---	

KONKLÚZIÓK

Cikkünkben bemutattuk az épületekben általában mérhető gamma-sugárzások szintjét és forrását. Javaslatot tettünk arra, hogy adott beltéri gamma-sugárzási szinteknél, csak mely feltételek mellett ajánlott beavatkozást végezni.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS:

Az összeállított anyag háttéréül szolgáló mérésekben a szerzőkön kívül részt vett még Déri Zsolt, Kocsy Gábor, Kövendiné Kónyi Júlia, Lengyel József, Nagy Dániel, Nagy János, Nagyné Bereczki Laura, Rell Péter, Szabó Péter.

Az itt bemutatott értékelések elkészültében nagy segítséget jelentett Kocsy Gábor, Szabó Gyula, Fülöp Nándor korábbi osztályvezetők, és Dr. Osváth Szabolcs jelenlegi osztályvezető és Dr. Sáfrány Géza főosztályvezető főorvos Úr támogató hozzáállása.

Továbbá külön köszönöm Csige István és Déri Zsolt lektori munkáját, amivel a cikk színvonalát emelték, javították.

IRODALOM

- Aqeel, 2019 Aqeel A. A., Matthew B. W., A Review of Dose Rate Meters as First Responders to Ionising Radiation, J. of Radiation Protection and Research 44(3), pp 97–102, 2019
- IAEA, SSG-32 IAEA Safety Standards, Protection of the Public against Exposure Indoors due to Radon and Other Natural Sources of Radiation, No. SSG-32, IAEA, Vienna, 2015
- ISO 4037-3 ISO 4037-3, X and gamma reference radiation for calibrating dose meters and dose rate meters and for determining their response as a function of photon energy
- MSZ 14341 MSZ 14341:2017 Külső röntgen- és gamma-sugárzások dozimetriája
- RP 106 European Commission Radiation Protection 106, Technical recommendations on measurements of external environmental gamma radiation doses, EURADOS Report 1999
- RP 112 European Commission Radiation Protection 112, Radiological Protection Principles concerning the Natural Radioactivity of Building Materials, 1999
- Sas Phd Sas Zoltán, Doktori értekezés, Építőanyagok radon emanációját és exhalációját befolyásoló paraméterek vizsgálata, Pannon Egyetem, Radiokémiai és Radioökológiai Intézet, 2012
- UNSCEAR 2000 Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation to the General Assembly, Annex B
- 2013/59/EURATOM A Tanács 2013/59/EURATOM irányelve (2013. december 5.) az ionizáló sugárzás miatti sugárterhelésből származó veszélyekkel szembeni védelmet szolgáló alapvető biztonsági előírások megállapításáról, valamint a 89/618/Euratom, a 90/641/Euratom, a 96/29/Euratom, a 97/43/Euratom és a 2003/122/Euratom irányelv hatályon kívül helyezéséről
- 2/2022. 2/2022. (IV. 29.) OAH rend. Az ionizáló sugárzás elleni védelemről és a kapcsolódó engedélyezési, jelentési és ellenőrzési rendszerről

„Készült a SOMOS Alapítvány támogatásával”

PILLE MÉRÉSEK A NEMZETKÖZI ŰRÁLLOMÁSON 2003 ÉS 2021 KÖZÖTT

Deme Sándor*, Apáthy István, Hirn Attila, Pázmándi Tamás és Pinczés Patrik
Energiatudományi Kutatóközpont, Budapest, Konkoly Thege M. út 29–33.
*deme@aeki.kfki.hu

A kézirat beérkezett: 2023.04.03.

Közlésre elfogadva: 2023.05.01.

The International Space Station is considered as a special radiation workplace where astronauts work in an intense radiation field. It is a special workplace because the dose limits on Earth cannot be applied and, therefore, specific regulations are required. We describe the radiation field at the orbit of the space station and inside the space station, we discuss the career dose limits for astronauts, and we present the Pille dosimetry system used on board the space station. In the second part of the article, we review nearly 20 years of measurements, give the average dose rates calculated from the 1.5-hour cycle automatic measurements, broken down in half-years, and compare them with the expected effects of solar cycles. Extra doses from extravehicular activities and dose rates at the South Atlantic Anomaly are also discussed.

Keywords – International Space Station, radiation field, Pille dosimeter system

A Nemzetközi Űrállomás egy különleges sugárveszélyes munkahelynek tekinthető, ahol az űrhajósok intenzív sugárzási térben dolgoznak. Azért különleges a munkahely, mert a földi dóziskorlátok nem alkalmazhatóak, egyedi szabályozásra van szükség. Közleményünkben ismertetjük az űrállomás pályájánál és az űrállomás belsejében kialakult sugárzási teret, foglalkozunk az űrhajósok életpálya-dózis korlátaival, bemutatjuk az űrállomás fedélzetén alkalmazott Pille dózismérő rendszert. A cikk második felében áttekintjük a közel 20 év mérési eredményeit, félévenkénti bontásban megadjuk a 1,5 órás ciklusú automata mérési eredményekből számított átlagos dózisteljesítményeket, összehasonlítjuk a napciklusok várható hatásával. Tárgyaljuk az űrsétáknál mért extra dózisokat és a Dél-atlanti Anomáliánál mért dózisteljesítményeket.

Kulcsszavak: Nemzetközi Űrállomás, sugárzási tér, Pille dózismérő rendszer

BEVEZETÉS

Közel két évtizede folyik dózismérés a Pille műszerrel a Nemzetközi Űrállomás (a továbbiakban az angol ISS rövidítést használjuk) fedélzetén. Cikkünkben ezeket a méréseket tekintjük át. A méréseket lényegében csak monitorozásnak tekinthetjük, személyi dózisokat ezek alapján csak nagyon korlátozottan adhatunk meg. Charles Simonyi mérései szerint a személyi dózismérőként használt dózismérő által mért dózisteljesítmény jelzését egységnyinek vesszük, akkor ehhez képest a munkatérben a dózisteljesítmény 25%-kal volt kisebb, míg a hálójelzőn 50%-kal nagyobb.

Egy további mérés szerint a Pille készülék belsejében mérhető dózisteljesítmény 90%-a a környezetében lévő dózisteljesítménynek. Ebből durva közelítéssel az mondható, hogy a Pille készülékkel mért dózisteljesítmény a személyi doziméter várható jelzésének mintegy 70%-a.

A következő kérdés, hogy milyen a Pille személyi dózismérő jelzése és a feltételezhető személyi dózis közötti összefüggés. A Pille dózismérők kalibrálása a hengeres dózismérő hossz tengelyére merőlegesen beeső ^{137}Cs nyalábbal történik. Ugyanennek a dózismérőnek a jelzése izotróp sugárzási térben – a dózismérő szögfüggése miatt – csak az érték mintegy 90%-a lenne, ez 10%-os felülmérést jelent az általában fellépő közel izotróp térhez

viszonyítva. Az ISS sugárzási terének egy része $10 \text{ keV}/\mu\text{m}$ (víz) értéknél nagyobb LET értékű, amit a Pille $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ termolumineszcens anyaga rosszabb hatásfokkal mér, mint a ^{137}Cs sugárzásét, ezen felül a nagy LET értékű sugárzás minőségi tényezője sokkal nagyobb, mint a kalibráló sugárforrásé. 2001-ben – a nemzetközi DOSMAP kísérletben – az ISS NASA-moduljában hosszú idejű méréseket végeztek többek között CR-39 nyomdetektorokkal kiegészített Pille dózismérőkkel. A nyomdetektoros mérések eredményeivel korrigálni lehetett a Pille méréseit a $>10 \text{ keV}/\mu\text{m}$ (víz) tartományban. A mérések azt mutatták, hogy a $>10 \text{ keV}/\mu\text{m}$ tartományban mért dóziszárulék a Pillével a $<10 \text{ keV}/\mu\text{m}$ tartományban mért dózissal kb. 10%-a.

A Pille nem méri az űrállomáson lévő neutronok dózisát, így a személyi dózisegyenérték sokkal nagyobb, mint a Pille jelzése. További nehézséget okoz, hogy a sugárvédelmi szabályozás effektív dózissra és nem dózisegyenértékre vonatkozik, így egyértelműen kimondható, hogy a Pille által mért eredmények alapján elsősorban a különböző mérési pontokon és időpontokban érvényes dózissal arányára következtethetünk. Ugyanakkor a Pille készülék monitorozásra és egyéb összehasonlító mérések végzésére nagyon jól használható. Ennek a ténynek megfelelően kell kezelni a cikk további részében megadott dózissal.

A továbbiakban tekintsük át az ISS pályája mentén és az ISS belső terében várható sugárzás jellemzőit.

A SUGÁRZÁSI TÉR AZ ŰRÁLLOMÁS PÁLYÁJÁNÁL

A Föld körüli pályán keringő Nemzetközi Űrállomás esetében a sugárzási tér igen összetett, időben és térben nagyon inhomogén: befolyásolja a pályamagasság, a pillanatnyi földrajzi helyzet és az aktuális naptevékenység, szögeloszlása erős anizotrópiát mutat. Az irodalomban a sugárzás csoportosítására több, esetenként egymásnak ellentmondó szempontot találunk, amelyekben gyakran keverednek a sugárzás eredetére és a kialakult térre vonatkozó jellemzők. A tényleges helyzetet egyértelműbben jellemzi, ha különválasztjuk a részecskék eredetére, illetve az alacsony Föld körüli pályán keringő objektumok szempontjából kialakult sugárzási térre vonatkozó jellemzőket. Eredet szerint megkülönböztethetjük az időben közel állandó galaktikus és az időben nagymértékben változó intenzitású és spektrumú szoláris sugárzást. A sugárzás fajtája szerint elektronokról, töltött nehéz részecskékről és fotonokról, míg az eloszlást tekintve befogott és nem befogott részecskékről beszélhetünk.

A galaktikus kozmikus sugárzás elsősorban nagyenergiájú – a Naprendszeren kívülről érkező – töltött részecskékből áll, a csillagközi térben általában állandó intenzitású és közel izotróp. 1-2%-a elektron és pozitron, 86%-a proton, 12%-a alfa részecske, de emellett kis gyakorisággal a periódusos rendszer legtöbb elemének ionját tartalmazza.

A szoláris sugárzást – melynek intenzitása a naptevékenység függvényében széles határok között változik – a Nap folyamatosan kifelé áramló koronája alkotja, melynek átlagos sebessége 400 km/s . Fő összetevői protonok és elektronok, de a protonoknál 10–40-szer kisebb arányban előforduló alfa-részecskéket és a vasig bezárólag nehéz magokat is tartalmaz, a galaktikus sugárzásnál lényegesen lágyabb spektrummal. Mennyiségük a Naptól való távolsággal csökken, Föld távolságnyira $6\text{--}10 \text{ proton}/\text{cm}^3$. A részecskék energiája néhány MeV-től több ezer MeV-ig terjedhet. A sugárzás intenzitása általában kicsi, csak az idő 1%-ában emelkedik a galaktikus sugárzás fölé. Azonban nagy napkitörések esetén a galaktikus sugárzás intenzitását három-négy nagyságrenddel is felülmúlhatja, így az emberes űrrepüléseknél fellépő legnagyobb kockázati tényezők közé sorolható.

Napkitörések esetén töltött részecskék – döntően protonok, kismértékben alfa és nehezebb töltött részecskék – lökődnek ki a Nap felszínéről, energiájuk több GeV is lehet. Maximális napaktivitás során évente átlagosan tíz kitörés figyelhető meg, míg a

naptevékenység minimumánál csupán évente egy. A legnagyobb kitörésekkor – melyek általában a naptevékenység maximumát követően jönnek létre – akár 10^{10} részecske juthat el Föld távolságnyra négyzetcentiméterenként.

Alacsony Föld körüli pályán az évi néhány napkitöréstől eltekintve a dózis jelentős része a kozmikus háttérsugárzásból származik. A galaktikus és a szoláris kozmikus sugárzás kölcsönhatásban áll egymással. Napkitörések idején a sugárzási szint sok nagyságrenddel megnőhet, ilyenkor a Naprendszeren belül a szoláris kozmikus sugárzás intenzitásának növekedésével párhuzamosan a galaktikus kozmikus sugárzás szintje csökken. Nagyobb naptevékenység esetén kisebb a dózisteljesítmény, mert a kiáramló napszél töltése miatt a galaktikus részecskéknek a naptevékenység minimuma alatt 470 MeV, maximuma alatt 1200 MeV energiának megfelelő potenciálgátat kell leküzdeniük.

A galaktikus és a szoláris sugárzás főbb jellemzőit az 1. táblázat foglalja össze.

A földfelszínen kettős „védőpajzs” alatt élünk. A Föld mágneses tere a kozmikus sugárzás töltött részecskéit eltéríti, befogja, ezáltal jelentős védelmet nyújt a kozmikus sugárzás lágy összetevői ellen, és védi a légkört a napszél eróziós hatásával szemben. A másik védőpajzs a légkör, amelynek az űrállomások magasságában csak közvetett, töltött részecske befogó hatása van.

1. táblázat. A galaktikus és a szoláris sugárzás főbb jellemzői

Galaktikus sugárzás	Szoláris sugárzás
<ul style="list-style-type: none"> - 50 MeV–10^{14} MeV - 86% proton, 13% alfa, 1% C, N, O stb. - a Földön több száz méter mély bányákban is észlelhető - fluxus: $1 \cdot 10^6$ részecske/(hét*cm^2), ami körülbelül 2,5 mGy/hét, azaz 130 mGy/év dózist felel meg az űrállomáson - mivel nagy az energiája → nagy az áthatolóképesége → ahhoz, hogy felére csökkentsük a dózist, 20 g/cm^2 anyag szükséges, ez körülbelül 8–10 cm vastag alumínium űrállomás falat jelent 	<ul style="list-style-type: none"> - 1 MeV– néhány 1000 MeV - döntően proton, alfa, kevés C, N, O - a Földet nem éri el - nagy kitörésekkor a szekunder neutronok lejuthatnak Földre - csak az idő 1%-ában emelkedik ki a galaktikus háttérből Föld távolságnyra, de elérheti annak 1000–10000-szeresét is. - évi 1–2 nagy kitörés, de nagy a gyakoriság ingadozás; mire eljut földtávolságra: néhány perc - néhány óra (sebességtől függ), időtartama: 3 óra - 3 nap

A napszél a Föld mágneses terét zárt térrészbe szorítja be, amit magnetoszférának nevezünk. Az erővonalak a Nap felől benyomódnak (orr-rész), a Nappal ellentétes oldalon elnyúlnak (uszály vagy csóva). A mágneses erővonalak együtt forognak a Földdel. A külső erővonalakkal a bolygóközi mágneses erővonalak összekapcsolódhatnak, és így nyitottá válnak a bolygóközi tér felé. A napszél töltött részecskéi a nyitott erővonalakon keresztül tudnak bejutni a magnetoszféra belsejébe.

A zárt erővonalak mentén stabil pályákra befogott – a világűrből, illetve a Napból érkező primer, vagy a légkörben keletkező szekunder – töltött részecskék sugárzási övezeteket hoznak létre, melyet felfedezőjükről van Allen övezeteknek hívnak. Ezek belsejében a sugárzási szint igen nagy.

A Föld körül két stabil övezet létezik: a külsőt az egyenlítő felett 3,5–4,5 földszögnyi távolság között nagy energiájú elektronok, a belsőt 1,5–2,0 földszögnyi távolság között nagy energiájú protonok és kisebb mértékben elektronok alkotják. Az elektronok energiája 0,5 és 7 MeV között, a protonoké 10 és 600 MeV között változik. Ezen kívül a Föld körül létezik

egy anomális övezet is, melyet a Nap mágneses terébe, a helioszférába semleges elemként bejutó és ott ionizálódó nehéz töltött részecskék (HZE) alkotnak.

A mágneses erővonalak irányának és sűrűségének megfelelően a befogás védőhatása a mágneses egyenlítő fölött maximális, és a pólusokhoz közeledve erősen csökken. Kitüntetett hely a brazil partok és Dél-Afrika közötti tér, ahol – a Föld mágneses tengelyének a geometriai tengelyhez képesti eltolódása miatt – a sugárzási övezet a felszín feletti 200 km magasságig nyúlik le (Dél-Atlanti anomália). Töltésüknek megfelelően az elektronok kelet felé, a protonok és egyéb nehéz ionok nyugat felé haladnak. Bonyolult spirál alakú mozgást végeznek a sarkok között, pólustól pólusig a részecske néhány másodperc alatt teszi meg az utat.

A Földet övező védőpajzs másik eleme maga a légkör, melynek főként alsó, sűrű rétegei a mágneses árnyékoláson átjutó, maradék kozmikus sugárzás nagy részét elnyelik. Alacsony Föld körüli pályán keringő űrállomások, űrhajók esetében a védőpajzs egyik eleme – a légkör – már szinte teljesen hiányzik, így a kozmikus eredetű dózisterhelés a tengerszinti magasságon lévőnek több mint százszorosa is lehet. Az alacsony pályán keringő űrállomások esetében a dózis döntő részét a protonok okozzák, ám kisebb árnyékolás – például az űrállomáson kívüli munkavégzés – esetén az elektronokból származó felületi dózis lehet a nagyobb.

Az atmoszférát elérő részecskék energiájuk nagy részét a környező atomok, illetve molekulák ionizációja során leadják. Emellett nagyenergiás magreakciók során számos szekunder részecske is keletkezik. A leggyakoribb kölcsönhatás a protonok és a levegő molekuláinak kölcsönhatása során keletkező szekunder neutronok, protonok és a pion triplet. A töltött pionok müonokra és neutrínókra bomlanak. A müonok elérhetik a földfelszínt, de esetleg elektronokra és neutrínókra bomlanak. A semleges pionok foton sugárzással elbomlanak.

A SUGÁRZÁSI TÉR AZ ŰRÁLLOMÁS BELSEJÉBEN

A kozmikus sugárzásnak a felső légkörrel, illetve az űrhajó szerkezeti elemeivel való kölcsönhatása egyrészt gyengíti, illetve elnyeli a primer sugárzást, de emellett a kölcsönhatások során jelentős másodlagos (szekunder) sugárzás is létrejön, mely a sugárzási teret még összetettebbé teszi. A létrejött szekunder sugárzás töltött részecskéket, neutronot, gamma és röntgensugárzást egyaránt tartalmaz.

A dózisteljesítmény az űrállomás belsejében a szabad térben, azaz az űrállomáson kívül mérhető dózisteljesítmény 0,8% és 10%-a között változik. Űrséta esetén az űrhajóst érő dózis az űrruha árnyékolása miatt harmada annak, mint ami szabad térben lenne.

A primer kozmikus sugárzás neutronokat nem tartalmaz, mivel a neutron szabad állapotban mintegy 10 perces felezési idővel elbomlik protonra, elektronra és antineutrínóra. Azonban az elsődleges sugárzás egy része a Föld felső légkörében illetve az űrállomás szerkezeti elemeiben másodlagos sugárzássá alakul. A neutronokból származó egyenértékű dózis akár a töltött részecskék dózisének 30-40%-át is elérheti.

Neutronok két módon keletkezhetnek. Kisenergiájú neutronok – közelítőleg 10 MeV energiáig – gerjesztett magokból léphetnek ki, izotróp szögeloszlással. Emellett ütközések során nagyenergiájú protonokból töltéscserével keletkezhetnek nagyenergiájú neutronok. Ez utóbbiak irányeloszlása nem izotróp, mivel a keletkezés módja miatt valószínű kilökődési irányuk előre, a földfelszín felé mutat. Az atmoszféra felső részében a lefelé irányuló részecskeáram nagyobb, a sebesség szögeloszlásának maximuma függőlegesen lefelé van.

A napciklus is befolyásolja mind az űrállomásnál kialakuló sugárzási teret, mind a neutronok fluxusát. Naptevékenység maximuma esetén a Naprendszerben a Napból eredő

protonok pozitív töltésű plazmát hoznak létre, amely a galaktikus eredetű részecskéket fékezi, azaz energiájukat csökkenti, kevesebb éri el a felső légkört, mint napminimum esetén így napminimumnál több szekunder neutron keletkezik. Nagy napkitörés esetén szintén megnő a szekunder neutronok száma. A keletkező neutronok száma és energiaspektruma is függ a földrajzi szélességtől és a tengerszint feletti magasságtól. A pólusok közelében a maximális neutronsám 18 km magasan van, míg az egyenlítőnél 15 km-nél.

Amellett, hogy napkitörések idején a sugárzási szint jelentősen megnőhet, az eltérő árnyékolás miatt az űrhajó különböző pontjain is jelentős lehet a különbség a dózisteljesítményben. Emiatt a helyfüggés meghatározására (dózistérképezés) is szükség van, mely szintén indokolja a helyszíni méréseket. Emellett nem szabad elfelejtkezni a védelem hatásosságának folyamatos változásáról sem. Mivel a befogott (főként szoláris eredetű) sugárzás erős irányfüggést mutat, az űrhajó orientációjának változása is befolyással lehet a belsejében kialakuló térre, illetve az űrhajósok dózisára.

Mivel az eredő sugárzás igen sok paramétertől függ, mérések nélkül, csupán számításokkal és modellezéssel igen nagy lehet az eredmény pontatlansága.

AZ ŰRHAJÓSOK DÓZISKORLÁTAI

Hazánkban a természetes eredetű ionizáló sugárzások okozta átlagos éves effektív dózis 2,4 mSv. A Nemzetközi Űrállomás fedélzetén küldetést teljesítő űrhajósok ennél több mint két nagyságrenddel nagyobb dózist (~300 mSv/év) kapnak. A küldetések hossza jellemzően fél év, vagyis az erre az időszakra vonatkozó átlagos effektív dózis (~150 mSv) a földi sugárveszélyes munkahelyekre évente 20 mSv dóziskorlát 7,5-szerese. Az űrhajósokra ezért nem éves vagy ötéves, hanem életpálya-dóziskorlátokat határoznak meg. A földi sugárveszélyes munkahelyekhez képest jelentős különbség még, hogy amíg a nukleáris iparban, egészségügyben dolgozó emberek sugárterhelése jellemzően, az idő jelentős részében nem haladja meg a lakosságot a természetes eredetű háttérsugárzásból érő sugárterhelést, az űrhajósokat nem csak munkájuk során, hanem pihenő- és szabadidejükben is folyamatosan éri a földfelszíni háttérsugárzás dózisénaál több mint két nagyságrenddel nagyobb dózisú kozmikus sugárzás.

Az űrhajósokra az egyes űrügynökségek eltérő életpálya-dóziskorlátokat határoznak meg, és ezek a korlátok az elmúlt évtizedekben jelentős mértékben változtak, többnyire csökkentek. A NASA hatályos szabványa szerint a küldetés során az űrhajóst érő sugárterhelés a rákos megbetegedés következtében bekövetkező elhalálozás kockázatának legfeljebb 3%-os növekedését eredményezheti. Mivel a kockázatok mértéke nemtől és életkortól függ, ezért nemtől és életkortól függő dóziskorlátokat határoztak meg. Ez azt is jelenti, hogy az idősebb férfi űrhajósok előnyt élveztek. Példaként egy 50 éves amerikai férfi űrhajós 1 Sv, míg egy 30-éves női űrhajós legfeljebb 600 mSv effektív dózist kaphat a pályája során.

Az Amerikai Nemzeti Tudományos, Mérnöki és Orvostudományi Akadémiák (U.S. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine) 2021 nyarán készült tanulmánya arra biztatta a NASA-t, hogy nemtől és életkortól független életpálya-dóziskorlátot határozzon meg, és annak értékét 600 mSv-ben korlátozza, ami a 30 éves női űrhajósok életpálya-dóziskorlátjának felel meg. A javaslat ugyan jelentős szakmai vitát váltott ki, annak adaptálása folyamatban van. A vita alapja az, hogy az egyenlőség elve az új javaslat szerint az egységes életpálya-dóziskorlát vagy a korábbi gyakorlat szerint a mindenkire egységes megengedhető többlet kockázat szintjén valósuljon meg.¹

¹ Ez egyben azt is jelenti, hogy a fiatal női űrhajósoknak nagyobb kockázatot engednek meg, mint idősebb és férfi társaiknak.

Az életpálya-dóziskorlát meghatározásánál az Európai Űrügynökség (ESA) az ICRP 60 szerinti 50 mSv/év foglalkoztatási dóziskorlátot vette alapul. 20 éves életpályát feltételezve ez 1 Sv életpálya-dóziskorlátot eredményezett nemtől és életkortól függetlenül. A foglalkoztatási dóziskorlátot az ICRP 103-ban azóta ugyan 20 mSv/év-re csökkentették, az ESA az életpálya-dóziskorlátot változatlanul 1 Sv-ben határozza meg.

A többi űrügynökség gyakorlatától eltérően az Orosz Űrügynökség nem csak a daganatos megbetegedések, hanem a kozmikus sugárzás okozta egyéb sztochasztikus hatásokat is figyelembe veszi, valamint az űrbéli környezet hatásával is számol (pl. súlytalanság körülményei között az ionizáló sugárzás okozta hatások eltérőek). Számos vizsgálat azt mutatta, hogy a kozmikus sugárzást alkotó töltött részecske sugárzás (főként protonok és He-atommagok, valamint kisebb részben nehezebb ionok) a rosszindulatú daganatok mellett súlyos szív- és érrendszeri betegségeket, valamint a központi idegrendszer működésének zavarait okozhatják, utóbbiak az űrhajósok kognitív képességeinek jelentős romlását eredményezhetik. Figyelembe véve a nem-daganatos megbetegedések kockázatát, az így meghatározott 1 Sv életpálya-dóziskorlát összességében nem 3%, hanem 7%-os többletkockázatot jelent a halálos kimenetelű megbetegedések tekintetében.

A kanadai űrhajósok életpálya-dóziskorlátja az ESA gyakorlatával összhangban nemtől és életkortól függetlenül 1000 mSv, míg a Japán Űrügynökség (JAXA) a korábbi NASA gyakorlathoz hasonlóan nemtől és életkortól függő életpálya-dóziskorlátokat alkalmaz, melyet a 3%-os kockázatnövekedésből vezet le. A Kínai Űrügynökség (CSA) dóziskorlátozásáról jelenleg nincs elérhető publikus információ.

A későbbiekben foglalkozni kell a tartós holdutazások és a marsutazások dóziskorlátaival is (Boscolo, 2022).

PILLÉK AZ ISS-EN

2003-ban, a moszkvai Orvosbiológiai Problémák Intézetével együttműködésben egy Pille rendszer (Pille-MKSZ) jutott fel az ISS-re a Progressz-12 teherűrhajó fedélzetén. Az új rendszer, egy kiolvasó és 10 dózismérő – mint fedélzeti és személyi dozimetria szolgálati berendezés – került az ISS Zvezda moduljára. 2009-ben a dózismérők száma további 4-gyel bővült, majd 2018-ban – a 2003-as Pille szavatosságának lejáta miatt – egy új kiolvasót és további 5 dózismérőt juttattak Szozuz űrhajóval az űrállomásra. Egy hónapon keresztül a két kiolvasó egy időben, párhuzamosan üzemelt, majd az eredetit tartalékba helyezték.

Az ISS-en használt Pille kiolvasókat és a Farkas Bertalan által használt kiolvasó típust az 1. ábra mutatja be.

A Pillével végzett mérések célja

- űrhajósok személyi dózisének mérése a Föld felé irányuló extrém nagy napkitörések (koronakidobódások) alatt;
- az űrállomás egyes pontjain és az űrállomáshoz kapcsolódó űrhajókban, illetve teherűrhajókban elhelyezett dózismérőkkel – általában havonkénti kiolvasással – a helyi dózisviszonyok feltérképezése;
- fedélzeti kísérletek (pl. antropomorf fantom) során tudományos célú dózismérés;
- űrhajósok járulékos dózisterhelésének mérése űrséták alatt;
- automata, nagy felbontású dózismérés a kiolvasó készülékben jellemzően 90 percenként (keringésenként).

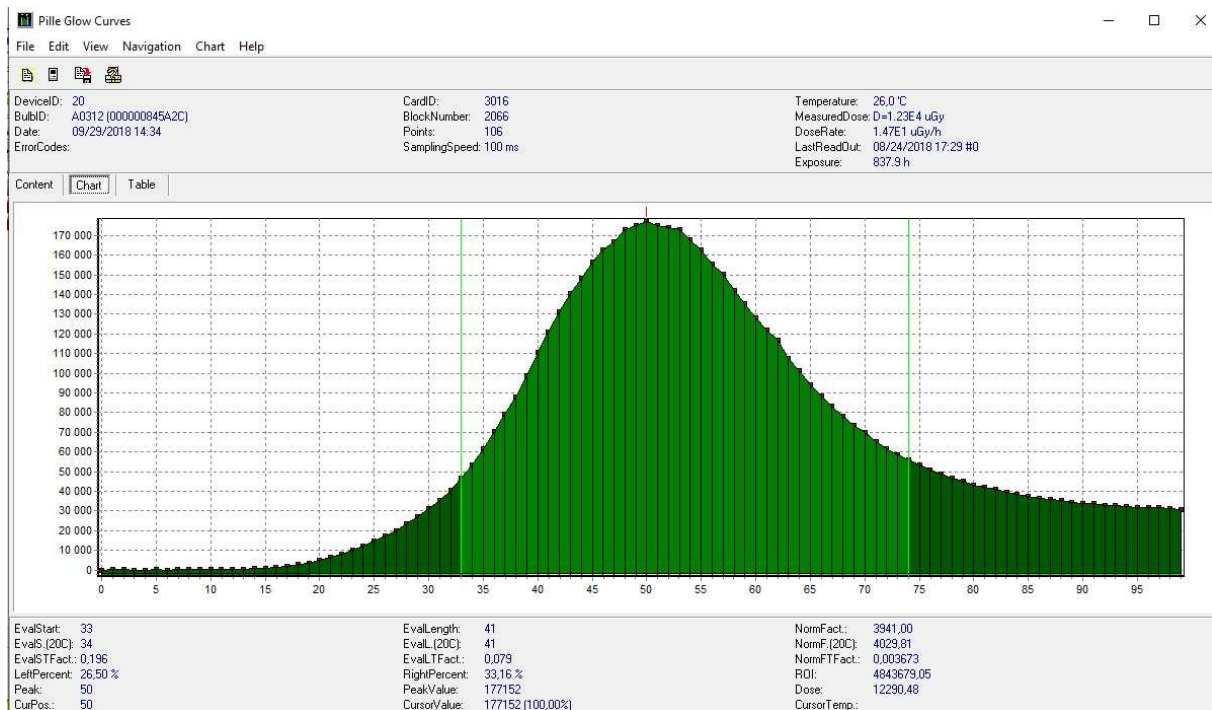


1. ábra. Pille készülékek. A felső készülék az ISS-en, a középső a Mir űrállomáson használt készülék, az alsó a Farkas Bertalan által használt változat

Az ISS-en használt Pille készülékek egy memóriakártyán (2. ábra) tárolják a mért dóziszokat és a dózismérők kifűtési görbéit (3. ábra) is.



2. ábra. A Pille készülék memóriakártyája, amelyen a mért adatokat lehozzák feldolgozásra



3. ábra. Kifűtési görbe (12,3 mGy dózis). A világosabb árnyalattal jelölt tartomány alapján történik a dózis meghatározása

A Pille készülékek érzékenysége azonosra van beállítva, ez lehetővé teszi, hogy az adott dózismérőt bármelyik készüléssel használjuk. A 4. ábra egy Pille készüléket és a vele használt dózismérőket mutatja be.

A Pille készülék dózismérője a kiolvasást kivéve alumínium védőtokban helyezkedik el (5. ábra). A védőtokon található két bogáncszár segítségével azok az úrállomás posztószerű falára erősíthetők.



4. ábra. Pille készülék és dózismérői. A kiolvasásra váró dózismérők átmeneti rögzítéséhez rendelkezésre áll egy bogáncszárral borított lap.



5. ábra. A Pille készülék dózismérője és a dózismérő védőtokja

MÉRÉSI EREDMÉNYEK

Az automatikusan mért adatok feldolgozása

A Pille készülék automata üzemmódban mért adatai alapján meg lehet adni a napi dózisokat és ebből a hosszabb időre – akár egy évre – összegzett dózist, valamint az átlagos dózisteljesítményt is. A Pille automata mérési periódusát a Nemzetközi Űrállomás keringési idejéhez (90–93 perc) közeleink, 90 percnek választottuk, így egy naptári napnak 16 darab 1,5 órás mérési ciklus felel meg.

A Pille készülék a mért dózisokat a készülék memóriakártyáján tárolja, ezt a memóriakártyát általában félévente, a legénység cseréjével egy időben cserélik újra, és az adatokat tartalmazó kártyát visszahozzák a Földre kiértékelésre.

A kiértékelés első fázisa az, hogy a saját fejlesztésű program révén nagy tömörséggel letárolt adatokat .dat formátumú adatokká konvertáljuk, majd végül Excel formátumra alakítjuk át, a második fázis az esetleges hibás dátumadatok korrigálása. Hibás dátumadatok akkor keletkezhetnek, ha az űrhajós a Pillén a dátumot rosszul állítja be. A harmadik fázis a dózisadatok korrekciója a fedélzeti keresztkalibrációknál mért egyedi érzékenységetéréseknek megfelelően. Ezt követően a napi dózisok meghatározása az adott napon mért dózisok összegzését jelenti.

Példaként bemutatjuk három 1,5 órás mérési ciklus adatait (2. táblázat). Az adott dózismérőnél a korrekciós tényező 1,2 volt.

Ha a teljes mérés idején (2003 vége és 2022 között) folyamatosan működött volna a 1,5 órás automata mérés, akkor mintegy 110 ezer mérési adatunk lett volna, de az automata üzemmód nem mindig volt bekapcsolva. Így is 75 ezernél több adatot kellett feldolgozni, hogy a napi és a féléves dózisteljesítmény adatokat megkapjuk. 2022-ben memóriakártya hiba miatt egyik félév adatai sem voltak teljesek, így a 2022-es napi adatok hiányoznak, ugyanakkor az űrséták dózisadatait, melyeket más adattovábbítási módszerrel továbbítottak, 2022-ben is megkaptuk.

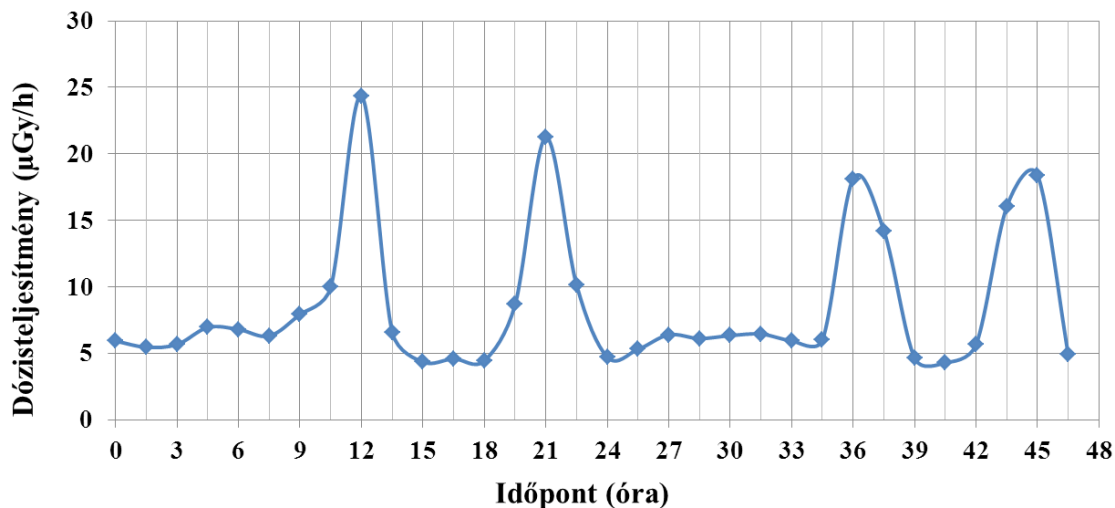
2. táblázat. Három mérési ciklus adatai

Blokk sorszám	Mérési időpont	Dózis (μGy)	Korrigált dózis* (μGy)	Dózisteljesítmény ($\mu\text{Gy/h}$)	Korrigált dózisteljesítmény ($\mu\text{Gy/h}$)	Besugárzási idő (óra)
2	2019. 06. 21 12:50	1,11E+01	1,33E+01	7,43E+00	8,92E+00	1,5
3	2019. 06. 21 14:20	1,07E+01	1,28E+01	7,17E+00	8,60E+00	1,5
4	2019. 06. 21 15:50	1,03E+01	1,24E+01	6,85E+00	8,22E+00	1,5

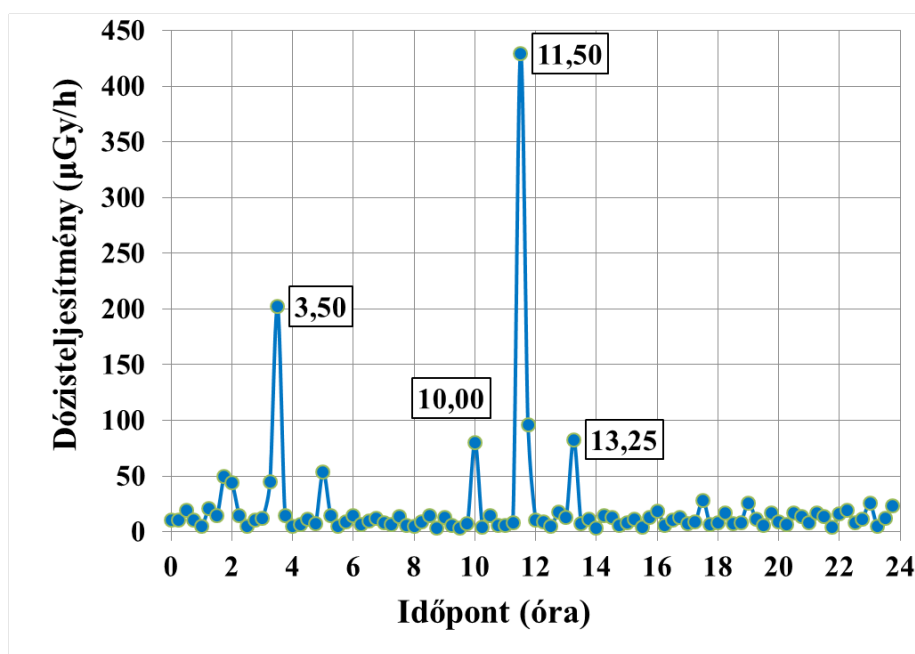
*Utólagos földi korrekció

A napi dózismenetet 1,5 órás kiolvasási periódussal mutatja a 6. ábra. Az ábrán láthatók a Dél-atlanti anomália (DAA) okozta dóziscsúcsok. Az anomália területén az ISS naponta többször is átrepül, az ábrán látható csúcsok az észak-déli, és a dél-északi irányban történő áthaladásokhoz tartoznak.

Egy alkalommal néhány napig a kiolvasási periódus 0,25 óra volt, ilyen gyakoriságnál már jól látható, amikor az Űrállomás a DAA kisebb intenzitású részén halad át (7. ábra).



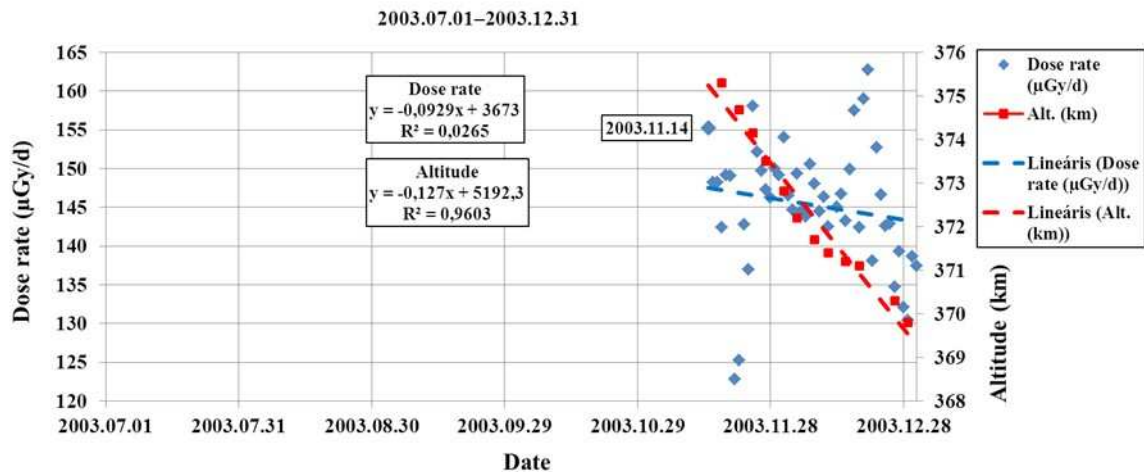
6. ábra. Kétnapi dózismenet 1,5 órás kiolvasási periódussal



7. ábra. Egynapi dózismenet 0,25 órás kiolvasási periódussal. A keretezett számok a csúcsok időpontjai

A napi dózis 16 darab 1,5 órás adat összege. A napi dózisokhoz az adott nap repülési magasságát hozzárendelve a napi dózisok időeloszlását féléves időtartamokra ábrázolhatjuk. A 2003. év végén mért eredményeket mutatja a 8. ábra. Ezen látható, hogy a repülési magasság a légellenállás miatt egyenesen csökken, a dózisok 120 és 165 µGy/nap

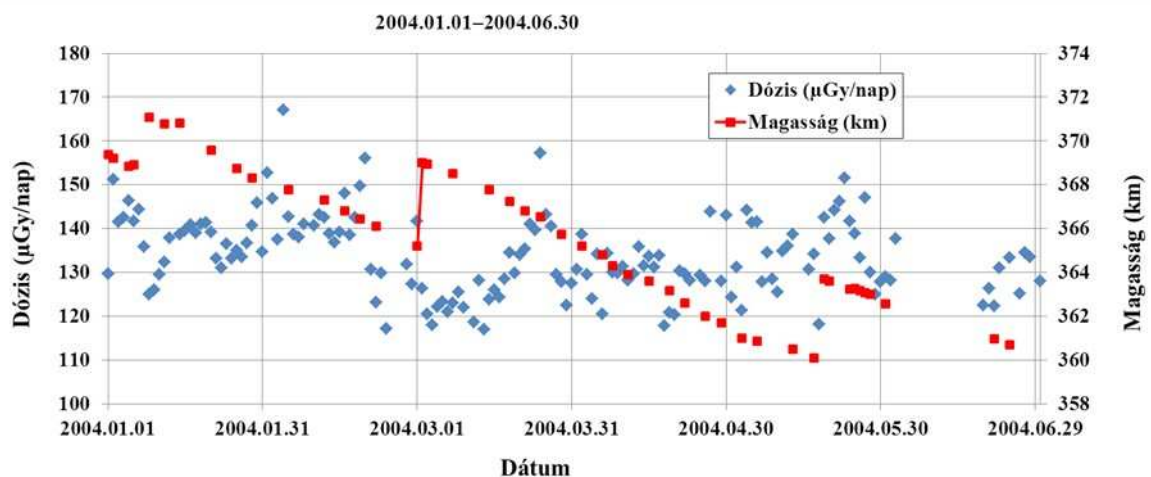
tartományban szórnak. A szórás elsősorban annak következménye, hogy a DAA-n átrepülés dózisa attól függ, hogy annak mely részén ment át az űrállomás pályája.



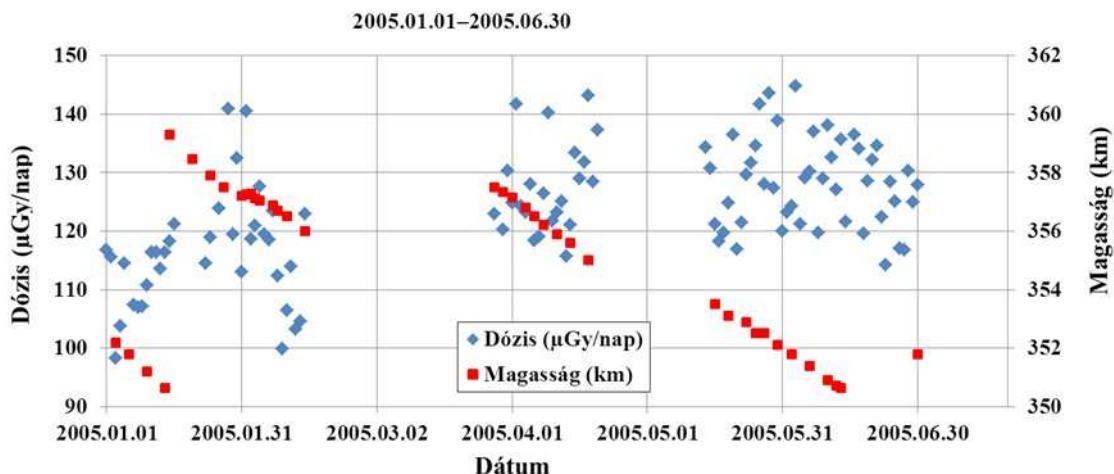
8. ábra. A napi dózisok és a repülési magasság a mérések megkezdésekor. Az első mérési nap 2003.11.14.

A mérések megkezdése utáni teljes félévben mért napi dózisokat és a repülési magasságokat a 9. ábra adja meg.

Az automata méréseket havonta az űrállomás különböző pontjaira kihelyezett dózismérők kiolvasása szakította meg. A kihelyezett dózismérők kiolvasása után a Pillét automata üzemmódba kell visszakapcsolni. Az összes mérés kb. egyharmadánál az űrhajós ezt a műveletet nem hajtotta végre. Ilyen – hiányos – méréssorozatot mutat be az 10. ábra.



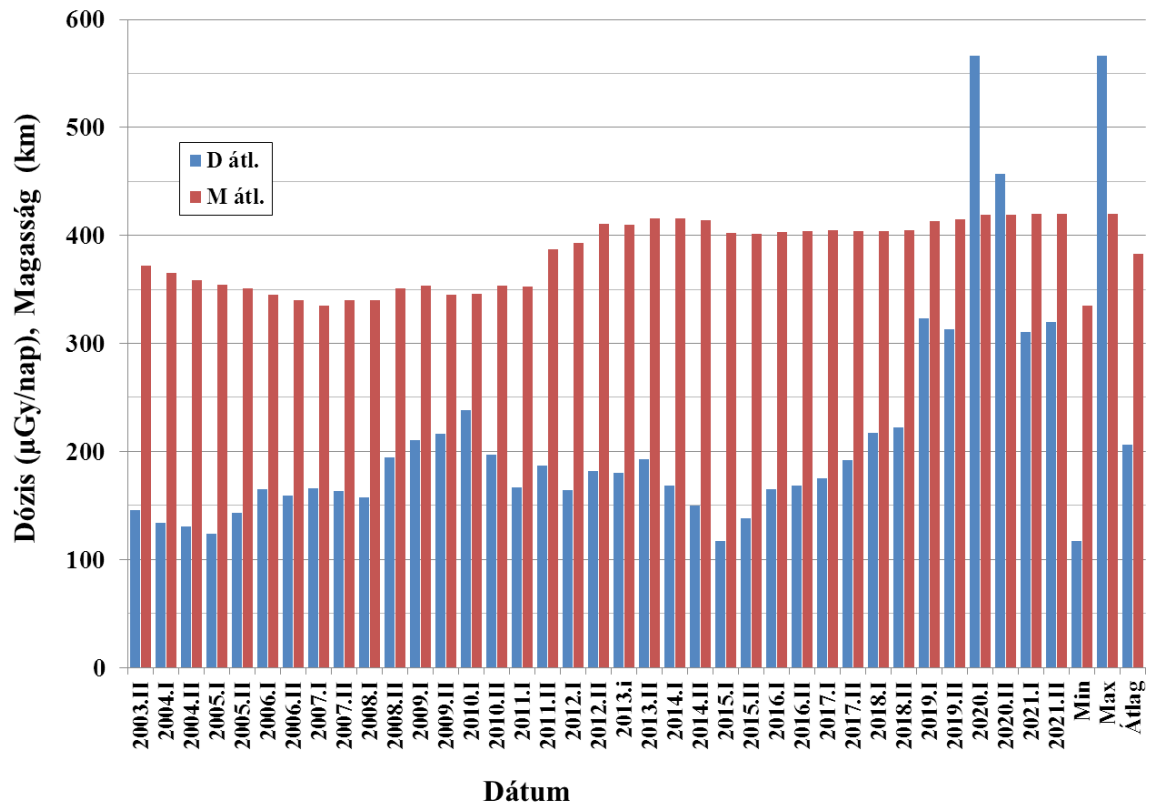
9. ábra. A napi dózisok és a repülési magasság a 2004. év első felében



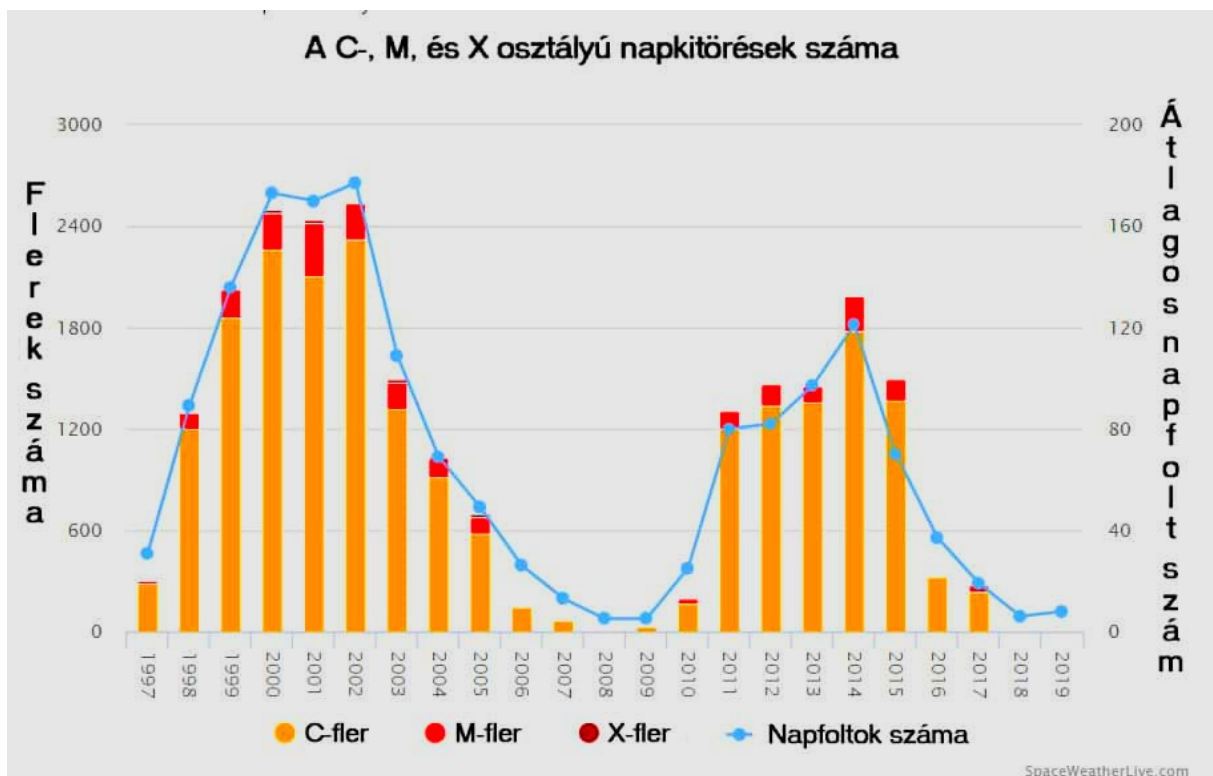
10. ábra. Példa egy adathiányos félévre. 2005.02.14. és 2005.03.28., valamint 2005.04.20. és 2005.05.14. között nem történt automata mérés

A napi dózisokból képzett féléves átlagos dózisokat és az átlagos repülési magasságokat összegzi a 11. ábra. A dózisok menete követi a napciklus változásait (12. ábra), azaz intenzív napfolttevékenység esetén a dózisteljesítmény csökken.

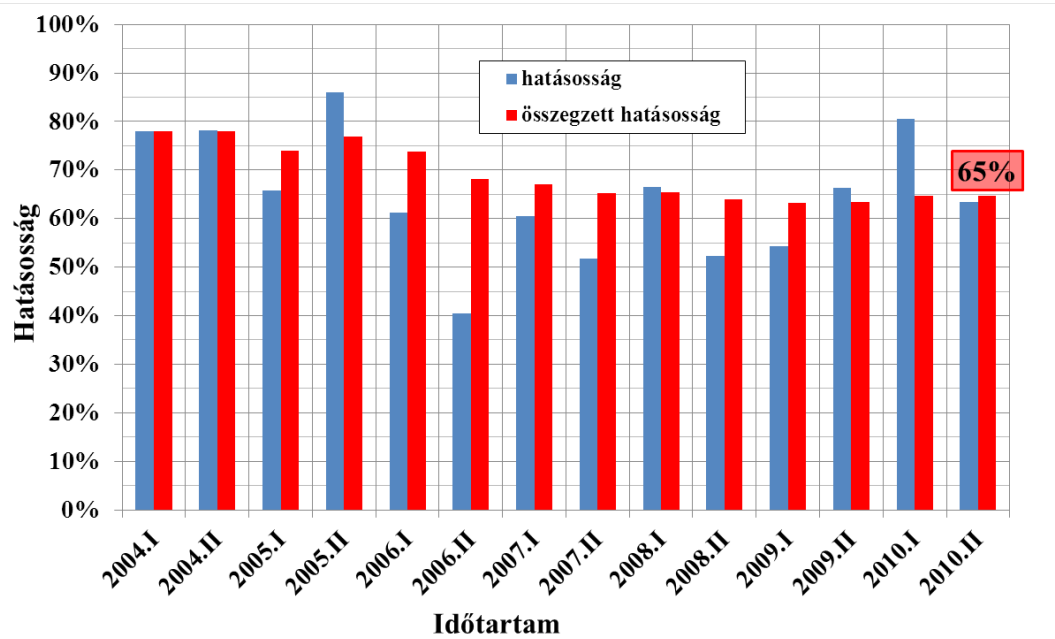
Megvizsgáltuk, hogy mennyire volt hatásos az automata adatgyűjtés féléves bontásban. A hatásosság alatt azt értjük, hogy a lehetséges ciklusok számának hány százaléka volt a tényleges ciklusok száma az adott félévben és a mérések kezdete óta összegezve 2004 és 2010 között (13. ábra) és a teljes mérési időre 2004 és 2021 között (14. ábra). Megállapítható, hogy a lehetséges adatok mindössze kétharmadának mérése történt meg a vizsgált időszakban a nem kellő gondossággal elvégzett Pille beállítások miatt.



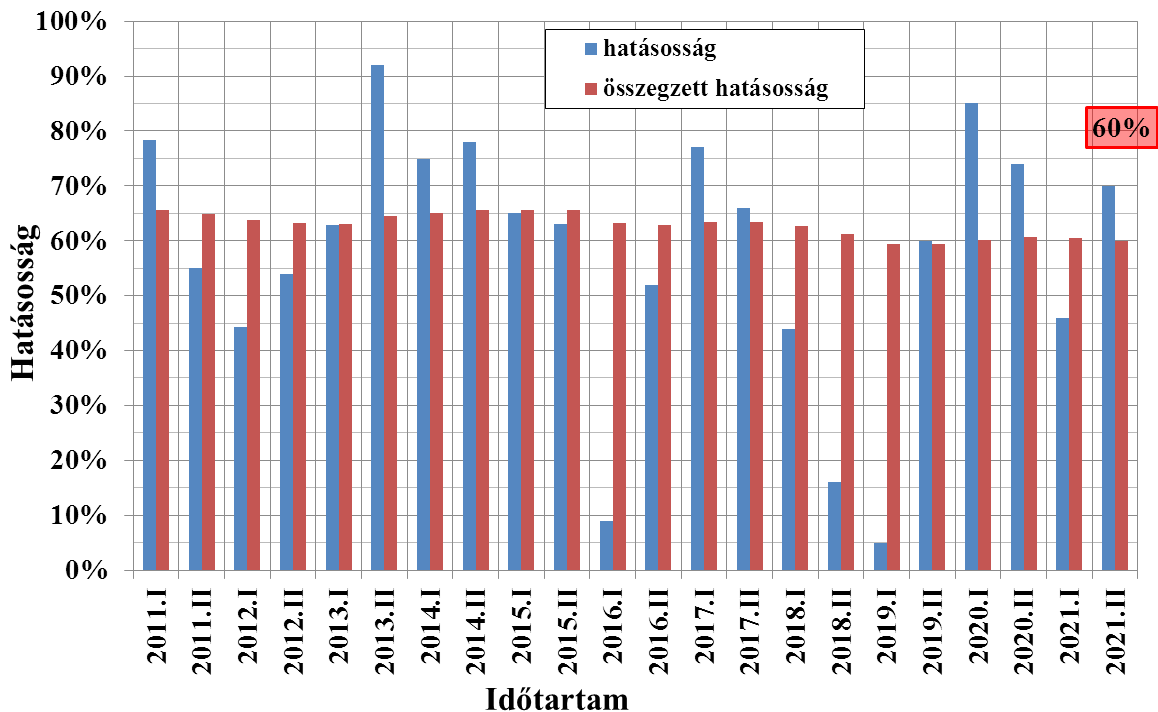
11. ábra. A 2003–2021 közötti időszak félévenkénti átlagos napi dózisa és átlagos repülési magassága



12. ábra. A naptevékenység menete 1997–2019. között (forrás Internet)



13. ábra. Az adatgyűjtés hatásossága az adott félévben és az adott időpontig összegezve 2004 és 2010 között



14. ábra. Az adatgyűjtés hatásossága az adott félévben és az adott időpontig összegezve 2011 és 2021 között

Dózistérképezés

A dózistérképezés aktuális adatokat szolgáltat arról, hogy az űrállomás egyes részein vagy egy ahhoz kapcsolt űrhajóban annak struktúrája és az ott lévő berendezések mennyire védik az űrhajósokat a kozmikus sugárzástól. A mért értékek – a mérési helyek, az űrállomás aktuális pályamagassága és orientációja függvényében – az 5–25 $\mu\text{Gy/h}$ tartományban vannak. Érdekes példa a Charles Simonyi űrhajós által végzett mérés, melynek során Pille dózismérővel összehasonlította a munkatér belsejére és a hálólhelyére jellemző dózisviszonyokat. Bebizonyosodott, hogy a közvetlenül az űrállomás falánál elhelyezett, a sugárzástól kevésbé védett hálólhelyeken a dózisteljesítmény közel kétszer akkora, mint egy árnyékolt munkatérben. A mérést követően került sor a "vízfüggöny" kísérletre; a fedélzeten tárolt, de tisztálkodásra még fel nem használt nedves higiéniai kendőket és törülközőket tartalmazó csomagok sugárzásárnyékoló hatását mérték meg az űrállomásnak egy, a hálólhelyhez hasonlóan kevésbé árnyékolt részén, Pille dózismérővel is.

Űrséták dózissai

Űrséták alatt valamennyi űrügynökség (orosz, amerikai, európai, japán, kanadai) űrhajósa a Pillét használja az ISS-en a személyi dózissának mérésére. Az orosz szkfandereken azok külső lábszári részén erre szolgáló zsebbe helyezik a dózismérőket; az amerikai űrruhákon régebben a vállrész mögött alakítottak ki hasonló zsebeket, az utóbbi években az űrruha szerszámtárolójában tartják azokat. Egyidejűleg egy, az űrállomáson belüli referencia dózismérővel mérik a benti dózist; a mért értékek különbsége az űrsétán kapott járulékos dózis, ami akár 120 $\mu\text{Gy/óra}$ is lehet. Érdekesség, hogy ritka esetben – amerikai űrruhákban végzett űrsétáknál – a járulékos dózis negatívnak adódott. Ennek több oka is lehet: ezeknél az űrsétáknál a referencia dózismérő kevésbé árnyékolt helyen, a hálólhelyen volt, ugyanakkor az űrhajós dózismérője az űrruha szerszámtartó zsebében, erősen árnyékolt helyen; az űrsétát végzők sokszor az űrállomás Föld felőli oldalán dolgoznak, amikor az űrállomás részben árnyékolja a nyílt űr felől érkező sugárzást.

A Pille dózismérő búrákat burkoló/védő, aránylag vastag falú fém dózismérő falnak és tartótokjának sugárzást árnyékoló hatása nagyobb, mint az űrruha anyagáé, így pl. az ún. bőrdózis mérésére nincs mód. Ezért – kifejezetten az űrsétákhoz – dózismérő helyett készült egy igen vékonyfalú dózismérő patron, ennek 5 példányát vitte 2022 októberében egy Progressz teherűrhajó az űrállomásra. A dózismérő kipróbálására hamarosan sor kerül.



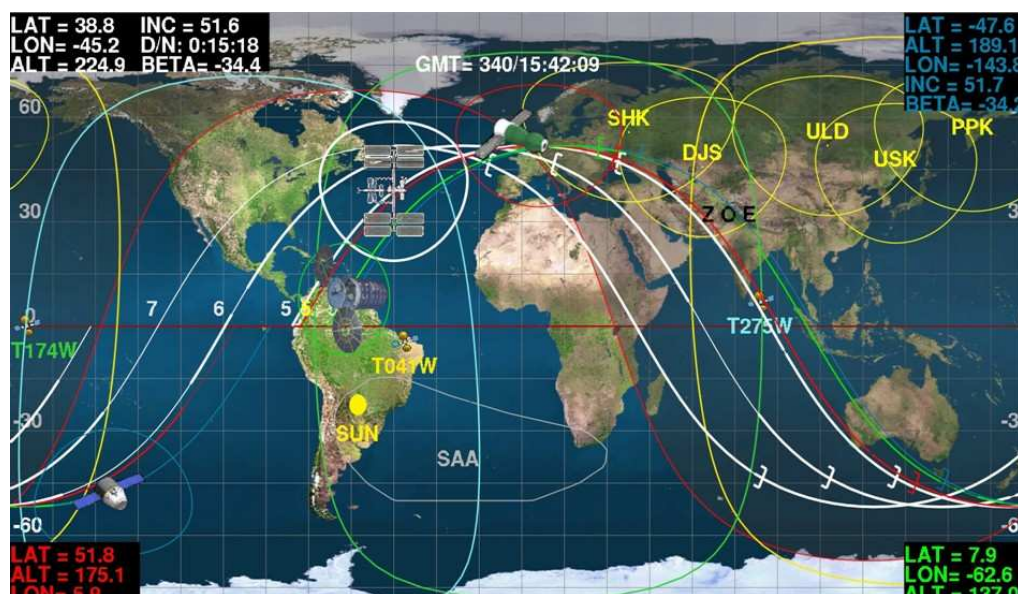
15. ábra. Az űrséta dózismérők kiolvasására szolgáló dózismérő tartó és az abba helyezhető dózismérő patron

Dél-Atlanti anomália

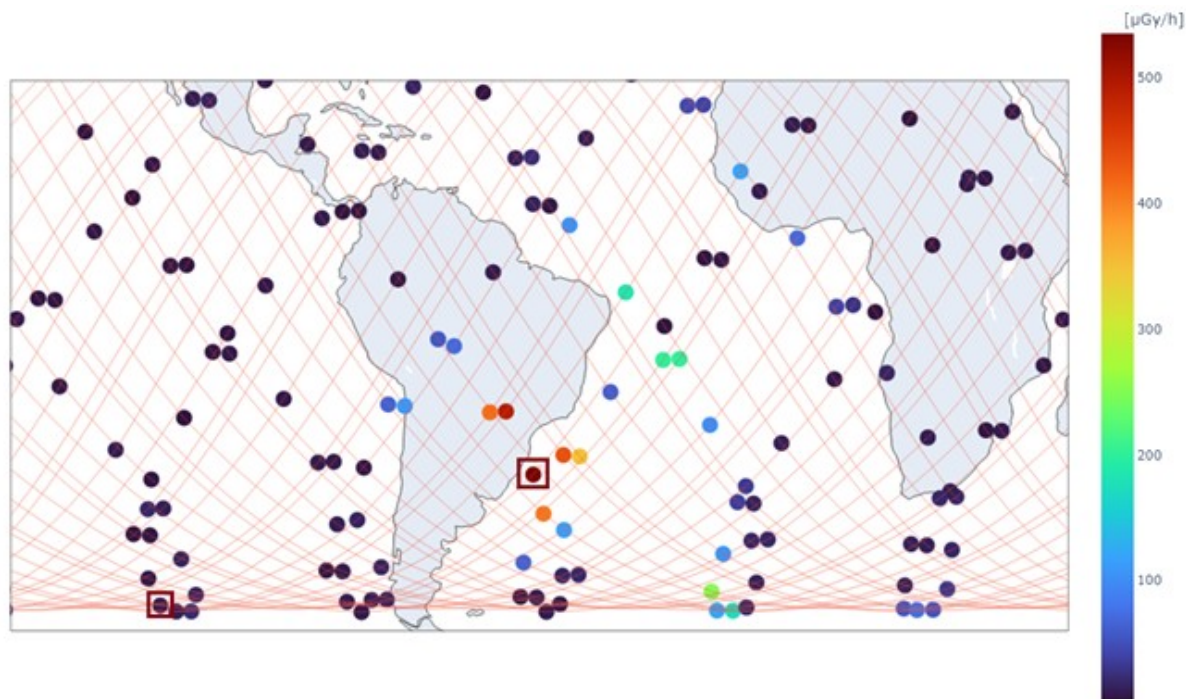
Az ISS pályamenti pozíciójáról az orosz kollégáknak köszönhetően perces felbontású idősor áll rendelkezésünkre, így minden dózisméréshez rendelhetünk közepes földrajzi szélesség, hosszúság és magasság értéket.

A Pille 15 perces méréseiből (7. ábra) kivehető, hogy a DAA-n való áthaladáskor az átlagos dózisteljesítmény megemelkedik. A legmagasabb érték 2018. augusztus 27-én volt, az értéke $540 \mu\text{Gy/h}$, ekkor az ISS a $31,2^\circ$ déli szélesség és a $47,9^\circ$ nyugati hosszúság fölött haladt el, az előző kiolvasás földrajzi koordinátái pedig $50,6^\circ$ déli szélesség és $120,7^\circ$ nyugati hosszúság. A 17. ábra alsó részén ezt a két pontot keret jelzi.

A mérések alapján a DAA határait a 77° nyugati hosszúság, 32° keleti hosszúság és a 52° déli szélesség, 23° északi szélesség között határoztuk meg. A DAA területén az átlagos dózisteljesítmény $74 \mu\text{Gy/h}$, míg a DAA kívül eső területeken $14 \mu\text{Gy/h}$ volt a mérések idején.



16. ábra. A Dél-Atlanti anomália elhelyezkedése (a jelölés SAA – South-Atlantic Anomaly)



17. ábra. A Nemzetközi Űrállomás pályája (piros vonalak) és a 15 percenként végzett kiolvasások alapján meghatározott átlagos dózisteljesítmény értékek (színes pontok). Azon pályaszakasz végpontjait, melynél a legnagyobb dózisteljesítményt mértük, az ábrán bekereteztük.

KÖVETKEZTETÉSEK

A Nemzetközi Űrállomáson a Pille termolumineszcens dózismérő rendszerrel közel húsz éven át végzett mérések bizonyítják, hogy passzív dózismérő rendszerrel is jó időfelbontással mérhető a dózisteljesítmények időfüggése. Ki kell emelni, hogy a mérések során készülékhiba nem lépett fel, de a Pillét működtető űrhajósok az esetek egyharmadában a kézi mérések után elmulasztották bekapcsolni az automata üzemmódot, ennek következtében jelentős adatvesztés történt.

A rendszer esetleges továbbfejlesztése során szükséges, hogy a ma már elavultnak számító memóriakártyák helyett más adatlehozatali módszert alkalmazzanak.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- I. Apáthy és mtársai, Proceedings of the 58th International Astronautical Congress, IAC-07-A1.9.-A2.7.04, 2007
- T. Berger és mtársai., J. Space Weather Space Clim., 7, A8, 2017
- D. Boscolo, M. Durante, Dose Limits and Countermeasures for Mitigating Radiation Risk in Moon and Mars Exploration. Physics 2022, 4, 172-184
- S. Deme, G. Reitz, I. Apáthy, I. Héjja, E. Láng, I. Fehér, Radiation Protection Dosimetry Vol. 85, Nos. 1–4, pp. 301–304 (1999), 1999
- A. Hirn, Acta Astronautica 66, 1368–1372, 2010
- P. Szántó és mtársai, Radiation Measurements 82, 59-63, 2015
- Stassinopoulos, E. G.: The Earth's trapped and transient space radiation environment, Life Sciences, NATO Series A, 154:5-35, 1988

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton fejezzük ki köszönetünket azoknak a magyar kollégáknak, akik részt vettek a Pille készülékek elkészítésében, valamint az orosz űrhajósoknak, akik a Pillével méréseket végeztek, valamint az orosz kollégáknak, akik a mérési eredmények nyers feldolgozását végezték. Köszönetünket fejezzük ki Charles Simonyinak, aki mindkét repülése során értékes méréseket végzett a Pillével.

Készült a SOMOS Alapítvány támogatásával

A LÉGUTAK RADONLEÁNYELEMÉK BOMLÁSÁBÓL SZÁRMAZÓ SUGÁRTERHELÉSÉNEK EGYÉNI ADOTTSÁGOKTÓL VALÓ FÜGGÉSE

Füri Péter

Energiatudományi Kutatóközpont, 1121. Budapest, Konkoly-Thege M. út. 29-33.

furi.peter@ek-cer.hu

A kézirat beérkezett: 2023.02.17.

Közlésre elfogadva: 2023.06.21.

Fontos területe a sugárvédelemnek, hogy az adott egyén adottságai miképpen befolyásolják a légutak sugárterhelését. A Sztochasztikus Tüdőmodellel és az ahhoz kapcsolt dozimetriai modellel végzett számítások eredményei alapján kijelenthető, hogy a bazális és elválasztó sejtek radonleányelemek bomlásából származó sugárterhelése nagymértékben függ az olyan egyéni adottságoktól, mint a légzési mintázat, a nyákvastagság vagy a magasság. A nagyobb légzési térfogat növeli az elnyelt dózisokat, hiszen ekkor több radonleányelemet lélegzünk be. A nagyobb átmérőjű és hosszabb légutaknak – a célsejtekig megtett hosszabb alfa-részecske út miatt – dóziscsökkentő hatása van. Mindezek miatt a radonleányelemek bomlásából származó dózisteljesítmény becsléséhez a humán légutakban személyre kell szabni a dózisszámítást.

Kulcsszavak: légutak sugárterhelése, radon, sztochasztikus tüdőmodell, egyéni adottság

The effect of the individual characteristics of the subjects on the radiation burden of the airways originating from the decay of radon progeny

How the individual characteristics of a person affect the radiation burden of the airways is an important question of radiation protection. Calculations with the Stochastic Lung Model and a dosimetry model showed, that the absorbed doses in the nuclei of the basal and secretory cells – originating from the decay of the radon progeny– depend significantly on the individual characteristics of the subjects. Smaller amount of inhaled air and longer distance between the alpha-emitter and the target cells –caused by bigger body height – reduces the dose. These result show, that radon dosimetry must be personalized as much as possible.

Keywords: radiation burden of the airways, radon, stochastic lung model, individual characteristics of the subject

BEVEZETÉS

A radon nemesgáz, mely jellemzően nem kapcsolódik a környezeti levegőben lévő aeroszolokhoz, így nem ülepedhet ki a légutakban. Felezési ideje (3,8 nap) a légzési periódushoz viszonyítva hosszú (5 másodperc ülő egészséges felnőtt férfi esetén), ezért kicsi a valószínűsége, hogy éppen akkor bomlik el, ameddig a tüdőben van. Leányelemei, mint a 218-as és 214-es tömegszámú polónium, a 214-es tömegszámú ólom és bizmut nagy valószínűséggel tapadnak ki aeroszokok felszínére. A kitapadt, de a ki nem tapadt radonleányelemek is kiülepedhetnek a légutakban, így aztán – a kiülepedési helytől és a légutak tisztulási mechanizmusainak sebességétől függően – órákat vagy napokat is eltölthetnek a tüdőben, mely során nagy valószínűségű akár a 218-as, akár a 214-es tömegszámú polónium alfa-bomlása.

A kibocsátott alfa-részecskék hatótávolsága rövid, de LET (Linear Energy Transfer) értékük jelentős. Amennyiben eltalálják a DNS-t, nagy valószínűséggel okoznak sérülést az

örökítőanyagban. A javítás sok esetben nem tökéletes, mutációk keletkeznek, melyek a későbbiekben akár rákhoz is vezethetnek. A radonleányelemek egészségre gyakorolt jelentőségét mutatja, hogy kiülepedésük és bomlásuk a légutakban a dohányzás után a második legfontosabb oka a tüdőráknak [1].

Az ionizáló sugárzás biológiai hatásának meghatározása igen összetett feladat, hiszen számos más változó mellett a populáció egyes csoportjainak (pl. nők-férfiak, felnőttek-gyerekek) sugárérzékenysége nem azonos. A szolid tumorok kialakulási valószínűsége például nagyobb nők esetén [29]. Gyermekesek esetén szintén ismert, hogy azonos dózison kitéve, esetükben nagyobb valószínűséggel alakul ki rákos megbetegedés [30].

Az ionizáló sugárzás okozta károsodás mértékének becslésekor a sugárvédelemben a Hiroshimára és Nagasakira ledobott atombombák túlélőin folytatott epidemiológiai tanulmányok eredményeit veszik alapul. E tanulmányok a károsodást az effektív dózis függvényében adják meg. A sugárvédelemben a radon esetén a konverzió konvenciót alkalmazzák [2]. Ez a gyakorlatban annak vizsgálatát jelenti, hogy az adott radonszintnek megfelelő kockázatot az atombombák túlélőinek vizsgálatából meghatározott „kockázat-effektív dózis” összefüggés mekkora effektív dózissra adná. A radon esetén a fő halálozást okozó hatás a tüdőrák kialakulása. A radontól származó károsodás kockázata ezért közelíthető a radon okozta tüdőrák miatti halálozás kockázatával [3].

Az elmúlt évtizedekben széles körben vizsgálták az uránbányákra és a lakásokra végzett, dózis-hatás összefüggéseket elemző epidemiológiai tanulmányokat. Ezek egy része nagy radonkoncentrációkra tartalmazott adatokat [4]. Később az UNSCEAR 2000 [5] riportban már kisebb radonszintre is közzétettek adatokat.

Az ICRP a 103-as kiadványában $4,2 \times 10^{-5}$ mSv⁻¹ és $5,7 \times 10^{-5}$ mSv⁻¹-es értékeket publikált tüdőrák kockázatra a dolgozók, illetve a lakosság tekintetében [6]. Ebből 9 mSv/WLM (Working Level Month) és 12 mSv/WLM érték számítható dóziskonverziós tényezőkre [2].

Dóziskonverziós tényezők az epidemiológiai vizsgálatok mellett meghatározhatók matematikai modellekkel is, mint az International Commission on Radiological Protection (ICRP) Human Respiratory Tract Modelje (HRTM) [7] vagy a Sztochasztikus Tüdőmodell [8,9,10].

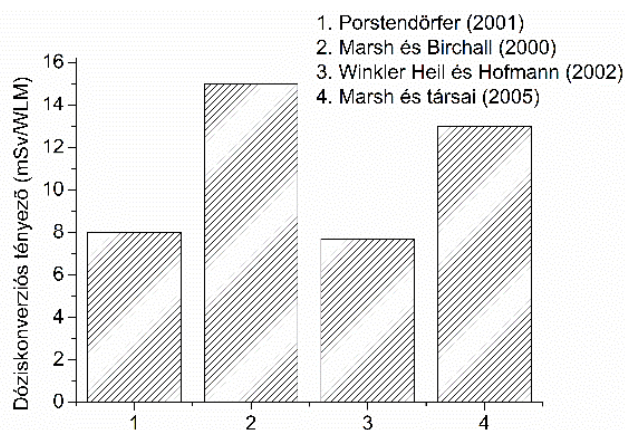
A humán tüdő egyes részeiben – a levegőt csak vezető bronchiális és a gázcserében is résztvevő acináris légutakat alkotó szövetben – lévő sugárérzékeny sejtek magjában elnyelt energia meghatározásához szükséges a légutakban kiülepedett kitapadt és ki nem tapadt radonleányelemek mennyiségének mérése vagy számítása.

A rendelkezésre álló mérési módszerek (pl. gamma-kamera) felbontása nem elegendően finom ahhoz, hogy képet kaphassunk a sok, akár térben átfedő légútban kiülepedett részecskékről. A szimulációk a matematikai aeroszol kiülepedési modellekkel és az azokhoz kapcsolódó radondozimetriai modellekkel egyedülálló lehetőséget kínálnak tehát a légutak sugárterhelésének becsléséhez.

A matematikai tüdőmodellek nagy múltra tekintenek vissza. 1935-ben Findeisen hozta létre az első teljes légúti aeroszolkiülepedési modellt [11]. Findeisen modelljét később Landahl finomította [12]. 1963-ban Weibel egy új morfológiai modellt hozott létre [13]. 1965-ben Beeckmans beépítette a Weibel-féle morfológiát Landahl modelljébe [14]. 1966-ban megjelent az ICRP első tüdőmodellje [15]. 1994-ben az ICRP új tüdőmodellt publikált [7]. Ezek egy része, például az International Commission on Radiological Protection (ICRP) Human Respiratory Tract Model-je (HRTM) [7] csupán a légutak nagyobb részeire (felső légutak, bronchiális és acináris légutak) képes részecske kiülepedési valószínűségeket számítani.

A Koblinger és Hofmann-féle Sztochasztikus Tüdőmodell [8,9,10]. finomabb felbontású, alkalmas tehát a kiülepedés számítására a tüdőt alkotó légúti bifurkációk minden szintjére (légúti generáció). A finom felbontás mellett a Sztochasztikus Tüdőmodell és a hozzá tartozó dozimetriai modell rendkívül flexibilis is, hiszen nagyszámú bemenő paraméter adható meg, mint például a légzési mintázat (a be- és kilégzés hossza, a légzési térfogat (tidal volume), a maradványkapacitás (FRC-Functional Residual Capacity)) és a légúti geometria (a légutak átmérője és hossza, az elágazási és gravitációs szögek).

A HRTM-et alkalmazva a dóziskonverziós tényezők számítására, lakás esetén körülbelül 15 mSv/WLM értéket kapunk [16]. Ez körülbelül háromszorosa az epidemiológiai módszerrel kapott értéknek [3,17]. Néhány, az irodalomban elérhető dóziskonverziós tényező számítás eredménye az 1. ábrán látható.



1. ábra: A radonleányelemek bomlásából származó a tüdőre vonatkozó dóziskonverziós tényezők (DCF) mások által számított értékei

Farkas Árpád és Balásházy Imre 2014-ben [2] a Sztochasztikus Tüdőmodell által számított kiülepedett részecskefrakciót és az ICRP 66 dozimetriai modelljét használva a BB régióra (1-8 légúti generáció) 5,40 mGy/WLM-et, a bb régióra (9-21 légúti generáció) 4,72 mGy/WLM-et, az alveoláris régióra pedig 0,19 mGy/WLM-et kapott. Az ezekből számolt effektív dózis 8,25 mSv/WLM. Ez igen hasonló a Porstendörfer (2001) [18] és a Winkler Heil és Hofmann (2002) [19] által számolt dóziskonverziós értékekhez.

Jelen, a Sztochasztikus Tüdőmodell továbbfejlesztett változatával és az új, saját fejlesztésű tisztulási és dozimetriai modellel azonos bemenő paraméterekre végzett szimulációk során a BB régióra 6,71 mGy/WLM-et, a bb régióra pedig 4,63 mGy/WLM-et kaptunk. Ezek a BB régióban 1,24-szer nagyobbak, de a bb régióban igen jó egyezést mutatnak a Farkas és Balásházy, az ICRP 66-os dozimetriai modellel végzett számításaival.

Mivel az elnyeltdózis-teljesítmények a tüdő alveoláris légútjaiban sokkal kisebbek, továbbá nincs nyáktisztulás a tüdő ezen alsó részén, a dozimetriai modell jelen verziója csupán a bronchiális légutakra számol elnyelt dózis-teljesítményeket.

Az elnyeltdózis-teljesítmények vagy a dóziskonverziós faktorok számításához használt modellek általában alkalmasak a radonleányelemek aktivitáskoncentrációjának figyelembevételére. Csupán igen korlátozott mértékben alkalmasak azonban e modellek a vizsgált személy olyan egyéni adottságainak a sugárterhelésre gyakorolt hatásának vizsgálatára, mint a légzési mintázat vagy a légutak hossza, átmérője. Nem vizsgálták tehát azt, hogy adott aktivitáskoncentrációra (pl. 40 Bq/m³) a vizsgált személy egyéni adottságai hogyan befolyásolják a légutak sugárterhelését.

A Sztochasztikus Tüdőmodell egyedülálló eszköz ennek vizsgálatára. E tanulmány célja annak a bemutatása, hogy a légzési mód, a légúti geometria és a légutakban található nyák vastagsága külön-külön hogyan befolyásolja a légutak sugárterhelését

Eszközök és módszerek

A belélegzett radonleányelemek légúti kiülepedésseloszlásának vizsgálata

A belélegzett kitapadt és ki nem tapadt radonleányelemek légúti kiülepedésseloszlását a Sztochasztikus Tüdőmodellel [8,9,10]. számítottuk. A ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi és a ^{214}Po nyáktisztulás közbeni mozgását, a bomlási valószínűségeket a nyáktisztulás során, illetve a kibocsátott alfa-részecskék pályáját egy saját fejlesztésű tisztulási és dozimetriai modellel szimuláltuk.

A sugárérzékeny bazális és elválasztó sejtek mélységeloszlását a légúti hámszövetben a Mercer és társai [20] által publikált adatok alapján határoztuk meg.

A vizsgált légzési mintázatok az 1. táblázatban találhatóak. Mind az öt szimuláció során orrlégzést feltételeztünk. Az orrban kiülepedett részecskefrakciót a Cheng és társai [21] által közzétett empirikus formulával számítottuk.

1. táblázat. A vizsgált légzési módok és testmagasságok

Sorszám	Légzési térfogat (cm ³)	Belégzés és kilégzés hossza (s)	Nyákvastagság	Testmagasság (cm)
1.	750	2,5	vékony	176
2.	750	2,5	normális	176
3.	750	2,5	vastag	176
4.	750	1,5	normális	176
5.	500	2,5	normális	176
6.	750	2,5	normális	150

A nyákvastagságokat normális esetben az ICRP 66-os kiadványból vettük [7]. Vastag esetben a nyákvastagság a normális háromszorosa [22]. Vékony esetben a nyákvastagság a normális vastagság kb. 63%-a. Ez a 176 cm-es, felnőtt férfire jellemző magasság és a 110 cm-es, 5 éves gyerekekre jellemző magasság [7] aránya. Ezt irodalmi adatok hiányában csupán a szemléltetés kedvéért választottam (2. táblázat).

A nyák sebessége 0,55 cm/perc [23] volt a tracheában (1. légúti generáció) minden szimuláció során. A nyáksebesség csökkenése 0,67-szeres volt, ahogy az elsőtől az utolsó bronchiális légúti generáció felé haladtunk [24].

2. táblázat: A nyákvastagságok vékony vastag és normál esetekre

Légúti generáció	Vékony (μm)	Normális (μm)	Vastag (μm)
1	7,96	12,24	36,74
2	7,00	11,00	33,00
3	7,00	11,00	33,00

Légúti generáció	Vékony (μm)	Normális (μm)	Vastag (μm)
4	7,00	11,00	33,00
5	6,87	10,58	31,75
6	6,60	10,16	30,50
7	6,33	9,75	29,25
8	6,06	9,33	28,00
9	5,79	8,91	26,70
10	5,52	8,50	25,50
11	5,25	8,08	24,25
12	4,98	7,66	23,00
13	4,71	7,25	21,75
14	4,44	6,83	20,50
15	4,17	6,41	19,25
16	3,90	6,00	18,00
17	3,62	5,58	16,75
18	3,35	5,16	15,50
19	3,08	4,75	14,25
20	2,81	4,33	13,00
21	2,54	3,91	11,75

A kitapadt és a ki nem tapadt radonleányelemeket leíró adatok

A ^{218}Po , ^{214}Pb és a ^{214}Bi aktivitáskoncentrációinak aránya 0,58:0,44:0,29 [5] volt. A radonleányelemek aktivitáskoncentrációja beltéri levegőben 10 Bq/m^3 -től több száz Bq/m^3 -ig terjedhet [5]. A szimulációkat egy közepesnek mondható, 40 Bq/m^3 -es radonleányelem aktivitáskoncentrációra végeztük el. A kitapadt leányelemek 6%-át képviselték a potenciális alfaenergia-koncentrációnak [25]. A ki nem tapadt leányelemek 0,8 nm-es aktivitás medián termodinamikai átmérőjűek voltak (Geometric Standard Deviation (GSD)=1,3), míg a kitapadt leányelemek 230 nm aktivitás medián aerodinamikus átmérővel és 2,1-es GSD-vel voltak leírhatók [26]. A higroszkopikus növekedési faktor 1 volt a ki nem tapadt és 2 a kitapadt leányelemek esetén.

Eredmények és megbeszélés

Az egységnyi idő alatt kiülepedett részecskeszám függése az adott alany légzési mintázatától és magasságától

A bronchiális légutakban egységnyi idő alatt kiülepedett részecskeszám nagymértékben függ a légzési mintázattól. Az egy légvétellel belélegzett levegőtér fogatnak és a légzési frekvenciának mind a ki nem tapadt, mind a kitapadt radonleányelemek esetében kettős szerepe van:

- meghatározzák a belélegzett részecskeszámot
- hatással vannak a depozíciós mechanizmusokra (gravitációs ülepedés, diffúzió, impakció).

Nagyobb légzési térfogat és a rövidebb be- és kilégzési idő nagyobb belélegzett részecskeszámot jelent. Ugyanakkor, mivel a levegő sebessége ilyenkor nagyobb, a légutakban, a részecskéknek kevesebb idejük van kiüledni. Ez csökkenti a diffúzió és a szedimentáció által kiülepített részecskeszámot, az impakció hatásfokát azonban növeli. A nagyobb levegősebesség mélyebbre sodorhatja továbbá a belélegzett részecskéket a légutakban, kisebb tehát a kilélegzett részecskék aránya.

A ki nem tapadt leányelemek esetén egyértelműen a diffúzió a domináns kiüledési mechanizmus. Nagyobb légzési térfogat és a rövidebb be- és kilégzés csökkenti a kiüledési valószínűséget. A nagyobb méretű kitapadt leányelemeknél már – bizonyos körülmények esetén – a gravitációs üledés és az impakció is jelentős kiülepítő tényezővé válik. Fontos azonban kiemelni, hogy a radonleányelemek tipikus méretére, mely kisebb néhány száz nanométernél, még a kitapadt leányelemek esetén is a diffúzió a fő kiüledési mechanizmus.

A légzési térfogat, valamint a be- és kilégzési idő függ a nemtől, kortól, az egészségi állapottól és a végzett fizikai munkától is. Gyermek és nők esetén kisebb a légzési térfogat, de rövidebb a be- és kilégzési idő, mint felnőtt férfi esetén. Egészséges alany esetében a fokozott fizikai aktivitás nagyobb légzési térfogattal és rövidebb be- és kilégzési idővel jár (3. táblázat) [7]. Légúti betegség (pl. asztma, bronchitisz) esetén a súlyosságtól függően a légzési térfogat általában nagyobb, és több légvétel történik egy perc alatt, mint egy egészséges személynél.

3. táblázat: A légzési térfogat és a be- és kilégzési idő nemtől és fizikai aktivitástól való függése

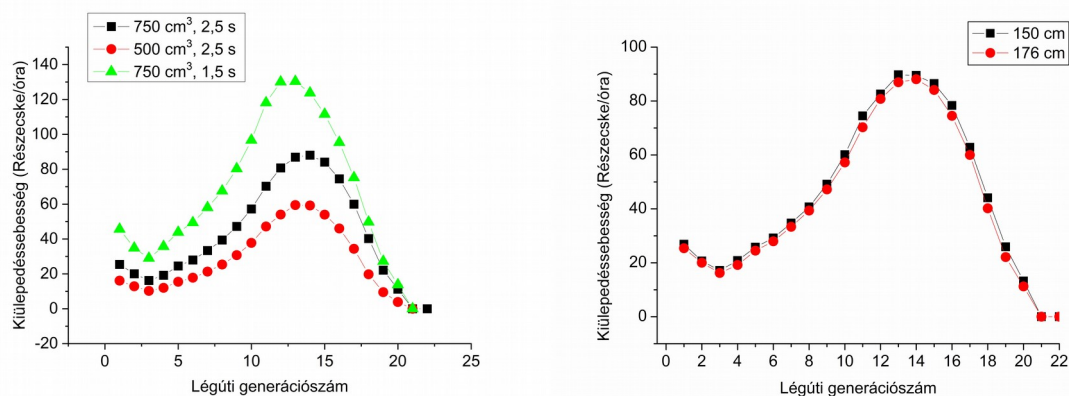
Aktivitás	Férfi légzési térfogat (cm ³)	Férfi be- és kilégzési idő (s)	Nő légzési térfogat (cm ³)	Nő be- és kilégzési idő (s)
Alvás	625	2,5	444	2,5
Ülés	750	2,5	464	2,14
Könnyű fizikai munka	1250	1,5	992	1,42
Nehéz fizikai munka	1923	1,15	1364	0,91

Az egységnyi idő alatt kiüledett részecskeszám (kiüledési sebesség) a nagyobb, 750 cm³-es légzési térfogat és a rövidebb, 1,5 másodperces be- és kilégzési idő esetén a legnagyobb (2. ábra bal oldali panel). Ez annak köszönhető, hogy annival nagyobb 1,5 másodperces belégzés esetén az egységnyi idő alatt belélegzett levegőtérfogat és radonleányelem szám, hogy ez felülírja a rövidebb belégzési idő miatti kisebb kiüledési valószínűséget. Olyan személyek esetén tehát, akik például asztma miatt sűrűbben vesznek levegőt, nagyobb kiüledett radonleányelem mennyiséggel számolhatunk a légutakban.

500 cm³-es légzési térfogat esetén kisebb a belélegzett levegőtérfogat. A légutak nagy részén kisebb továbbá a részecskék kiüledési valószínűsége is, hiszen a 750 cm³-es belégzési térfogathoz képest kisebb levegősebesség nem tudja olyan mélyre vinni a részecskéket a tüdőben, így nagyobb a kilélegzett részecskék aránya. E két egymást erősítő hatás összegeként tehát 500 cm³-es légzési térfogat és 2,5 másodperces be- és kilégzési idő esetén kapjuk a legkisebb kiüledési sebességeket. Ez az összehasonlítás (500 vs. 750 cm³ légzési térfogat) jól szemlélteti az ülő férfi-nő közötti különbséget (3. táblázat). Nők esetén tehát kevesebb radonleányelem ülepszik ki adott idő alatt a légutakban.

A gyermekek alacsonyabbak a felnőtteknél. A nők magassága, átlagosan szintén kisebb a férfiak magasságánál. E paraméter, mivel ettől függ a légutak átmérője, hatással van a részecske kiülepedési mechanizmusokra [28]. Phalen R.F. [27] adatai szerint a 150 cm-es magasság esetén, a felnőtt kaukázusi férfire jellemző 176 cm-es magassághoz képest kisebbek a légutak, mely – azonos levegősebesség mellett – növeli a diffúzió és a gravitációs ülepedés által kiülepített részecskeszámot. Azonos belélegzett levegőmennyiség mellett azonban szűkebb csövekben nagyobb a levegősebesség, mely csökkenti a diffúzió és a szedimentáció által kiülepített részecskemennyiséget.

Mint az a 2. ábra jobb oldali paneljén látható, a kiülepedési sebesség körülbelül azonos 150 cm-es és 176 cm-es testmagasság esetén. Ez annak köszönhető, hogy a szűkület kiülepedésnövelő hatását ellensúlyozza a megnövekedett levegősebesség kiülepedéscsökkentő hatása.



2. ábra. Bal oldali panel: a részecske kiülepedési sebességek háromféle légzési mintázatra (176 cm magasságra) Jobb oldali panel: a részecske kiülepedési sebességek kétféle magasságra (750 cm³ légzési térfogat, 2,5 másodperces be- és kilégzési idő)

Az elnyeltdózis-teljesítmények függése az adott alany légzési mintázatától és magasságától

A légúti hámszövet két fő sugárérzékeny sejtípusa a bazális és az elválasztó sejtek. A bazális sejtek Mercer és társai [20] adatai alapján csak a hámszövet mélyebb részén található nagyobb mennyiségben. Az elválasztó sejtek megtalálhatóak a légúti hámszövetnek a légutak felszínéhez közelebbi részén is. A ²¹⁸Po egy 6 MeV-es, míg a ²¹⁴Po egy 7,69 MeV-es alfa-részecskét bocsát ki, melyek hatótávolsága rövid, mindössze körülbelül 47 és 67 μm-es a szövetben. A bazális sejtek sok esetben túl mélyen vannak, hogy ezek az alfa-részecskék elérhessék őket. Az elválasztó sejtek azonban számos esetben elérhető távolságban vannak még a 6 MeV-es alfa-részecskéknek is. E sejtípus esetén sokkal nagyobb tehát mind a találati valószínűség, mind az egy kibocsátott alfa-részecskére eső, a sejtmagban elnyelt energiamennyiség is. Nem meglepő tehát, hogy a sugárterhelés minden légúti generációban nagyobb az elválasztó sejtekre.

Az elnyeltdózis-teljesítmények erősen inhomogének a légutakban. A legnagyobb sugárterhelés mind a hat szimuláció során az első néhány bronchiális légútban (centrális légutak) található. Ez annak köszönhető, hogy itt még kevés légúti cső van kis felülettel, nagy tehát a légutak egységnyi felületére eső alfa-bomlásszám. Egy adott bazális vagy elválasztó sejtet szemlélve átlagosan több alfa-részecske van „hatótávon belül” a nagy bronchiális légutakban.

Ahogy a felső légutaktól lefelé haladunk a tüdőben, egyre nagyobb a légutak száma és felülete. A 6 és 7,67 MeV-es alfa-részecskék a túl nagy távolság miatt nem jutnak át a légutak

közötti szöveten. Egy adott célsejtet szemlélve egyre több alfa-részecske lesz tehát „hatótávon kívül”. Ez csökkenti a dózisteljesítményt.

Egy adott légutat szemlélve viszont az alfa-részecskéknek az egyre kisebb légutakban átlagosan egyre rövidebb utat kell megtennie az elbomló ^{218}Po vagy ^{214}Po -tól a bazális vagy az elválasztó célsejtekig. A nyák vastagsága is csökken, ahogy a felső légutaktól (orr-száj, garat, gége) a tüdő mélyebben fekvő bronchiális légútjai felé haladunk. Egy adott légútban és egy alfa-részecskét szemlélve, a centrális légutaktól lefelé haladva nő annak a valószínűsége, hogy még elérhetik a bazális és elválasztó sejtek magját. Emiatt megnő az egy kibocsátott alfa-részecskére eső, a sejtmagban elnyelt energia mennyisége is, ahogy az egyre rövidebb és kisebb átmérőjű bronchiális légutak felé haladunk. E két hatás, hogy kevesebb ^{218}Po és ^{214}Po fog adott légútba esni, ám azok az alfa-részecskék, amiket ezen atomok kibocsátanak, nagyobb valószínűséggel fogják elérni a célsejteket, egymás ellen hat. A gyakorlatban ezek közül a legtöbbször az első hatás (az adott légútba eső bomlásszám) az erősebb. Ennek hatására a legtöbb esetben az első néhány bronchiális légút sugárterhelése a legnagyobb.

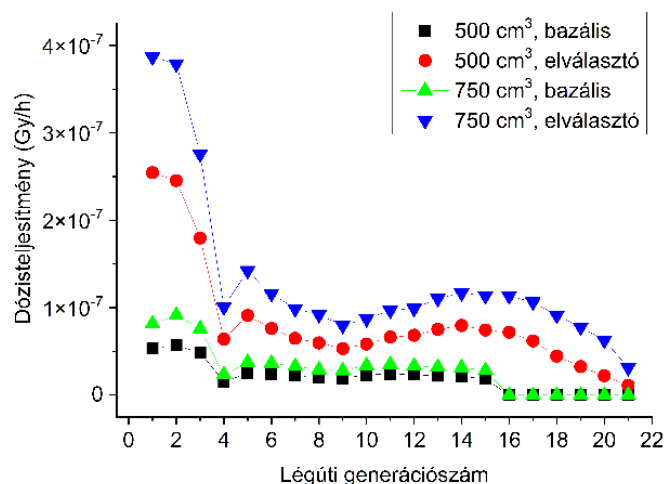
Az adott személy egyéni adottságai jelentősen befolyásolják a bazális és elválasztó sejtek magjában elnyelt energia mennyiségét. A légzési térfogat és a be- és kilégzési idő hatásának figyelembevételéért fontos a bronchiális légutak sugárterhelésének számításakor. A fokozott fizikai munka miatti rövidebb be- és kilégzési idő és nagyobb légzési térfogat például a több belélegzett radonleányelem miatt általában nagyobb dózisteljesítményekhez vezet.

A légzési térfogat hatása

A légzési térfogatnak a kiüledési sebességeken túl hatása van a légutak hosszára, átmérőjére is. Amennyiben több levegőt szívunk be, a tüdő jobban kitágul. A Sztochasztikus Tüdőmodell ezt a légutak átmérőjének és hosszának a légzési térfogat felével történő módosításával szimulálja. Nagyobb légzési térfogat esetén nagyobb utat kell tehát általában megtennie a ^{218}Po vagy a ^{214}Po által kibocsátott alfa-részecskéknek. Ez bizonyos mértékben ellensúlyozza a nagyobb belélegzett radonleányelem-szám dózisznövelő hatását.

A 3. ábrán a sugárérzékeny bazális és elválasztó sejtek magjaira vonatkozó elnyeltdózis-teljesítményeket hasonlítottuk össze azonos légzési frekvenciára (12/perc), de eltérő légzési térfogatra (750 cm^3 -re és 500 cm^3 -re).

Mint az a 3. ábrán látható, a kisebb légzési térfogat miatti szűkebb légutak nem képesek teljes mértékben kompenzálni a belélegzett kisebb számú radonleányelem dóziscsökkentő hatását. Az elnyeltdózis-teljesítmények azonos be- és kilégzési idő (2,5 s) esetén kisebbek az 500 cm^3 -es légzési térfogatra.

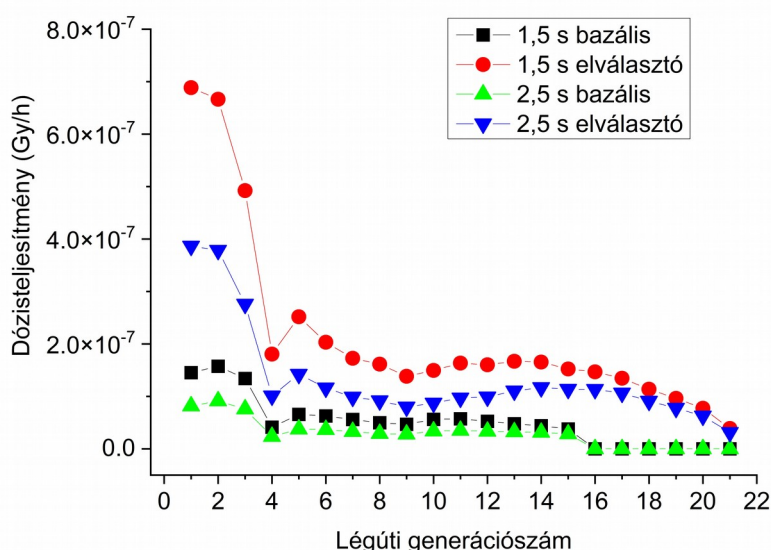


3. ábra. Az elnyeltdózis-teljesítmények légzési térfogattól (tidal volume) való függése

A be-és kilégzési idő hatása

A légzési térfogat mellett egy másik fontos paraméter, ami hatással van mind a belélegzett radonleányelemek légúti kiülepedésselőzlására, mind az azok bomlásából származó sugárterhelésre, az a be- és kilégzési idő.

Mint az a 4. ábrán látható, az elnyeltdózis-teljesítmények nagyobbak a rövidebb, 1,5 másodperces be- és kilégzési időre. Ez egyértelműen a nagyobb belélegzett levegőtérfogatnak köszönhető, hiszen a részecske kiülepedési valószínűség a bronchiális légutak többségében kisebb a rövidebb légzési idő miatt. A fokozott fizikai aktivitás (például futás) során nagyobb a légzési térfogat és rövidebb a be-és kilégzés is. E két egymást erősítő hatás – alváshoz vagy üléshez képest – jelentősen megnöveli a légutak sugárterhelését. Nem biztos, hogy egészséges tehát például alagsorban lévő, nagy radonleányelem aktivitáskoncentrációt tartalmazó levegőjű fitnesztermekben sportolni.



4.ábra: az elnyeltdózis-teljesítmények légzési frekvenciától való függése

A nyákréteg vastagságának hatása

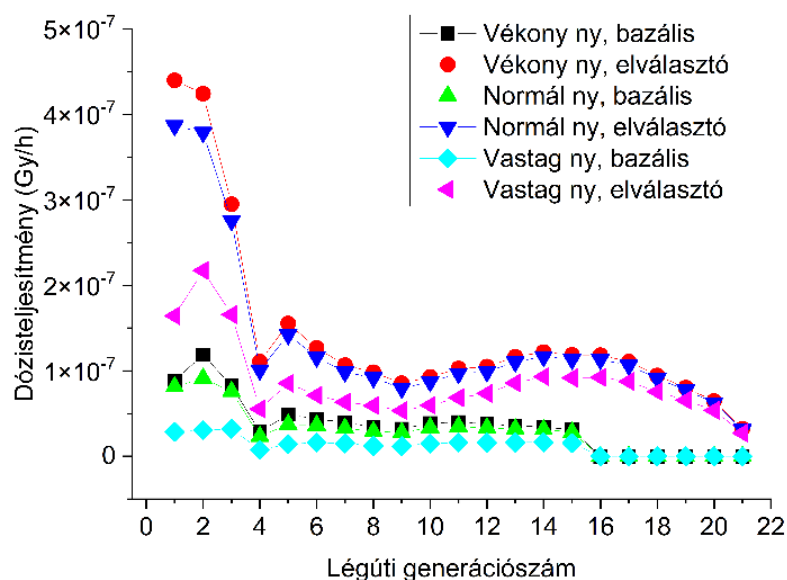
A légúti szövetben elnyelt energia mennyiségét a be- és kilégzési idő és a belélegzett levegőtérfogat mellett jelentősen befolyásolja a légutakat borító nyákréteg vastagsága is.

Ez függ a kortól, a magasságtól és az egészségi állapottól. A légutak számos környezeti tényezőre, mint a fertőzésekre, a pollenekre, vagy a dohányzás során a tüdőbe kerülő káros anyagokra fokozott nyákkiválasztással és/vagy gyulladással reagálnak, mely következtében beszűkülhetnek vagy akár el is záródhatnak a légutak. A vastag nyák forgatókönyv tehát igaz lehet egy légúti fertőzéssel küzdő emberre vagy egy nem túl súlyos asztmával küzdő betegre. A „vékony nyák” forgatókönyv olyan esetekben képzelhető el, mikor egy gyermekről vagy egy alacsony felnőttől van szó. Gyermekes esetén a nyákréteg lassabban mozog [28] és a kisebb méretű légutak miatt valószínűleg vékonyabb is. Sajnos még egészséges felnőttre is igen kevés mérési adat áll rendelkezésre, mely a légutak felszínét fedő nyákréteg vastagságát és sebességét vizsgálja, gyermekekre pedig, mivel az in vivo mérés nem kellemes, szinte lehetetlen mérési adatot találni. Gyermekes esetén tehát csupán a felnőttekre jellemző nyákvastagság magasságfüggő „leskálázása” jöhet szóba.

A nyákréteg egészséges esetben a centrális légutakban a legvastagabb. Az ICRP Human Respiratory Tract Modellje [7] 11 μm -es nyák+csilló (cilia+sol) vastagságot javasol a BB

azaz a nagy átmérőjű bronchiális légutakra, míg a bb régióra, azaz a kis átmérőjű bronchiális légutakra ez az érték már csak 6 μm -es.

„Normál” nyákvastagság esetén még a centrális légutakban is jelentős mennyiségű kibocsátott alfa-részecske tudja elérni mind a bazális, mind az elválasztó sejtek magjait. „Vastag” nyákréteg esetén azonban már sok alfa-részecske előbb veszíti el az összes energiáját, minthogy elérné a célsejteket. Ennek köszönhetően, az elnyeltdózis-teljesítmények kisebbek vastag nyákréteg esetén (5. ábra). Ez jól mutatja, hogy olyan egyének esetén, akiknek valamilyen okból, például légúti megbetegedés miatt vastagabb nyákréteg borítja a légútjait, ugyanazt a levegőt belélegezve - amennyiben ugyanaz a légzési térfogat és frekvencia, kisebb sugárterheléssel számolhatunk.



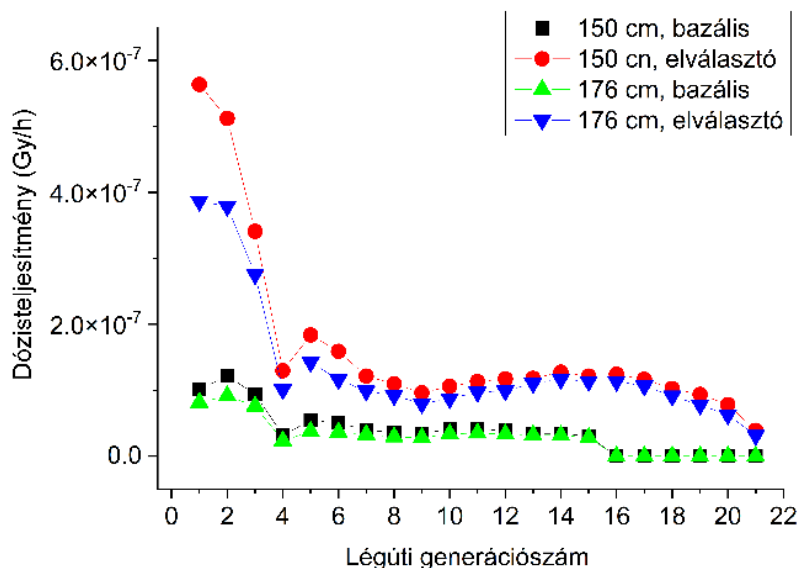
5. ábra: az elnyeltdózis-teljesítmények nyákvastagságtól való függése

A normálisnál vékonyabb nyákréteg esetén a dózisznövelő hatás nem olyan feltűnő, mint a vastag nyákréteg dóziscsökkentő hatása. Ez azzal magyarázható, hogy a normál nyákréteg már elég vékony, hogy ne okozzon jelentős energiavesztést az alfa-részecskének. További vékonyítás csupán az első három légútban okoz számottevő dózisznövelést.

A testmagasság hatása

Az adott egyén magassága, mivel ez jelentősen befolyásolja a légutak méretét, hatással van mind a kiülepedett radonleányelem-számra, mind a kibocsátott alfa-részecskék pályájára is. Alacsonyabb emberek esetén a légutak rövidebbek és szűkebbek. A kiülepedési sebességek, mint az az 2. ábra jobb oldali paneljén látható, körülbelül azonosak a 150 cm-es testmagasság esetén. A kisebb légutak miatt 150 cm-es magasság esetén nagyobb lesz azonban a bazális és elválasztó sejtek találati valószínűsége és egy kibocsátott alfa-részecskét vizsgálva átlagosan nagyobb mennyiségű energiát adnak le e részecskék a célsejtek magjaiban.

E hatások összegeként az elnyeltdózis-teljesítmények, bár ez a bazális sejtek esetén nem igazán látványos mindig, de nagyobbak 150 cm-es magasság esetére minden légúti generációban (6. ábra).



6. ábra: Az elnyeltdózis- teljesítmények magasságtól való függése

A légzési térfogat, a be- és kilégzési idő, a nyákvastagság és a testmagasság hatása a valóságban együtt, egymást erősítve vagy éppen gyengítve jelentkezik. Jó példa erre az asztma, mikor egészséges emberhez viszonyítva megnő a belélegzett levegőmennyiség, illetve összehúzódnak a légutak, mely növeli a dózist, vastagabb azonban a nyákréteg, mely csökkenti a sugárterhelést. Az, hogy ezek közül melyik hatás az erősebb, az adott egyén tulajdonságai határozzák meg. Számításaink szerint – egészséges ülő férfihez viszonyítva – asztmás egyéneknél és gyermekek esetén, a bronchiális légutak sugárterhelése nagyobb azonos kitétség esetén (pl. 40 Bq/m^3 egy órán át). A sugárvédelmi gyakorlat pontosabbá tételéhez érdemes lenne tehát a populáció nagyobb csoportjaira (pl. felnőtt-gyermek, egészséges-légúti megbetegedésben szenvedő alanyok) esetére külön-külön dóziskonverziós tényezőök bevezetésére.

ÖSSZEFOGLALÁS

A fenti összehasonlítások jól mutatják, hogy a légúti hámszövet sugárérzékeny sejtjeinek magjára vonatkozó elnyeltdózis-teljesítmények – a levegőben mérhető radonleányelem aktivitáskoncentráción túl – jelentősen függnek az adott személy egyéni adottságaitól, mint a légzési mintázat, a légutakat borító nyák vastagsága vagy a magasság.

A fokozott fizikai munka nagyobb belélegzett leányelemszámot okoz. Ez növeli a dózist. Ezzel ellentétben, a sugárterhelést csökkentő hatású az, hogy a nagyobb légzési térfogat miatt kitágulnak a légutak és a nagyobb levegősebesség miatt kevesebb a kiülepedésre rendelkezésre álló idő is. Az utóbbi két tényező (nagyobb légutak és kevesebb idő) általában nem tudják teljes mértékben ellensúlyozni a több belélegzett radonleányelem dózisznövelő hatását. Az ülés helyett végzett könnyű fizikai munka ezért számításaink szerint növeli a légutak sugárterhelését. Azonos kitétség (pl. 40 Bq/m^3 radonleányelem aktivitáskoncentráció 1 órán át) esetén tehát a vizsgált személyek egyéni légzési mintázata jelentősen befolyásolja az elnyeltdózis-teljesítményeket a légutakban.

A nyákvastagság egy további, az adott egyénre jellemző paraméter, ami jelentős mértékben befolyásolja a légutak sugárterhelését. Például a légúti megbetegedés (meghűlés, asztma stb) miatti vastagabb nyákréteg esetén jelentősen csökken az az alfa-részecskeszám,

ami eléri a célsejteket. A normálisnál vékonyabb nyákréteg csupán az első három légúti generációban okoz jelentős dózisznövekedést, hiszen a kis átmérőjű bronchiális légutakban a nyák már normál esetben is elég vékony ahhoz, hogy a ^{218}Po vagy a ^{214}Po által kibocsátott alfa-részecskék ne veszítsenek jelentős mennyiségű energiát, miközben áthaladnak rajta.

A légzési mintázat és a nyákvastagság mellett számottevően befolyásolja az elnyeltdózis-teljesítményeket a magasság is, hiszen alacsonyabb egyének esetén kisebbek a légutak, mely megnöveli a részecske kiülepedési valószínűségeket. Továbbá kisebb testmagasság esetén nagyobb a célsejtek találati valószínűsége, és ennek következtében az egy kibocsátott alfa-részecskére eső, a bazális és az elválasztó sejtek magjában elnyelt energia is több.

Az elvégzett modellszámítások bebizonyították, hogy a vizsgált személy egyéni adottságai jelentős mértékben befolyásolják a bronchiális légutak sugárterhelését. A radonleányelemek bomlásából származó sugárterhelés számításakor tehát lehetőség szerint figyelembe kell venni a légzési mintázatot, a testmagasságot, illetve az egészségi állapotot, ami hatással van a légutakat borító nyák vastagságára. Ez lehetséges lenne külön dóziskonverziós faktorok létrehozásával a populáció egyes nagyobb csoportjaira. Ehhez egyedülálló eszköz a Sztochasztikus Tüdőmodell és az ahhoz kapcsolt dozimetriai modell.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] World Health Organization (WHO) handbook on indoor radon: a public health perspective. 2009, World Health Organization, Geneva, Switzerland
- [2] Farkas Á, Balásházy I: Radon és leányelemeihez kapcsolódó dóziskonverziós tényezők számítása komplex numerikus modellek és saját fejlesztésű szoftver segítségével. 2 Sugárvédelem, VII. évf. 1. szám. 10–26. 2014.
- [3] ICRP Publication 60, Risks associated with ionising radiations, Pergamon Press, 1991.
- [4] BEIR VI Report. Health effects of exposure to radon. National Academy Press, Washington, DC. 1999.
- [5] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR): Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. Sources and effects of ionizing radiation. 2000.
- [6] ICRP Publication 103. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Annals of the ICRP 37 (2-4). Ed: J. Valentin, Elsevier, 2007.
- [7] International Commission on Radiological Protection (ICRP) Publication 66 Human respiratory tract model for radiological protection. Pergamon Press, UK; 1994.
- [8] Koblinger L, Hofmann W. Monte Carlo modelling of aerosol deposition in human lungs. Part I: Simulation of particle transport in a stochastic lung structure. J.Aerosol Sci. 21. 661–674. 1990.
- [9] Hofmann W, Koblinger. Monte Carlo modeling of aerosol deposition in human lungs. Part II: Deposition fractions and their sensitivity to parameter variations. J.Aerosol Sci. 21/5 675–688. 1990.
- [10] Hofmann W, Koblinger L. Monte Carlo modeling of aerosol deposition in human lungs. Part III: Comparison with experimental data. J.Aerosol Sci. 23/1 51–63. 1992.
- [11] Findeisen, W., Über das Absetzen kleiner in der Luft susperdierten Teilchen in der menschlichen Lunge bei der Atmung. Pflügers Archiv Ges. Physiologie 236, pp. 367-379. 1935.
- [12] Landahl, H.D., On the removal of airborne droplets by the human respiratory tract. I. The Lung. Bulletin of Mathematical Biology, 12, pp. 43-56. 1950.
- [13] Weibel, E.R. Morphometry of the Human Lung. Springer Verlag and Academic Press, Berlin, New York. 1963.

- [14] Beeckmans, J.M., Correction factor for size-selective sampling results, based on a new computer alveolar deposition curve. *Annals Occupational Hygiene*, 8, pp. 221-231. 1965.
- [15] ICRP Publications 9, Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Pergamon Press, Oxford, UK. 1966.
- [16] Marsh JW, Birchall A, Sensitivity analysis of the weighted equivalent lung dose per unit exposure from radon progeny. *Radiation Protection Dosimetry* 87: 167–178, 2007.
- [17] ICRP Publication 65, Protection against radon at home and work. *Annals of the ICRP* 23 (2),1993.
- [18] Porstendörfer J. Physical parameters and dose factors of the radon and thoron decay products. *Radiation Protection Dosimetry* 94: 365–373, 2001.
- [19] Winkler-Heil R, Hofmann W. Comparison of modelling concepts for radon progeny lung dosimetry. *Proceedings of Fifth International Conference – High Levels of Natural Radiation and Radon Areas: Radiation Dose and Health Effects*, September 2000, Munich. Elsevier, Amsterdam, pp. 169–177, 2002.
- [20] Mercer, R. R., Russell, M.L. and Crapo, J.D. Radon dosimetry based on the depth distribution of nuclei in human and rat lungs. *Health Phys* 61, 117–130. 1991.
- [21] Cheng K.H, Cheng Y.S, Yeh H.C, Guilmette R.A, Simpson S.Q, Yang Y.H, Swift D.L: In vivo measurements of nasal airway dimensions and ultrafine aerosol deposition in the human airways. *J.Aerosol Sci.* Vol.27. No. 5, pp. 785–801, 1996.
- [22] Baias P.F, Hofmann W, Winkler-Heil R, Dului O.G: Chronic smoker lung dosimetry of radon progeny. *Romanian Reports in Physics*, Vol. 61, No. 4, P. 669–675, 2009.
- [23] Cuddihy, R.G, Yeh H.C. Respiratory tract clearance of particles and substances dissociated from particles. *Inhal. Toxicol.* 169-193,1988.
- [24] Sturm R, Hofmann W. Stochastic modelling predictions for the clearance of insoluble particles from the tracheobronchial tree of the human lung. *Bulletin of Math. Biol.* 69; 395–415. 2007.
- [25] Haninger T, Size distributions of radon progeny and their influence on lung dose. In: *Radon and Thoron in the human environment. 7th Tohwa University International Symposium.* World Scientific, Singapore. 574–576. 1998.
- [26] Marsh, J. W. et al. Comparative dosimetry in homes and mines. Estimations of K-factors. In: *Proceedings Seventh International Symposium. The Natural Radiation Environment*, Amsterdam, Elsevier, 290–298. 2005.
- [27] Phalen RF, Oldham MJ, Beaucage CB, et al. Postnatal enlargement of human tracheobronchial airways and implications for particle deposition. *Anat Rec.*212:368-80. 1985.
- [28] Robert Sturm: Theoretical models of carcinogenic particle deposition and clearance in children’s lungs. *J Thorac Dis*;4(4):368-376. 2012.
- [29] BEIR VII: Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation is available from the National Academies Press, 500 Fifth Street, NW, Washington, DC 20001; 800-624-6242
- [30] ICRP Publication 121 Radiological Protection in Paediatric Diagnostic and Interventional Radiology Recommended citation ICRP, 2013.