

SUGÁRVÉDELEM

**Eötvös Loránd Fizikai Társulat
Sugárvédelmi Szakcsoportjának
On-line Folyóirata
<https://www.elftsv.hu/svonline>**

**XII. Évfolyam 1. szám
2019**

BUDAPEST

HU ISSN 2060-2391

Kiadó: az Eötvös Loránd Fizikai Társulat Sugárvédelmi Szakosztálya

Kiadásért felelős: Pesznyák Csilla, a Szakosztály elnöke

Főszerkesztő, a Szerkesztőbizottság elnöke: Vincze Árpád

Szerkesztő: Pesznyák Csilla

Technikai szerkesztő: Deme Sándor

A szerkesztőbizottság tagjai:

Antus Andrea,

Bujtás Tibor,

C. Szabó István,

Déri Zsolt,

Földi Anikó,

Katona Tünde,

Petrányi János,

Szűcs László,

Taba Gabriella

A szerkesztőség elérhetősége:

Levelezési cím: 1539 Budapest, PF. 676.

e-mail: avincze67@gmail.com

HU ISSN 2060-2391

A KIS ÉS KÖZEPES DÓZISÚ IONIZÁLÓ SUGÁRZÁS LEPKÉKRE GYAKOROLT HATÁSÁNAK VIZSGÁLATA

Nagy-Czitrovsky Blanka^{1*}, Bálint Zsolt², Szántó Péter¹, Fűri Péter¹, Madas Balázs Gergely¹, Szőcs Gábor³, Bozsik Gábor³, Lakatos Ferenc⁴, Horváth Bálint⁴, Tuba Katalin⁴, Balásházy Imre¹

¹Magyar Tudományos Akadémia Energiatudományi Kutatóközpont,
1121 Budapest, Konkoly-Thege Miklós út 29-33.

²Magyar Természettudományi Múzeum,
1088 Budapest, Baross u. 13.

³Magyar Tudományos Akadémia Agrártudományi Kutatóközpont Növényvédelmi Intézet,
1022 Budapest, Herman Ottó út 15.

⁴Soproni Egyetem, Erdőművelési és Erdővédelmi Intézet,
9400 Sopron, Bajcsy-Zsilinszky utca 4.
*czitrovsky.blanka@ymail.com

A kézirat beérkezett: 2019.01.04.

Közlésre elfogadva: 2019.04.24.

Preliminary studies of the effect of low and medium doses of ionizing radiations on butterflies and moths

After the emission of large quantity of radioactive isotopes significant changes in the wildlife of the environment have been reported in several papers. For example, increased mutation rate has been found in insects after the Chernobyl accident, or notably in lycaenid butterflies after the Fukushima nuclear disaster. To answer whether low dose ionizing radiation has a detectable effect on butterflies and moths, we have conducted various gamma-radiation trials on four lepidopterous species: Plebejus argus, Polyommatus icarus (both Lycaenidae), Ostrinia nubilalis (Crambidae: Pyralinae), and Lymantria dispar (Erebidae). Results showed that the adult lifetimes of the irradiated lycaenid butterflies decreased and females laid less eggs. Although the lifespan of the larval, pupal and adult stages of Lymantria dispar did not change in statistically significant manner when eggs had been irradiated by 1Gy gamma radiation, nevertheless slightly different tendency between the reactions of females and males could be surmised. Further investigations are inspired by the results.

Keywords: Ionizing radiation, environmental nuclear pollution, biological effects on butterflies, bioindicator

Nagy mennyiségű radioaktív izotóp kibocsátásával járó események után a környezet élővilágában a háttérállapothoz képest számos változást figyeltek meg. Ilyenek voltak például lepkék megnövekedett gyakoriságú mutációi. Annak megválaszolására, hogy a kis dózisú ionizáló sugárzásnak van-e kimutatható hatása a lepkékre különböző gamma-sugárzásos kísérleteket folytattunk négy faj bevonásával: ezüstös és Ikarusz boglárka (Lángszínérfélék), kukoricamoly (Fényiloncafélék) és gyapjaslepke (Gyapjaslepkefélék). A kísérletek eredményei alapján kijelenthető, hogy az ionizáló sugárzás hatására csökkent a boglárka imágók élettartama és valószínűsíthető a besugárzott nőstények által lerakott peteszám csökkenése is. A peteállapotban besugárzott gyapjaslepkék hernyó-, báb és imágó állapotainak élettartama nem változott szignifikáns mértékben és a változásban különbség mutatkozott a nőstények és a hímek között. Az eredmények további hasonló vizsgálatok elvégzésére inspirálnak.

Kulcsszavak: Ionizáló sugárzás, radioaktív környezetszennyezés, lepkéken biológiai hatás, bioindikátor

BEVEZETÉS

Az 1986-os csernobili és a 2011-es fukushimai nukleáris baleseteket követően a balesetek környezetének élővilágában nagyszámú változást figyeltek meg. E két jelentős radionuklid kibocsátással járó szerencsétlenség következményeit több kutató vizsgálta. A csernobili katasztrófa által szennyezett területeken készült biológiai vizsgálatok eredményeiről számos tanulmány jelent meg, például Zakharov és Kyrsanov [1], Møller és munkatársai [2–6], valamint Yablokov és munkatársai [7]. Ismereteink szerint a rovarok általában jóval kevésbé érzékenyen reagálnak az ionizáló sugárzásra, mint a gerincesek és sokkal nagyobb sugárdózist kibírnak. Møller és Mousseau [5] mégis találtak biológiai hatást olyan ízeltlábúakon, köztük rovarokon, amelyek krónikusan kaptak kis dózisú ionizáló sugárzást. Kutatásaik során a szennyezett területen megfigyelték a biodiverzitás és a biomassza csökkenését, ami a rovarok nagyarányú faj és egyedszám csökkenésének volt a következménye. Eredményeik alapján tehát kijelenthető, hogy a krónikus ionizáló sugárzás kis dózisa is jelentős hatással lehet a rovarokra. Csernobilben jelenleg a legtöbb radioizotóp a talaj legfelső rétegében, a gerinctelenek fő élőhelyén található. A lepkék petéjére, hernyójára és bábjára különösen nagy hatással lehet a talajban jelenlévő radioaktivitás, mert ezek a fejlődési alakok hosszú időn keresztül kapnak ionizáló sugárzást. E hatás kiterjedhet az egész ökoszisztéma működésére, mivel a rovarok szerepe pótolhatatlan a természetben, hiszen például a beporzás hiánya a növények diverzitásának csökkenéséhez vezet. Csernobil környékén a gerinces élőlényeken is, például fecskéken, számos eltérést felfedeztek fel a máshol élő azonos fajú egyedekhez képest [3, 8].

A különböző környezeti változásokra – mint például a páratartalom és a hőmérséklet – igen érzékenyen reagál a Boglárkaformák (*Polyommata*) alcsaládjába tartozó fajok szárnyának színe, mintázata és formája [9, 10, 11]. Érzékenységük miatt az alcsaládot képviselő fajok indikátorfajnak kiválóan alkalmasak. Egy érdekes tanulmány kimutatta, hogy Dél-Oroszországban, Kiszlovodszk területén egy szokatlan populációt találtak az alcsaládba tartozó csipkés boglárka (*Meleageria daphnis*) nevű fajnál [12]. Kiszlovodszk egy olyan ércfeldolgozó és dúsító központtól 30 km-re helyezkedik el, ahol az első szovjet atombombákhoz uránércet dolgoztak fel, valamint a csernobili katasztrófa során kibocsátott radioizotópok által fokozottan érintett területről van szó. Dantchenko és munkatársai [12] megállapították, hogy a boglárkafaj nőtényeinek 60%-a mozaikosan gүнandromorf – hímnős – jelleggel rendelkezett az 1988 és 1993 közötti vizsgálati időszakban. Ez igen magas aránynak tekinthető, hiszen a teljes – bilaterális – gүнandromorfia gyakorisága nagyon alacsony, 10^{-5} -re tehető a Földön. A mozaikos gүнandromorfia még ennél is jóval kevesebb esetben figyelhető meg a természetben [13]. Valószínűsíthető, hogy a sugárzás által kiváltott magas szintű szomatikus mutáció vagy genetikai eltérés jött létre az Y-kromoszómában, amit a legtöbb nőtény magával hordozott ebben a populációban. Laboratóriumi körülmények között sikerült már növelni rovarok esetében a hímnősség előfordulási gyakoriságát, mégpedig röntgen-sugárzással ecetmuslicában (*Drosophila*) [14]. Elvben nem kizárt, hogy nem a sugárzás okozta a gynandromorfizmus gyakoriságának növekedését, ugyanis közel hasonló fajok keresztezésével is növekedhet ezen egyébként igen ritka tulajdonság előfordulási valószínűsége [15], valamint terepen gyűjtött, hibrid zónákból származó lepkék között is találtak már erősen megnövekedett gyakoriságú mozaikosan hímnős egyedeket [16].

A Fukushima Dai-ichi atomerőműben történt 2011-es baleset során nagymennyiségű radioaktív anyag került ki a környezetbe. Itt is több tanulmány született az emelkedett szintű radioaktivitás biológiai következményeiről [9, 17, 18]. A balesetet követően a kutatók a

környezetben begyűjtött boglárkalepkéken többféle és gyakori elváltozásokat találtak és arra a következtetésre jutottak, hogy az atomerőműből származó mesterséges radionuklidok fiziológiai és genetikai károsodást okoztak a Japánban nagyon magas egyedszámú *Pseudozizeeria maha* boglárka lepkefaj számos egyedében [9]. Ezek után egy Fukushimától 1700 km-re lévő másik szigeten kísérletsorozatokat indítottak el, amelyek során kis dózisu (55 mSv, 125 mSv) besugárzást alkalmaztak mind külső, mind belső sugárterheléssel és olyan dózisintenzitással, amely a szennyezett területekre jellemző értékekhez hasonló. Így realisztikusan modellezték a katasztrófát követő környezeti folyamatokat. A belső sugárterhelés vizsgálatakor a *Pseudozizeeria maha* nagyszámú egyedét a szennyezett területekről begyűjtött táplálékkal etették [18]. Az így kapott belső sugárterhelés értékét meghatározták és számos tulajdonság változásának mértékét vizsgálták. A sugárzás hatására az egymást követő generációkban akkumulálódva jelentek meg a szabad szemmel is jól észlelhető mutációk. A zónaolvadás után 6 hónappal súlyosabb rendellenességeket figyeltek meg, mint 2 hónappal a baleset után. Az első nemzedékből származó nőtények F1 utódaiban is jelentek meg anomáliák és ezek az F2 generációban még nagyobb mértékben – 33,5%-ban – voltak jelen. Fontos továbbá megemlíteni, hogy ezeknek a deformitásoknak a mértéke csökkent a balesettől távolabb elhelyezkedő területeken. Ilyen morfológiai elváltozások voltak a kisebb szárnyméret, a deformálódott szárnyalak, a szabálytalanul kifejlődött szem, valamint a deformált tapogatók. Ezen kívül a nagyobb sugárterhelést kapott területről származó lepkeegedek mortalitási aránya is magasabb volt, mint a nem szennyezett területen élőké. Mindezek alapján felmerül a kérdés, hogy érzékenyen reagálnak-e a lepkék, vagy bizonyos lepkék, a kis dózisu ionizáló sugárzásra és alkalmasnak tekinthetők-e biodozimetria célú alkalmazásra.

ANYAG ÉS MÓDSZER

A fenti kérdések megválaszolására indított el egy kísérletsorozatot az MTA Energiatudományi Kutatóközpont és ezen eredményeket foglalja össze a tanulmány további része. A munka során négy különböző lepkefajjal történtek előzetes vizsgálatok. Az egyik faj az ezüstös boglárka (*Plebejus argus*), a másik az Ikarusz boglárka (*Polyommatus icarus*), a harmadik a kukoricamoly (*Ostrinia nubilalis*), valamint a negyedik a gyapjaslepke (*Lymantria dispar*) volt (1. táblázat). Az 1. táblázat összefoglalja a kísérletben részt vett lepkefajok besugárzás alatti fejlődési alakját, tudományos nevét, a besugárzásban alkalmazott egyedszámot, a besugárzás dózisát és a kontrollcsoport egyedszámát.

Annak érdekében, hogy egyértelműen megállapítható legyen, hogy a bekövetkezett változások az ionizáló sugárzás hatásai-e, vagy csupán a környezeti változás következményei-e, szükségszerű kontroll csoportot kialakítani – tehát olyan csoportot, amelynek egyedei nem kapnak besugárzást, de minden más életkörülmény megegyezik a besugárzott csoporttal.

A befogott boglárka példányokat mesterséges körülmények között tartottuk és igyekeztünk a természeteshez leginkább hasonló kondíciókat biztosítani számukra. A laboratóriumban természetes fényt biztosítottunk, nektárforrásaik olyan növények voltak, amelyeket a természetben is látogatnak. A boglárka fajok egyedei párosodtak, és a nőtények petét is raktak. A példányok terepi begyűjtése során a kolóniába egy kökény-farkincás (*Satyrion spini*) (Lángszinérformák: Lángszinérfélék = Lycaeninae: Lycaenidae) hím egyed is bekerült. Az egyedeket nem vettük ki a tenyésztetecéből, a besugárzott boglárkákkal együtt kezeltük. A besugárzás cézium ágyúval történt ($^{137}\text{Cs} \rightarrow 662\text{keV}$ gamma-sugárzás), akut módon, egyszeri alkalommal.

A harmadik lepkefaj, amellyel rendszeres vizsgálatokat végeztünk a kukoricamoly (*Ostrinia nubilalis*) volt, amely a trópusokon igen magas fajszaóat elérő Fényiloncafélek családjának egyik legismertebb képviselője. Hazánkban a mezőgazdasági kártételei jelentősek. Az imágók

elsősorban éjszaka aktívak, de tömeges rajzáskor nappal is repülnek. A tenyésztési kísérletek a Magyar Tudományos Akadémia Agrártudományi Kutatóközpontjának Növényvédelmi Intézetében történtek, ahol a nőstény lepkék feromon kibocsátása került elemzésre. A kukoricamoly nőstények tojócsövéből készített kivonatok feromon-tartalmának meghatározása lángionizációs detektorral ellátott gázkromatográf (6890N, Agilent Technologies, Santa Clara, CA, USA) valósult meg. A minőségi azonosítás a feromon-komponensek retenciós ideje alapján, a feromon főkomponens, a (Z)11-tetradecenil acetát (Z11-14:Ac) [19] mennyiségének kiértékelése pedig egy nőstényre vonatkoztatva (female equivalent - FE) belső szintetikus standarddal történő összehasonlítással, a megfelelő csúcs

1. táblázat: A kísérletbe vont lepkefajok besugárzási állapota, neve és rendszertani helye, a besugárzás dózisa és a mintaszámok

Besugárzási fejlődési alak, lepkefaj	Besugárzott	Kontroll
lepke, <i>Plebejus argus</i> (Lycaenidae)	8 példány 100 mGy 6 példány 250 mGy	8 példány
lepke, <i>Polyommatus icarus</i> (Lycaenidae)	2 példány 100 mGy	6 példány
báb, <i>Ostrina nubilalis</i> (Pyralidae)	20 példány 50 mGy 20 példány 475 mGy	20 példány
pete, <i>Lymantria dispar</i> (Erebidae)	324 példány 1 Gy	258 példány

alatti területek (peak area) arányának meghatározásával történt. A besugárzott bábokból kikelt nőstény lepkéket laboratóriumi körülmények között hímekkel pároztattuk, majd az életképes peték arányát az összes lerakott petékhez viszonyítva csoportonként meghatároztuk és statisztikailag összehasonlítottuk (Chi-square test with Yates correction, two tailed, P=5%).

A negyedik lepkefaj az erdészeti szempontból fontos gyapjaslepke (*Lymantria dispar*), amelynek faunaterületünkön hímjei nappal aktívak, nőstényei viszont röpkétlenek. Családjában számos erdészeti és mezőgazdasági kártevő ismert. A kísérletet a Soproni Egyetem munkatársainak közreműködésével végeztük. A magyarországi példányoktól származó petéket kezelés után laboratóriumban keltettük, majd az egyedeket elkülönítve neveltük, félszintetikus tápanyaggal.

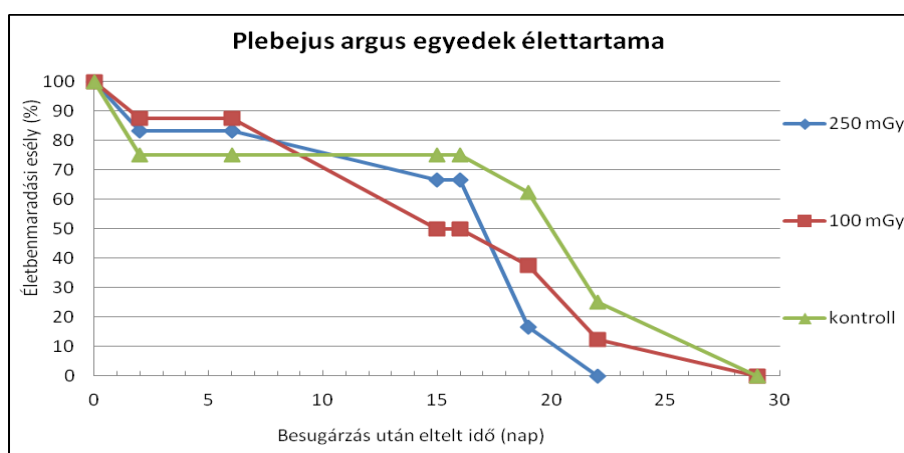
Mint az 1. táblázatból is látható, az Ikarusz boglárka, valamint az ezüstös boglárka egyedszáma nagyon alacsony, e fajok esetében a jövőben szükségszerű lesz nagyobb egyedszámmal részletes kísérleteket végezni. Vizsgálataink ezért előkísérletnek tekinthetők.

EREDMÉNYEK

Az ezüstös boglárkával végzett kísérletek során az imágókból 3 eltérő csoportot alakítottunk ki, az egyiket 100 mGy (4 nőstény és 4 hím), a másikat 250 mGy (3 nőstény és 3 hím) dózissal sugaraztuk be, a harmadik csoport (4 nőstény és 4 hím) pedig a kontroll csoport volt.

Az 1. ábrán jól látható, hogy a 250 mGy dózissal besugárzott ezüstös boglárkacsoportok túlélési gyakorisága jóval hamarabb éri el a nullát, mint a 100 mGy-vel besugárzottaké, valamint a kontroll csoporté. Mindhárom csoport közül a legnagyobb dózissal besugárzott csoportba tartozó példányok pusztultak el legelőször, pontosan egy héttel korábban a másik két csoporthoz képest. A 250 mGy-vel besugárzott lepkéknél a kísérlet első 6 napján kis mértékben, fokozatosan csökkent az életben maradtak száma. A 16-19. napok között jóval intenzívebb halálozási arány növekedés következett be. A besugárzást követő 22. napon az utolsó élő példány is elpusztult. A 100 mGy-vel besugárzott egyedek elhullása az első 6

napban a legkisebb és a 9-17. napokban a legnagyobb mértékű volt, viszont az utolsó élő egyed elhullása csak akkor következett be, amikor a kontroll csoportban lévő utolsó egyedé. A kísérlet első hat napján legnagyobb arányban a 100 mGy-vel besugárzott lepkék voltak jelen. Ezt követően egészen a 22. napig viszonylag intenzív a halálozás mértéke különösen a 19-22. napok között. Ez után az életben maradt egyedek számának csökkenése kevésbé intenzív és alacsony egyedszámban egészen a 29. napig megfigyelhetők voltak túlélő példányok. A kontroll csoportba tartozó egyedeknél a kísérlet kezdeti stádiumában (első két nap) megfigyelhető volt egy kisebb egyedszámú halálozás. Ami talán a legfontosabb információ az 1. ábrán az az, hogy a besugárzás következtében a túlélés gyakorisága a besugárzott egyedeknél a besugárzástól számított 11. naptól jelentősen kisebb volt a kontroll csoporthoz viszonyítva és a nagyobb dózis esetén meredekebben csökkent a túlélő egyedek száma. Amíg a legnagyobb dózissal besugárzott egyedek közül az utolsó is elpusztult a 22. napon, addig a másik két csoportban ez egy héttel később történt csak meg. Mivel nem minden nap történt mérés, ezért nem vízszintes és függőleges szakaszokat alkot az 1. és a 2. ábra.



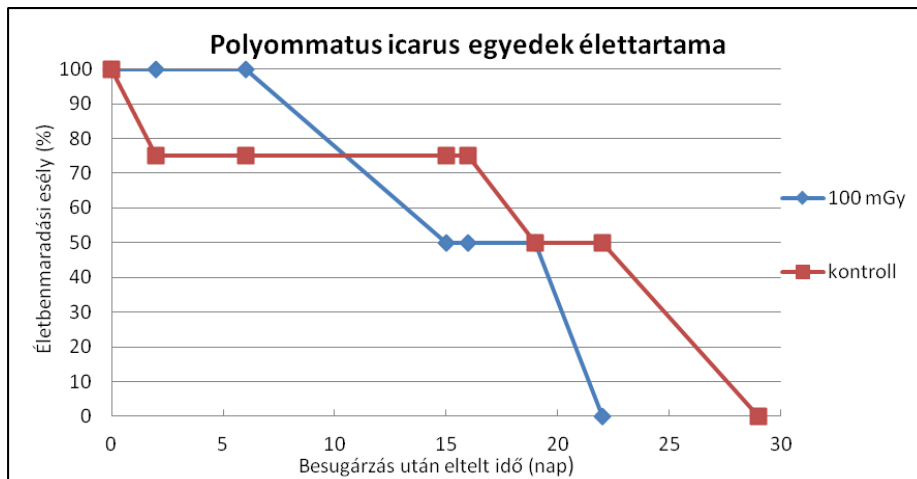
1. ábra: *Plebejus argus* besugárzott és kontroll egyedeinek élettartama

A csökkent élethossz és feltehetően a szervezet károsodása miatt, kevesebb utódot tudnak létrehozni a besugárzott nőstény egyedek, amelyet jól szemléltet, az ezüstös boglárka szaporodásával kapcsolatos következő kísérletünk is. E kísérletben párosítottuk a sugárterhelésnek kitett nőstény és hím egyedeket, illetve a kontroll csoportból a sugárzásnak ki nem tett nőstény és hím példányokat is. Eredményeink szerint a kontroll csoportba tartozó 4 nőstény lepkénél az átlagos peteszám 5,83 volt, viszont a 7 besugárzott nőstény egyednél (4 példánynál 100 mGy és 3 példánynál 250 mGy) ez a szám átlagos értéke csak 0,89 lett. Jelentős különbség mutatható tehát ki a két csoport által lerakott peteszám között. A természetben jelentős hatása lehet ennek, hiszen ez az adott faj egyedszámának drasztikus csökkenéséhez, végső soron akár az adott élőhelyről való eltűnéséhez is vezethet.

Az Ikarusz boglárka egyedeiből kevesebb állt a rendelkezésünkre, ezért ebből a fajtából csupán két csoportot alakítottunk ki. Az egyiket 100 mGy-vel sugaraztuk be, míg a másik a kontroll csoport volt. Két lepkét sugaraztunk be és 6 került a kontroll csoportba. Az alacsony besugárzott példányszám miatt ezen eredményeket csak tájékoztatásként mutatjuk be.

A 2. ábrán látható, hogy az előző kísérlethez hasonlóan, itt is előbb következett be a besugárzott egyedek elpusztulása, mint a kontroll csoportban lévőké. A kísérlet elején (az első 6 napban) a 100 mGy-vel besugárzott példányok változatlanul, maximális egyedszámban voltak jelen, majd a 6. naptól a besugárzás utáni 15. napig a felére csökkent az

egyedszám, és egészen a besugárzást követő 19. napig változatlan maradt, majd onnan meredeken csökkent az élő példányok száma, és 22. napon az utolsó besugárzott egyed is elhullott. A kontroll csoportba tartozó példányok között az első két napban csökkent egy kicsit a túlélő egyedek száma, majd attól kezdve konstans volt a 16. napig, és innen csökkent a 19. napig, amelytől a 22. napig állandó értéken állt, végül onnan a 29. napig nullára csökkent az élő egyedek száma.



2. ábra: *Polyommatus icarus* besugárzott és kontroll egyedeinek élettartama

Mind az ezüstös boglárka, mind pedig az Ikarusz boglárka esetében a kísérletbe bevont alacsony egyedszám miatt, a kapott eredmények csak jelzés értékűek.

Érdekességgként jegyezzük meg, hogy az egyetlen besugárzott kökény-farkincás egyed élettartama a kontrollcsoportéval pontosan megegyezett.

A harmadik lepkefaj, amellyel rendszeres vizsgálatokat végeztünk az a kukoricamoly. Tenyésztetben tartott friss kolóniából származó 20-20 friss bábót, 50 mGy, valamint 475,5 mGy dózisu akut gamma-besugárzásnak tettünk ki. Ugyanekkor egyedszámmal a kontroll csoport is biztosítva volt. E kísérletben a besugárzást követően a nőstény lepkék feromon kibocsátása került elemzésre a Magyar Tudományos Akadémia Agrártudományi Kutatóközpontja Növényvédelmi Intézetében (lásd az Anyag és Módszer fejezet idevágó részét). A különböző dózisu besugárzások hatására, a kontroll csoporttal összehasonlítva, csak egészen minimális mértékben változott meg a nőstény egyedekből kivonható feromon főkomponensének a mennyisége (0,8 – 1,1 ng/FE) (2. táblázat). Azon felül, hogy a változás mértéke valószínűleg a mérési hibahatáron belül mozog, az eredményekből azért sem mutatható ki egyértelmű tendencia, mivel az 50 mGy-vel besugárzott nőstények esetében 0,81 ng/FE, a 475 mGy-vel besugárzottak esetében pedig 1,06 ng/FE főkomponens mennyiség volt kimutatható, amíg a kontroll csoport esetében ehhez nagyon hasonló érték – 1,14 ng/FE. Azt, hogy még a magasabb sugáradag sem eredményezett kimutatható hatást az is alátámasztja, hogy nem találtunk szignifikáns különbséget a kontroll és a besugárzott csoportok között az életképes peték arányában sem (kontroll: 68,1%, 50mGy: 73,1%, 475mGy: 70,4 % - a kísérletben leszámolt összes peteszám: 5310 db; $\chi^2=0,023$, $df=1$, $P=0,5351$). Célszerű lenne a kísérletet valamivel nagyobb dózisu besugárzással és nagyobb egyedszámú csoporton megismételni.

A negyedik lepkefaj, a gyapjaslepke esetében az egyedszám már jóval nagyobb (582 darab pete) volt, és a besugárzott lepkék mind 1 Gy sugárdózist kaptak. Azért alkalmaztunk nagyobb dózist, mert feltételeztük, hogy minél nagyobb a dózis, annál nagyobb a biológiai

hatás, ugyanakkor a túlélés esélye még jelentősen nem csökkenhet le, ugyanis az irodalomban, e lepkefajnál sterilizációra és nem elpusztításra 50 Gy besugárzási dózist javasolnak [20]. Így az 1 Gy besugárzási dózis biológiai hatás kereséséhez nem tűnt túl nagyoknak. Nem alkalmaztunk több különböző besugárzási dózisértéket, hogy az eredmények statisztikája minél megbízhatóbb legyen. Itt pete állapotban került sor a besugárzásra. A tél

2. táblázat: *Ostrina nubilalis* feromontermelése, különböző dózissal besugárzott csoportok esetében

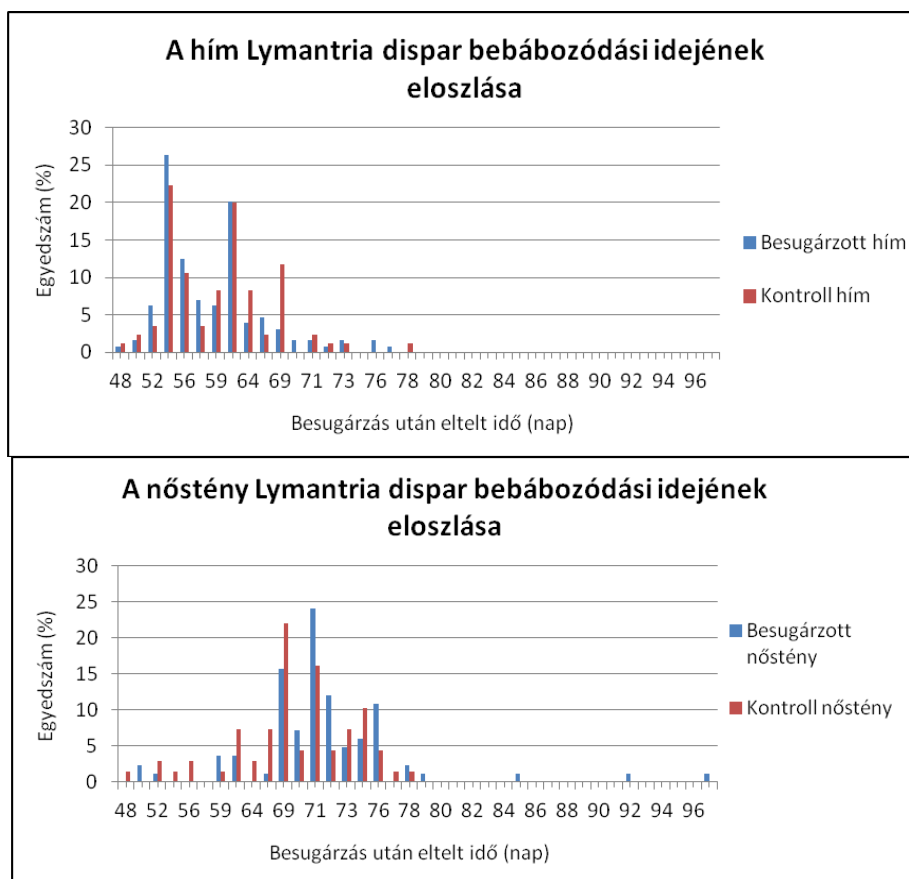
Csoport	Mennyiség Z11-14:Ac (ng/FE)
Kezeletlen kontroll	1,14
50 mGy	0,81
475,5 mGy	1,06

folyamán 7 Celsius fokon tartott petéket hagytuk szobahőmérsékleten felmelegedni, majd fél napon belül besugaraztuk azokat. Feltételeztük, hogy a besugárzás ideje alatt a peték kikelése elkezdődik, így intenzív sejtosztódás alatt történik a besugárzás. A sejtosztódás feltételezésünk szerint növeli a károsodás esélyét, ezért sugaraztuk be ilyen fázisban az állatokat. E kísérletekben főként a bebábozódás besugárzást követő időpontját és a bábállapotban töltött idő hosszát elemeztük.

A hím és a nőstény gyapjaslepke bebábozódási gyakoriság-eloszlását mutatja a 3. ábra a besugárzástól a bábozódásig eltelt idő függvényében. A besugárzott hím egyedek száma: 197, a besugárzott nőstény példányok száma: 127. A kontroll csoportba került hímek száma: 146 és a kontroll csoport nőstény lepkéinek száma: 112.

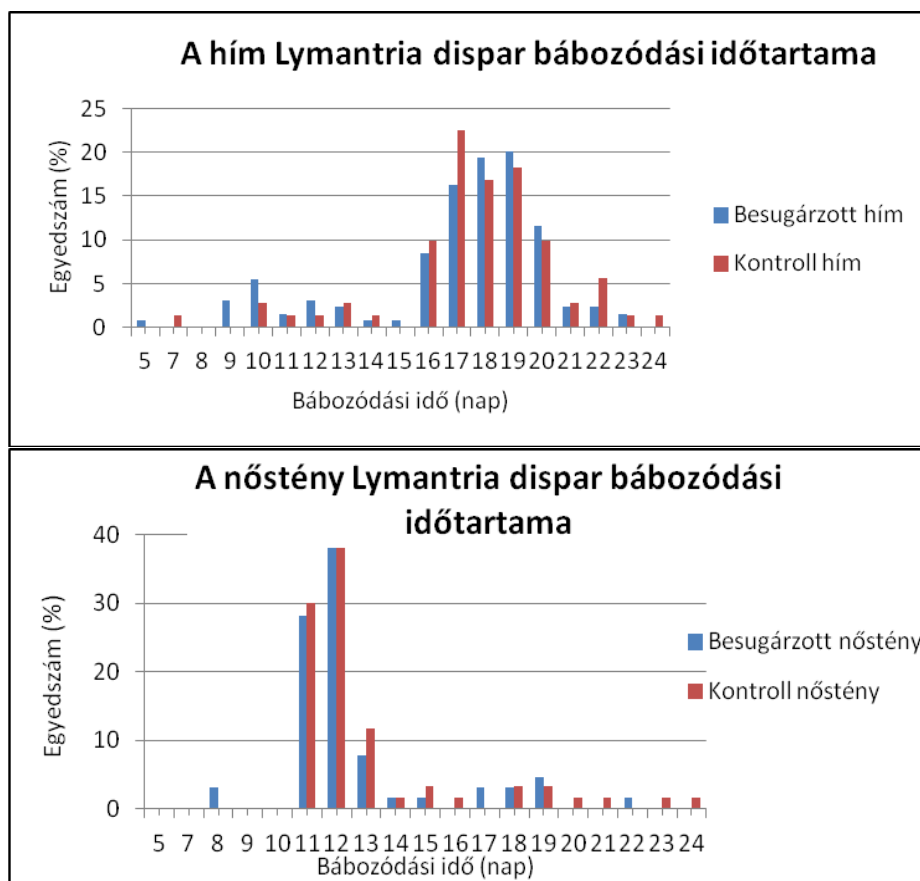
A 3. ábra felső panelja alapján megállapítható, hogy a besugarazott és a kontroll gyapjaslepke hímeknek a besugárzástól a bebábozódásáig eltelt ideje (bebábozódási ideje) között nincs jelentős különbség. Ugyanakkor megfigyelhető, hogy besugárzott hímek valamivel nagyobb arányban bábozódtak be a korábbi (52-59. nap közötti) időszakban, a kontroll csoport hímjei pedig a későbbi (64-69. napok közötti) időszakban. Az alsó panel alapján megállapítható, hogy a nőstényeknél sincs jelentős különbség a besugarazott és a kontroll egyedek bebábozódási idejének gyakoriságeloszlás értékei között, viszont itt a hímekhez képest az eloszlás nagyobb szórása figyelhető meg. Ezenkívül megállapítható, hogy a besugárzott nőstények a későbbi időpontokban (70. naptól) bábozódtak be nagyobb arányban a kontroll csoport egyedeihez viszonyítva.

A gyapjaslepkék bábozódási idő szerinti gyakoriságeloszlásai alapján egyrészt megállapítható, hogy a hím gyapjaslepkénél a besugarazott, míg a nőstényeknél a kontroll csoport tagjai bábozódnak be hamarabb, másrészt, hogy nőstényeknél a besugárzottak adatai jobban szórnak, mint a kontroll csoporté. Ezenkívül besugárzástól függetlenül, a hímek átlagosan két héttel hamarabb bábozódnak be, mint a nőstények. A hím lárvák az 5. vagy a 6. lárvastádium, míg a nőstény lárvák a 6. lárvastádium után bábozódnak be [21].



3. ábra: A hím (felső panel) és a nőstény (alsó panel) *Lymantria dispar* bábozódási gyakoriság-eloszlása a besugárzás és a bebábozódás napja közt eltelt idő függvényében a besugárzott és a kontroll egyedek esetében. (Átlagok és szórásaik: hím besugárzott: $59,3 \pm 5,9$ nap, hím kontroll: $60,3 \pm 6,1$ nap, nőstény besugárzott: $71,6 \pm 6,8$ nap, nőstény kontroll: $68,5 \pm 6,3$ nap.)

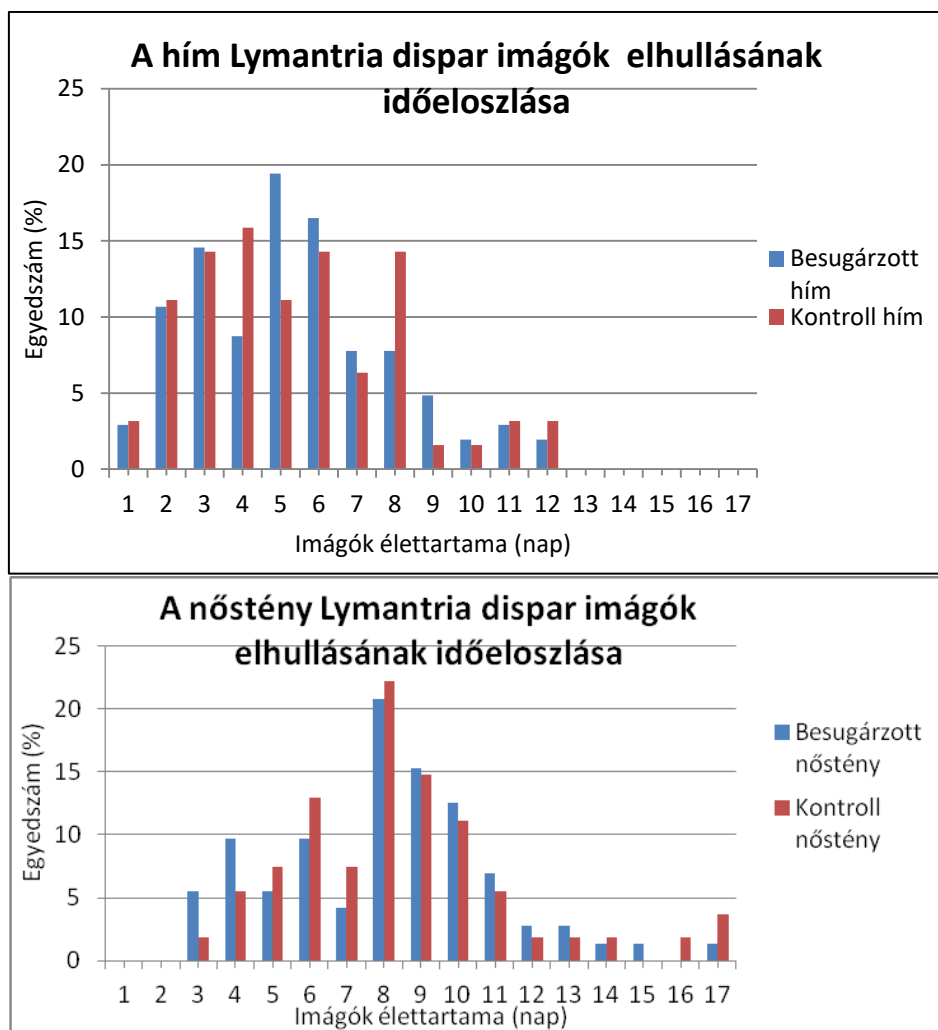
A 4. ábra a bábállapot időtartamának eloszlását mutatja hím és nőstény gyapjaslepkék besugárzott és kontroll csoportjainál.



4. ábra: A *Lymantria dispar* bábállapotának gyakoriság-eloszlása a hím (felső panel) és nőstény (alsó panel) egyedeknél a bábállapot időtartamának függvényében a besugárzott és a kontroll csoportok esetében. (Átlagok és szórásaik: hím besugárzott: $17,1 \pm 3,4$ nap, hím kontroll: $17,7 \pm 3,0$ nap, nőstény besugárzott: $12,3 \pm 2,3$ nap, nőstény kontroll: $13,1 \pm 3,1$ nap.)

A hímek bábállapotban eltöltött időtartama alapján megállapítható, hogy a besugárzott hímek a kontroll csoport hím egyedeihez viszonyítva átlagosan valamivel hamarabb kezdtek el imágóvá alakulni, azaz valamivel hamarabb keltek ki a besugárzott hím peték lepkéi. A 13-17. nap közötti időszakban a kontroll, a 18-20. nap adta időtartamban pedig újra a besugárzott csoport hím példányai keltek ki nagyobb arányban.

A nőstények bábállapotának időeloszlása meglehetősen aszimmetrikus. A kontroll csoport eloszlása a baloldalon nagyon élesen indul, mert az első érték a 11. nap, és ott máris 30% gyakorisággal kelnek ki a lepkék, azaz 11 napnál hamarabb egy kontroll nőstény sem kelt ki. Amikor viszont kikelt az első egyed, aznap rögtön kikelt az összes kontroll nőstény 30%-a. A besugárzott nőstények között néhány a 8. napon kikelt, viszont a következő nap, amikor besugárzott egyed kelt ki az a 11. nap. A nőstények 80%-a három napon belül kelt ki (11-13. napok) mind a besugárzott, mind a kontroll csoportokban. Az eloszlás jobb oldala meglehetősen széles. A leghosszabb bábállapot besugárzott nőstény esetében 22 nap, kontroll nőstény lepke esetén 24 nap időtartam. A sugárzás hatása nőstény gyapjaslepkékre, hogy a sugárzás néhány esetben lerövidíti a bábállapot idejét, míg más esetekben megnöveli azt (17 és 19 napos időtartamoknál a besugárzott gyakorisáértékek a nagyobbak).



5. ábra: A *Lymantria dispar* imágók élettartamának eloszlása hím (felső panel) és nőstény (alsó panel) egyedek esetén a besugárzott és a kontroll csoportokban. (Átlagok és szórásaik: hím besugárzott: $5,3 \pm 2,5$ nap, hím kontroll: $5,3 \pm 2,7$ nap, nőstény besugárzott: $8,1 \pm 3,0$ nap, nőstény kontroll: $8,4 \pm 3,1$ nap.)

A gyapjaslepkék lepkeállapotának (imágója) élettartam-eloszlását mutatja az 5. ábra hím és nőstény egyedek esetén a besugárzott és a kontroll csoportokban. Az egy, kettő, vagy három napig élő hím lepkék gyakorisága igen hasonló. A negyedik nap hullik el a besugárzott lepkék 9%-a és a kontroll csoporthoz tartozó lepkék 16%-a. A következő három napban a besugárzott hímek, míg a 8. napon a kontroll csoportnál hullnak el nagyobb mennyiségben (8% kontra 14%). Összességében hím egyedeknél a besugárzás hatására az imágó élettartama valamivel csökken. Nőstényeknél az eloszlás a 3. nappal kezdődik, azaz ellentétben a hímekkel, nem volt nőstény, amely csak egy vagy két napig élt volna. A csak 3 vagy 4 napot élt egyedek közt több a besugárzott, mint a kontroll példány. A nagyon hosszú életűek közt (az eloszlás jobb oldala) viszont több a kontroll csoportba tartozó lepke. Ezek arra utalnak, hogy az átlagos élettartamot nőstény lepkék (imágók) esetében a sugárzás valamennyire rövidítette. Ugyanakkor, ha kiszámítjuk az eloszlások átlagértékeit és szórásait, akkor Gauss-eloszlást feltételezve megállapítható, hogy 95%-os konfidenciaintervallum mellett nincs szignifikáns különbség a besugárzott és a kontroll egyedek bebábozódási ideje, a bábállapotuk hossza és az imágók élettartama között sem a hímek sem a nőstények esetében.

KÖVETKEZTETÉSEK

A Lángszinérféléknél (*Lycaenidae*) a kísérleteink alacsony egyedszáma miatt nem vonhatók le biztos következtetések. Az előkísérleteink azt sugallják, hogy a kis dózisú (100 és 250 mGy) sugárterhelésnek kitett ezüstös boglárka és Ikarusz boglárka imágók várható élettartama csökken, valamint hogy az ezüstös boglárka peteszám a besugárzás hatására erősen csökken. A család különböző genetikai hátterű (más rokonsági körbe tartozó) fajai esetleg másképpen reagálnak a sugárzásra. Ezt jelzi az a kökény-farkincás egyed, amely a 250 mGy besugárzásra rezisztensnek bizonyult.

A kukoricamolylal végzett kis dózisú (50 és 475 mGy) vizsgálataink során a besugárzás a bábállapot elején történt, a várható hatásokat viszont már az imágókon (a nőtény lepkéken) néztük. Nevezetesen a szaporodáshoz elengedhetetlen feromon termelését és az életképes peték arányát elemeztük. Az eredmények alapján elmondható, hogy a nőtények feromon termelésénél a besugárzás hatására a főkomponens mennyisége számottevően nem változott meg, és az életképes peték arányában sem mutatkozott egyértelmű tendencia az alkalmazott sugárdózis tartományban. Az egyes lepkefajok között jelentős különbség mutatkozhat különböző dózisú sugárterhelésnél, és nem lenne meglepő, ha későbbi vizsgálatok során kiderülne, hogy az egész világon elterjedt, agresszív kukoricamolyl az ellenállóbb fajok csoportjába tartozik.

A gyapjaslepkéknél a mérések statisztikája már megbízhatónak mondható. Itt az alkalmazott dózis 1 Gy volt, amelyet az állatok pete állapotban kaptak. A kikelt hím hernyók élettartama nagyon enyhén lerövidült a nőtényeké kicsit megnőtt, különösen néhány egyedé, így a bebábozódás ideje eloszlásának szórása is enyhén nőtt. A bábállapot ideje mind hímeknél, mind nőtényeknél igen enyhén, de csökkent. A kikelt lepkék élettartama hímeknél nagyon enyhén nőtényeknél enyhén csökkent a peték besugárzásának hatására. Azonban ezen enyhe változások az eloszlások statisztikus elemzése alapján nem tekinthetők szignifikánsnak [22].

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A munka a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alap által támogatott VKSZ_14-1-2015-0021 azonosító számú projekt keretében zajlott.

IRODALOM

- [1] Zakharov V and Krysanov E. (1996) Consequences of the Chernobyl catastrophe: environmental health. Moscow, Russia: Center for Russian Environmental Policy. p. 160.
- [2] Møller AP and Mousseau TA. (2006) Biological consequences of Chernobyl: 20 years on. *TRENDS in Ecology and Evolution* 4 (21): 200–207.
- [3] Møller AP, Mousseau TA, de Lope F and Saino N. (2007) Elevated frequency of abnormalities in barn swallows from Chernobyl. *Biology Letters* 3:414–417.
- [4] Møller AP, Mousseau TA, Lynn C, Lynnn C, Ostermiller S and Rudolfsen G. (2008) Impaired swimming behaviour and morphology of sperm from barn swallows *Hirundo rustica* in Chernobyl. *Mutation Research* 650:210–216.
- [5] Møller AP and Mousseau TA. (2009) Reduced abundance of insects and spiders linked to radiation at Chernobyl 20 years after the accident. *Biology Letters* 5 (3):356–359.
- [6] Møller AP and Mousseau TA. (2011) Conservation consequences of Chernobyl and other nuclear accidents. *Biological Conservation* 144:2787–2798.

- [7] Yablokov AV, Nesterenko VB and Nesterenko AV. (2009) Chernobyl: Consequences of the catastrophe for people and the environment. *Annals of the New York Academy of Sciences* 1181:318–326.
- [8] Mousseau TA and Møller AP. (2013) Elevated frequency of cataracts in birds from Chernobyl. *PLoS ONE*. 8:e66939.
- [9] Hiyama A, Nohara C, Kinjo S, Taira W, Gima S, Tanahara A and Otaki JM. (2012) The biological impacts of the Fukushima nuclear accident on the pale grass blue butterfly. *Scientific Reports* 2:570.
- [10] Hiyama A, Nohara C, Taira W, Kinjo S, Iwata M and Otaki JM. (2013) The Fukushima nuclear accident and the pale grass blue butterfly: evaluating biological effects of long-term low-dose exposures. *BMC Evolutionary Biology* 13:168.
- [11] Kertész KI, Piszter G, Horváth ZE, Bálint Zs and Biró LP. (2017) Changes in structural and pigmentary colours in response to cold stress in *Polyommatus icarus* butterflies. *Scientific Reports* 7 (1): 1-12.
- [12] Dantcenko A, Emmel TC and Surakov A. (1995) Nuclear pollution and gynandromorphic butterflies in southern Russia. *Holarctic Lepidoptera* 2(2): 77-79.
- [13] Robinson R. (1971) *Lepidoptera genetics*. Pergamon Press, Oxford. 687.
- [14] Patterson JT. (1933) The Mechanism of Mosaic Formation in *Drosophila*. *Genetics* 18, 1, 32–52.
- [15] Blanchard R and Descimon H. (1988) Hybridization between two species of swallowtails, meiosis mechanism, and the genesis of gynandromorphs. *Journal of Lepidopterists' Society* 42:94–102.
- [16] Scriber, JM, Mercader RJ, Romack H and Deering MD. (2009) Not all bilateral gynandromorph butterflies are interspecific hybrids: new *Papilio* specimens from field populations. *Journal of the Lepidopterists' Society* 63:37–47.
- [17] [Mousseau TA](#) and [Møller AP](#). (2014) Genetic and ecological studies of animals in Chernobyl and Fukushima. The [Journal of Heredity](#) 2014 Sep-Oct; 105(5):704-9.
- [18] Taira W, Nohara C, Hiyama A and Otaki JM. (2014) Fukushima's biological impacts: the case of the pale grass blue butterfly. The [Journal of Heredity](#) 105:710–22.
- [19] Kochansky J, Cardé RT, Liebherr J and Poelofs WL. (1975) Sex pheromone of the European corn borer, *Ostrinia nubilalis* (Pyralidae), in New York. *J. Chemical Ecology* 14: 1359-1366.
- [20] Zúbrik M and Novotný J. (2009) Impact of gamma radiation on the developmental characteristics of the gypsy moth, *Lymantria dispar* (Lepidoptera: Lymantriidae) preparatory to their use as supplemental hosts/prey for natural enemy enhancement. *Biocontrol Science and Technology* 1 (19): 291-301.
- [21] Markóné Nagy K. (2013) A gyapjaslepke (*Lymantria dispar* L.) tömegszaporodásának (2003-2006) elemzése, valamint táplálkozásbiológiai vizsgálatok gyapjaslepkével és apácalepkével (*Lymantria monacha* L.). Doktori (Phd) Értekezés, Nyugat-magyarországi Egyetem Sopron, 2013.
- [22] Czitrovsky BM. (2016) A kis és közepes dózisú ionizáló sugárzás lepkékre gyakorolt hatásának vizsgálata. MSc diplomamunka. Sopron 2016. Nyugat-Magyarországi Egyetem, Erdőmérnöki Kar, Erdőművelési és Erdővédelmi Intézet, Erdővédelem Tanszék.

A BME NTI OKTATÓREAKTOR 2016/2017-ES IDŐSZAKOS BIZTONSÁGI FELÜLVIZSGÁLATÁNAK SUGÁRVÉDELMI KÖTETE

Osváth Szabolcs^{*1}, Pesznyák Csilla², Cservenák Ildikó², Bobos Csaba², Paitz Gábor²,
Tormási Attila², Czifrus Szabolcs²

¹Országos Közegészségügyi Intézet (OKI), Közegészségügyi Igazgatóság, Sugárbiológiai és
Sugáregészségügyi Főosztály (OSSKI), Lakossági és Környezeti Sugár-egészségügyi Osztály, 1221
Budapest, Anna utca 5.

²Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem (BME), Nukleáris Technikai Intézet (NTI), 1111
Budapest, Műegyetem rakpart 9., R/315.

* osvath.szabolcs@osski.hu

A kézirat beérkezett: 2018.01.19.

Közlésre elfogadva: 2019.06.03.

Title and Abstract – Health Physics chapter of the 2016/2017 Periodic Safety Review of the Training Reactor of Budapest University of Technology and Economic, Institute of Nuclear Techniques

The BME NTI performed the 3rd Periodic Safety Review of its Training Reactor in the summer of 2016. The whole health physics system was investigated. As an administrative measure, the safety regulations of the facility were reviewed and intercompared to the regulations, laws and the official instructions of the Hungarian Atomic Energy Authority. From the technical aspect, the radiation sources, protective equipment and the instrumentation were inspected. An important conclusion of our present review is that the protection of workers, the public and the environment are ensured. Some actions related to the improvement of safety were formulated.

Keywords: Training Reactor, Periodic Safety Review

Kivonat – A BME NTI 2016 nyarán végezte el a BME Oktatóreaktor harmadik Időszakos Biztonsági Felülvizsgálatát. Ennek keretében a teljes sugárvédelmi rendszert is áttekintették. Adminisztratív oldalon összehasonlítottuk a szabályzatokat a jogszabályokkal és hatósági rendelkezésekkel. Műszaki oldalon áttekintették a sugárterhelés forrásait, továbbá a rendelkezésre álló védőeszközöket és műszereket. Az elemzések alapján megállapítható, hogy az Oktatóreaktor munkavállalóinak, a lakosságnak és a környezetnek a sugárvédelme biztosított, de ezzel összhangban szükség volt néhány javító intézkedésre.

Kulcsszavak: Oktatóreaktor, Időszakos Biztonsági Felülvizsgálat (IBF)

BEVEZETŐ

Történeti előzmények

A BME Oktatóreaktort (eredeti nevén Tanreaktort) 1971-ben helyezték üzembe, és abban az évben május 20-án vált először kritikussá. Engedélyezett termikus teljesítménye 10 kW volt, amely az 1979-es átalakítások (irányítórendszer, aktív zóna elrendezése) után 100 kW-ra emelkedett.

Az 1996-ban elvégzett első Időszakos Biztonsági Felülvizsgálat (IBF) volt az Oktatóreaktor történetében az első szisztematikus, és átfogó biztonsági elemzés, amely ugyanakkor megfelelt már a jelen tudásunk szerint is korszerűnek számító szabályozási környezet (magyar jogszabályok, NAÜ útmutatók stb.) követelményeinek. 2006-ban elkészült egy újabb IBF, és azzal párhuzamosan a Végleges Biztonsági Jelentés.

Az Oktatóreaktor hatályos üzemeltetési engedélye 2017-ben járt le. Megújítása érdekében a BME NTI 2016 év folyamán a hatályos OAH Útmutató [1] alapján elvégezte az Oktatóreaktor

harmadik IBF-ét. Munkánkban ismertetjük az Oktatóreaktorban folyó tevékenységeket, illetve az IBF célját, és ezen belül a dolgozók és a lakosság sugárvédelmével, valamint a környezeti sugárterheléssel foglalkozó kötetét.

Az Oktatóreaktor feladatai és jellegzetességei

A BME Oktatóreaktor fő feladata a nukleáris szakemberek képzése és továbbképzése, a reaktor üzeme elsődlegesen ehhez igazodik. Az oktatás mellett kutató–fejlesztő munka is folyik az NTI-ben, bizonyos esetekben (pl. neutronaktivációs analízis, neutronzaj-mérések stb.) ez is reaktorüzemet igényel.

A BME hallgatói közül elsősorban Fizika BSc, Nukleáris technika illetve Orvosi fizika szakirányos Fizikus MSc, Atomenergetika szakirányos Energetika BSc és Energetikus MSc hallgatóknak vannak laborgyakorlatok az Oktatóreaktorban; de Környezetmérnök BSc, a Rendszertechnika szakirányon belül Nukleáris mellékszakirányos Villamosmérnök MSc, továbbá Reaktortechnika szakirányú másoddiplomás (szakmérnök) hallgatók is végeznek itt méréseket. Ezen túlmenően meg kell említeni a tudományos diákköri, szakdolgozati és diplomamunkákat, továbbá az Oktatóreaktort meglátogató évente mintegy 1500 körüli érdeklődőt (elsősorban középiskolásokat).

A BME NTI – elsősorban az Oktatóreaktornak, illetve az ott végezhető mag-, neutron- és reaktorfizikai mérési gyakorlatoknak köszönhetően – az utóbbi évek során egyre nagyobb mértékben kapcsolódott be a nemzetközi oktatásba. Fontosabb külföldi partnerek: a Pozsonyi, a Prágai, a Bécsi és a Vietnami Műszaki Egyetem, az École des Mines de Nantes, a Göteborg-i Chalmers Egyetem, a TU Delft, a Duisburg–Essen-i Egyetem és a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség.

Várható, hogy a BME NTI képzési feladatai mind hazai, mind nemzetközi vonatkozásban jelentősen bővülni fognak. A hazai nukleáris szakemberek képzése a Paksi Atomerőmű üzemidejének hosszabbítása, illetve kapacitásának fenntartása miatt kiemelt fontossággal bír.

Az eddigiekben vázolt oktatási feladatok elvégzését a reaktor flexibilitása teszi lehetővé: a (termikus) teljesítmény 0 és 100 kW között tetszés szerint változtatható, a kívánt teljesítményérték eléréséhez rövid idő (10-15 perc) elegendő. A kis teljesítményből és a rövid (átlagosan napi néhány óra) üzemidőből következik, hogy:

- a reaktor fűtőelemeinek kiégése igen csekély marad hosszú időn keresztül történő üzemeltetéskor is,
- nincsenek magas követelmények a reaktor hűtőrendszerével szemben (nominális teljesítményen történő 8 órás üzemelést követő nukleáris leállás után a reaktortartályban lévő víz természetes cirkulációja elegendő a fűtőelemek hűtéséhez),
- a reaktorblokk tetején még a nyitott vízfelszín ellenére is viszonylag kicsi a dózisteljesítmény, ezért lehetséges a kísérleti eszközökkel történő manipuláció.

A reaktor felhasználását csőposta, függőleges és vízszintes besugárzó csatornák, továbbá besugárzó alagút segítik. Az épületben nyitott radioaktív anyagok felhasználását lehetővé tevő laboratóriumi helyiségek és mérőszobák is találhatók.

Az IBF célja

Az IBF célja a reaktorok biztonságának értékelése (figyelembe véve az üzemi tapasztalatokat és a biztonsággal kapcsolatos ismereteket), valamint a feltárt hiányosságok megszüntetésére irányuló adminisztratív és műszaki jellegű javítóintézkedések meghozatala.

Az Oktatóreaktor üzemeltetési engedélyének meghosszabbíttatásához szükséges az aktuális jogszabályoknak [2] való megfelelés bizonyítása.

Az IBF jogi háttere

Az IBF jogi alapját az 1996. évi CXVI. tv. az atomenergiáról képezi. Ennek 9. § (3) bekezdése alapján az IBF - „Az engedélyesnek és az atomenergia-felügyeleti szervnek a nukleáris létesítmények nukleáris biztonságát, a nukleáris biztonsági követelmények teljesítését, a kockázat mértékét az üzemeltetési engedély hatályba lépését követően a teljes üzemidő alatt (...) Időszakos Biztonsági Felülvizsgálat keretében – figyelembe véve az üzemi tapasztalatokat és a biztonsággal kapcsolatos új ismereteket – rendszeres időközönként teljes körűen elemeznie, értékelnie kell.”

A módszertani rendelkezéseket a 118/2011. Kormányrendelet tartalmazza [2]. Az IBF végrehajtásának módját a 34. § írja le; a követelményeket az 1. melléklet ismerteti, ami a Nukleáris Biztonsági Szabályzatok 1. kötete „Nukleáris létesítmények nukleáris biztonsági hatósági eljárásai” címmel.

Az IBF felépítése

Az OAH Útmutatónak [1] megfelelően az IBF az alábbi kötetekből áll:

- A. kötet: A jelentés készítését megalapozó dokumentum
- 0. kötet: A Főkötet
- 1. kötet: A telephelyi jellemzők, külső veszélyeztető tényezők
- 2. kötet: A nukleáris létesítmény Végleges Biztonsági Jelentésben dokumentált terve, a rendszerek és rendszerelemek aktuális állapota
- 3. kötet: Berendezés-minősítés
- 4. kötet: Öregedéskezelés
- 5. kötet: Biztonsági elemzések
- 6. kötet: Veszélyeztető tényezők elemzése
- 7. kötet: A nukleáris létesítmény biztonsági mutatói
- 8. kötet: Külső és belső tapasztalatok, új tudományos eredmények értékelése és visszacsatolása
- 9. kötet: Szervezet, emberi tényező, irányítási rendszer és biztonsági kultúra
- 10. kötet: Eljárások
- 11. kötet: Balesetkezelés
- 12. kötet: A dolgozók és a lakosság sugárvédelme, valamint a környezet sugárterhelése
- 13. kötet: Leszerelés
- 14. kötet: Kísérleti berendezések
- GY. kötet: Az IBF során végzett mérések, próbák jegyzőkönyvei - Gyűjtő kötet

Az IBF összeállításával párhuzamosan zajlott az Oktatóreaktor épületének felújítása, továbbá számos berendezés (a SVER - sugárvédelmi ellenőrző rendszer, aminek engedélyezése folyamatban van) és eszköz (pl. a bórsavas oldatot tartalmazó árnyékoló kádak) cseréje.

A sugárvédelmi kötet elkészítése során kísérletet, mérést nem kellett végeznünk, elegendő volt a meglévő dokumentumokat figyelembe venni, illetve elemezni, mivel a BME NTI rendelkezik ISO 9001-es minőségirányítási, továbbá ISO 14001-es környezetközpontú irányítási rendszerrel, ezért minden tevékenységét körültekintően dokumentálja, 2012-ben (hatósági rendelkezésre) teljes körű környezetvédelmi felülvizsgálatot végeztetett el, továbbá annak lezárásaként 2013-ban környezetvédelmi engedélyt kapott.

A 12. kötet (A dolgozók és a lakosság sugárvédelme, valamint a környezet sugárterhelése)

A 12. kötetnek az OAH Útmutató [1] alapján a következő témákat kell tartalmaznia:

- 12.1. A dolgozók és a lakosság sugárvédelme
 - 12.1.1. A dolgozókra vonatkozó dozimetriai szabályok
 - 12.1.2. A lakosság sugárvédelme
- 12.2. A környezet sugárterhelése
- 12.3. Összefoglalás

A DOLGOZÓK SUGÁRVÉDELME

A szabályozási rendszer

Nukleáris létesítmény esetében a 487/2015. Korm. rendelet [3] (a korábbi, 16/2000. EüM rendelethez [4] hasonlóan) lehetőséget ad arra, hogy a sugárvédelmi szabályok egy része ne a Munkahelyi Sugárvédelmi Szabályzatban (MSSz), hanem más helyi szabályzatokban (pl. Képzési Szabályzat, Hulladékkezelési Szabályzat) szerepeljen, így számos szabályzat tartalmaz a sugárvédelemhez kapcsolódó rendelkezést, elsősorban azért, hogy az egyes szabályzatok tematikusan egységesek és kezelhető terjedelműek legyenek.

A sugárvédelmi szabályok jelentős része az MSSz-ben található, ezt a dokumentumot NTI-SZ-16 Sugárvédelmi Szabályzatként tartanak nyilván, amit rendszeresen frissíteni kell a jogszabályi változásoknak megfelelően. Az előző IBF még a 16/2000. EüM rendelet alapján készült, így az új IBF egyik fontos feladata volt a hatályos jogszabályok (487/2015) bevezetése. A jogszabályi változások elemzését követően elkészült a Sugárvédelmi Leírás, majd az MSSz módosításával megszűntek a hiányosságok.

A 487/2015. Korm. rendelet 22. § (5) c) pontját “Az engedélyes felelőssége kiterjed minden ellenőrzött területen végzett tevékenység esetében a személyi dozimetriai adatok helyszíni leolvasására,...”) nem egyszerű átültetni a napi gyakorlatba. A rendelkezés természetesen teljesíthető az elektronikus személyi dózismérők rendszeres hitelesítésével és viselésük kötelezővé tételével. Ugyanakkor az eddigi üzemeltetési tapasztalatok alapján a munkanaponként elszenvedett dózisok (1–2 μ Sv naponta) a háttér nagyságrendjébe esnek (akkor is, ha a reaktor egész nap 100 kW-on üzemel), ebben érdemi változás nem várható. Sugárterheléssel járó, kísérletiengedély-köteles tevékenységhez, továbbá a reaktor üzemeltetéséhez most is minden érintett a kísérlet jellegéhez (β , γ vagy n) megfelelő elektronikus dózismérőt kap. A mostani SVER-t felváltó új, jelenleg engedélyezés alatt álló területi dozimetriai rendszer hiteles műszerei folyamatosan tájékoztatást adnak majd az épületben mérhető dózisteljesítményekről, nem csak a reaktor vezérlőjében, hanem minden egyes mérési pontnál is, és az adatok az archívumból utólag is visszakereshetők lesznek.

Sugárforrások

Az Oktatóreaktorban – a változatos oktatási és kutatási feladatok céljainak megfelelően – többféle sugárforrás található. Minden sugárforrás naprakészen szerepel a Rádium programban, leltározásuk rendszeresen, dokumentáltan megtörténik. Ugyanakkor hiányosság, hogy számos sugárforrásnak esedékes a zártságvizsgálata, illetve lejárt már a szolgálati ideje. Ezek újra tokoztatását vagy selejtezését javító intézkedésként előirányoztuk, valamint az Országos Atomenergia Hivatal előírta, mind javító intézkedést, hogy a Ki kell dolgozni a lejárt szolgálati idejű sugárforrások kezelésére vonatkozó eljárásrendet.

Volt korábban az Oktatóreaktorban jó néhány olyan sugárforrás, amely hiányos dokumentációval (vagy a nélkül) került oda (például a BME felszámolt izotóplaboratóriumaiából). Ezek papírjait (műbizonylatok, hatósági bizonyítványok) azóta – komoly erőfeszítések árán – sikerült pótolni. Temetésük költségeire azonban nincsen fedezet.

Az Oktatóreaktorban csekély mennyiségű (évente néhány 200 l-es zsáknyi) kis aktivitású radioaktív hulladék is keletkezik, jellemzően a reaktorfedélen vagy az izotóplaboratóriumban végzett munka során szennyeződő gumikesztyűk, papír törölkendők és hasonlók. Ezek (a zsák megtelte után) azonosítóval ellátva a radioaktív hulladékok tárolójába kerülnek, a bennük lévő radioaktivitást a dozimetrikusok általában gamma-spektrometria segítségével becsülik, és bevezetik a Ráhel programba.

Védekezés a külső és belső sugárterhelés ellen

Komolyabb sugárterhelés kockázatával járó tevékenység (pl. a reaktorral, a besugárzó alagúttal, a besugárzó csatornákkal, nagyobb aktivitású sugárforrással végzett kísérlet) csak kísérleti engedély alapján végezhető. Ebben a vezető dozimetrikus sugárvédelmi előírásokat tehet, melyek betartását a kísérletnél jelen lévő dozimetrikus ellenőrzi.

A reaktor neutron- és gamma-sugárzását a betonból és baritbetonból álló reaktortömb (radiális irányban), továbbá a primer víz (az aktív zóna fölött) árnyékolja. A sugaras munkahelyeken szokásos mobil sugárárnyékoló vérték (ólomtéglák, betontömbök, paraffin téglák) megfelelő mennyiségben megtalálhatóak az Oktatóreaktorban is, de időszerű lenne az ólomtéglák újrafestése.

Üzemelő atomreaktorok egyik jellegzetessége a neutronsugárzás. Ennek árnyékolására az Oktatóreaktorban néhány tucat bórsavas paraffintömb is rendelkezésre áll, ám ezek (méretük alapján) inkább csak izotópos neutronforrással végzett, esetleg kisebb csatornakísérletekhez használhatók. Komolyabb nyalábkísérletekhez, alagútnyitáshoz a bórsavoldattal töltött tartályokat lehet használni. Ezek némelyikéből szivárgott a bórsavoldat; javításuk megtörtént.

Minden személy, aki az Oktatóreaktor ellenőrzött területére belép, felületi szennyeződésének megelőzésére köteles cipővédőt és meghatározott színű köpenyt viselni: a dolgozók fehéret, a hallgatók és látogatók zöldet, a szerelők és karbantartók barnát (ők ez alól felmentést kaphatnak, amennyiben a köpeny érdemben nehezítené a munkájukat). Ez a színkódos rendszer megkönnyíti a viselő személyek azonosítását, ami pl. veszélyhelyzetben, az épület kiürítéskor lényeges szempont. Általánosan használt védőeszköz továbbá a (latex- illetve gumi-) kesztyű, ezen túlmenően szájmasc, plexi szemüveg, cérnakesztyű, Tyvek ruha, gumicsizma is rendelkezésre állnak.

A belső sugárterhelés kockázatának minimalizálása az izotóplaboratóriumokban szokásos szabályok (evés, ivás, dohányzás, rágógumizás stb. tilalma) betartásával, illetve az elszívófülkék alkalmazásával történik, ha véletlenül mégis radioaktív szennyezés történne, az izotóplaboratóriumok számára előírt dekontamináló felszerelés rendelkezésre áll. A dekontamináló felszerelés az OSSKI (Országos „Frédéric Joliot-Curie” Sugárbiológiai és Sugáregészségügyi Kutató Intézet) 2006-ban kiadott Módszertani útmutatójában [8] megfogalmazott „Minimális sugármentesítő készlet”-ét, valamint még a reaktor jellegéhez illeszkedő egyéb felszereléseket tartalmaz (szájmasc, védőszemüveg stb.).

Ki kell dolgozni és be kell vezetni a szabályzatokba a többletdózissal járó balesetek kezelésekor szükséges teendőket.

Sugárvédelmi műszerek, személyi dózisok

Az Oktatóreaktor sugárvédelmi műszerparkja igen gazdag és változatos. Ez elsősorban az oktatási feladatoknak köszönhető, hiszen csak így biztosítható, hogy a hallgatók sokféle mérőberendezéssel ismerkedhessenek meg. Demonstrációs célra például Polon típusú GM-csőves felületiszennyezettség-mérők is üzemben vannak még.

A műszerpark folyamatosan újul meg, ilyen beszerzések voltak az utóbbi években:

- MGPI DMC 2000S személyi gamma-dózismérők,

- Thermo EPD Mk2.5 személyi béta és röntgen-dózismérők,
- MGPI DMC 2000GN személyi gamma- és neutron-dózismérők,
- Thermo EPD N2 személyi gamma- és neutron-dózismérők,
- Thermo RadEye G10 kézi gamma-dózisteljesítmény-mérők,
- Thermo RadEye AB100 felületi radioaktívszennyezettség-mérő,
- Thermo FHT 762 hordozható neutron detektor,
- Thermo FHT 752 hordozható neutron detektor,
- Thermo RIIDEye M-G nuklid azonosító készülék
- Thermo EPD Mk2+ személyi gamma dózismérő
- BNS-94PH hibrid személyi sugárkapu
- Radom 3A radonmérő berendezés

A dozimetrikusok ügyelnek arra, hogy sugárvédelmi intézkedést (pl. kísérletiengedély-köteles tevékenység, illetve karbantartás sugárvédelmi felügyelete, sugárvédelmi kordonozás 20 $\mu\text{Sv/h}$ -nál) hiteles műszerrel (pl. Thermo FH40-G10 kézi gamma-dózisteljesítmény-mérők, Thermo FHT-752 és Thermo FHT-762 neutron-dózisteljesítmény-mérő, Thermo RadEye AB100 felületiszennyezettség-mérő) végzett mérés alapján hozzanak.

Az ellenőrzött és felügyelt terület határán álló sugárkapu egyedi gyártmány, nem hitelesíthető. A gondos kezelésnek és felügyeletnek köszönhetően még üzemel, de a cseréjére is fel kellett készülni. Ezért szereztünk be egy Gamma BNS-94PH hibrid személyi sugárkaput, amely alkalomadtán kiválthatja a régi sugárkaput (addig próbaüzemben a radiokémiai laboratórium ajtajában teljesít szolgálatot).

A területi dozimetriai rendszer (SVER) az utóbbi időben több fejlesztésen esett át, pl. új adatgyűjtő és megjelenítő szoftvert kapott, melynek segítségével a mért adatok utólag visszakereshetőek. Ennek ellenére a mérőrendszer elavult (GM-csőveinek a pótlása nehezen megoldható), üzemeltetése csak fokozott felügyelettel lehetséges. Az új SVER rendszer telepítése megtörtént, engedélyeztetése jelenleg folyamatban van.

A BME NTI azon munkatársai, akik az Oktatóreaktor ellenőrzött területén dolgoznak sugárvédelmi szempontból 'A' besorolásúak, külső sugárterhelésük monitorozása céljából hatósági, valamint elektronikus dózismérőt viselnek. A belső sugárterhelés ellenőrzése úgy történik, hogy a nyitott radioaktív anyagokkal végzett munkák előtt a dozimetrikusok az OSSKI által javasolt algoritmus [5] szerint megbecsülik az inkorporációs dózist; majd – ha annak alapján szükséges – intézkednek további vizsgálat (pl. egészségtesztzámlálás, vizeletanalízis) megrendeléséről. A Sugárvédelmi Naplók és a személyi dózissal kapcsolatos feljegyzések szerint az utóbbi évtizedben dóziskorlát túllépésére nem került sor.

A LAKOSSÁG SUGÁRVÉDELME

A 2012. évi teljes körű környezetvédelmi felülvizsgálat [6] a következőket állapította meg:

- „az Oktatóreaktor minden üzemállapotában semleges környezeti hatása,
- a lakosság sugárterhelése mind normál üzemben, mind a legsúlyosabb üzemzavar esetén a normál üzemre megállapított dózishatárérték alatt marad,
- a sugárterhelések alapján becsülhető egészségkárosító kockázat mértéke kimutathatatlanul kicsi.

Mindezek alapján leszögezhetjük, hogy a környezet, illetve a lakosság egészségének védelmére a jogszabályokban meghatározott engedélyezési és ellenőrzési előírások betartásán és betartatásán kívül más intézkedések nem szükségesek.”

Mivel a felülvizsgálat bemenő adataiban érdemi változás a tanulmány elkészítése óta nem történt, a következtetés most is érvényes.

Az Oktatóreaktor évente nagyjából 1200 látogatót és 200 egyetemi hallgatót fogad, akik jelentős részben szintén a lakossági kategóriába tartoznak. Őket belépésükkor a reaktor személyzete tájékoztatja a rájuk vonatkozó szabályokról, és azok betartását folyamatosan ellenőrzi. Belső sugárterhelés kockázatával járó helyre (pl. izotóplaboratóriumba) látogató nem léphet be. Külső sugárterhelésük a csoport egyik tagjára bízott elektronikus gamma-dózisteljesítmény-mérő alapján becsülhető.

Az Oktatóreaktorban rendszeresen laborgyakorlatot, szakdolgozati munkát végző egyetemi hallgatók esetében az eddig elmondottak minden félévben kiegészülnek egy részletesebb balesetvédelmi oktatással. Az MSSz előírja, hogy az Oktatóreaktorban csak bővített sugárvédelmi vizsgával rendelkező demonstrátor tarthat laborgyakorlatot. A hallgatók mindegyike elektronikus gamma-dózismérőt visel; a tevékenységükhöz szükséges egyéni védőeszközök (pl. latex kesztyű, védőszemüveg) is biztosítottak számukra.

A KÖRNYEZET SUGÁRTERHELÉSE

A kibocsátási határértékek

Az Oktatóreaktor dózismegszorítását a kritikus lakossági csoportra az Állami Népegészségügyi és Tisztiorvosi Szolgálat Országos Tisztifőorvosi Hivatala 2000 őszén $50 \mu\text{Sv}/\text{év}$ értékben állapította meg. Ezt alapul véve a 15/2001. KöM rendelet [7] 1. mellékletének 2.1. pontjában szereplő alapösszefüggés felhasználásával az alábbi kibocsátási határértékeket (korlátokat) kapjuk:

levegőoldalon $7,5 \cdot 10^{11} \text{ Bq}/\text{év}$ ^{41}Ar ,

vízoldalon $6,3 \cdot 10^{10} \text{ Bq}/\text{év}$ ^{60}Co , illetve $2,0 \cdot 10^{10} \text{ Bq}/\text{év}$ ^{137}Cs .

A számításokhoz szükséges kibocsátási dóziszárulékok (egyrészt levegőoldalon ^{41}Ar -re $2,22 \cdot 10^{-17} \text{ Sv/Bq}$, másrészt vízoldalon ^{60}Co -ra $3,5 \cdot 10^{-17} \text{ Sv/Bq}$, ^{137}Cs -re $5,7 \cdot 10^{-18} \text{ Sv/Bq}$) egyszerű terjedési modellekből; a biztonsági tényezők (levegőoldali kibocsátásra $\Gamma=3$, vízoldali kibocsátásra $\Gamma=5$) a Közép-Duna-völgyi Környezetvédelmi, Természetvédelmi és Vízügyi Felügyelőség (KDVKTVF) állásfoglalásából származnak. Ezeket a kibocsátási határértékeket, továbbá a betartásuk bizonyítására szolgáló mérési és adminisztrációs rendszert leíró NTI-SZ-23 Kibocsátás-ellenőrzési Szabályzatot a KDVKTVF jóváhagyta.

A környezet sugárvédelmével kapcsolatos legfontosabb esemény az Oktatóreaktor elmúlt éveiben a teljes körű környezetvédelmi felülvizsgálat volt, ennek elvégzését az akkor illetékes KDVKTVF írta elő 2011-ben. A felülvizsgálat alapján a KDVKTVF környezetvédelmi engedélyt adott az Oktatóreaktor üzemeltetésére.

Légnemű kibocsátások

Az Oktatóreaktorból kibocsátásra kerülő légnemű radioaktív anyag elsősorban a reaktor üzemelése során keletkezik. Aktivitását túlnyomórészt a reaktortartályban levő vízbe a levegőből beoldódó argon neutronaktivációs terméke, az ^{41}Ar adja. Kismértékű levegőoldali kibocsátás történhet még esetenként a melegkamrából (a besugárzott besugárzó tokok nyitása során), valamint a vegyifülkéből (illékony radioaktív anyagok feldolgozásakor).

Az épület szellőzőrendszerének köszönhetően az Oktatóreaktor egyetlen levegőoldali kibocsátási ponttal rendelkezik, ez a BME „T” épületének tetején lévő kürtő. Az ide vezető légcsatornához csatlakozik a külön légszivattyúval üzemelő „by-pass” mintavevő-mérő rendszer, melynek mérőcellájában 2 darab GM-számláló található. Ezek a SVER rendszer részeként folyamatosan üzemelnek.

A rendszer egyik gyengesége, hogy nem biztosít izokinetikus mintavételt, ezért fontos, hogy ezen mérőeszköz cseréje is tervbe van véve.

Folyékony kibocsátások

Az Oktatóreaktor épületének kommunális (a konyhából, zuhanyzókból, mellékhelyiségekből származó) szennyvizei, továbbá a vízdesztillálók hűtővize közvetlenül a közcsatornába kerülnek. Az izotóplaboratóriumok mosogatóiból, továbbá a reaktor berendezéseiből származó hulladékvizek az ellenőrző tartályokban gyűlnek, ahonnan csak mintavétel és mérés után juthatnak a közcsatornába (ez az Oktatóreaktor egyetlen vízdali kibocsátási pontja).

Folyékony radioaktív anyagok nyitott radioaktív készítmények felhasználásakor, radioaktív anyagminták roncsolásos analízise esetén, neutronaktivációs analízissel vizsgált minták kémiai feldolgozása folyamán, a reaktor primervizének kikerülésekor, radioaktívan szennyezett felület dekontaminálása alkalmával, zárt, folyadékállapotú etalonok nyitottá válásakor, zárt sugárforrások nedves technológia szerinti zártságvizsgálata során keletkezhetnek.

A vízdali kibocsátásra két szabály vonatkozik: az NTI-SZ-05 Műszaki Üzemeltetési Szabályzat szerint a hulladékvíz folyamatosan nem bocsátható ki; szakaszosan is csak akkor, ha aktivitáskoncentrációja ^{137}Cs -egyenértékben kisebb, mint 40 kBq/m^3 . Ezt az előírást az Oktatóreaktor személyzete úgy teljesíti, hogy a kibocsátandó folyadék aktivitáskoncentrációját egy gamma-érzékeny szcintillációs detektorra alapozott, rendszeresen kalibrált mérőrendszerrel határozza meg.

Másrészt a környezetvédelmi hatóságok következetesen két radionuklidra (^{137}Cs mellett ^{60}Co -ra) adtak meg kritériumokat. A ^{137}Cs -ra vonatkozó kibocsátási korlát – a 40 kBq/m^3 -es előírás betartásából következően – nagy tartalékkal teljesül (évi $5 \cdot 10^5 \text{ m}^3$ kibocsátás jelentené a korlát elérését, de az Oktatóreaktor éves vízdali kibocsátása mindössze $10\text{--}20 \text{ m}^3$). Ugyanakkor a hulladékvizekben a ^{60}Co jelenlétét mindeddig nem vizsgáltuk, bár az ehhez szükséges HPGe félvezető-detektoros mérőrendszer rendelkezésre áll.

Az 1. táblázatban szereplő adatokból látszik, hogy az Oktatóreaktor betartja az eddig tárgyalt, nagy biztonsági tartalékkal megállapított korlátokat.

1. táblázat. Az Oktatóreaktor kibocsátásai az elmúlt években

Év	Levegőoldali kibocsátás ($\text{Bq } ^{41}\text{Ar}$)	Levegőoldali korlátkihihasználás	Folyadékoldali kibocsátás ($\text{kBq } ^{137}\text{Cs}$)	Vízdali korlátkihihasználás
2007	$15,0 \cdot 10^9$	2,01%	566	$2,8 \cdot 10^{-3} \%$
2008	$8,1 \cdot 10^9$	1,09%	143	$7,1 \cdot 10^{-4} \%$
2009	$3,5 \cdot 10^9$	0,47%	97	$4,9 \cdot 10^{-4} \%$
2010	$3,1 \cdot 10^9$	0,41%	55	$2,8 \cdot 10^{-4} \%$
2011	$4,9 \cdot 10^9$	0,66%	35	$1,7 \cdot 10^{-4} \%$
2012	$3,4 \cdot 10^9$	0,46 %	51,7	$2,6 \cdot 10^{-4} \%$
2013	$8,4 \cdot 10^9$	1,12 %	121	$6,1 \cdot 10^{-4} \%$
2014	$4,1 \cdot 10^9$	0,55 %	290	$1,5 \cdot 10^{-3} \%$
2015	$3,8 \cdot 10^9$	0,51 %	170	$8,7 \cdot 10^{-4} \%$
2016	$5,9 \cdot 10^7$	0,01 %	180	$9,1 \cdot 10^{-4} \%$
2017	$1,4 \cdot 10^9$	0,19 %	223	$1,1 \cdot 10^{-3} \%$
2018	$1,32 \cdot 10^9$	0,18 %	230	$1,2 \cdot 10^{-3} \%$

A környezet nukleáris ellenőrzése

Az Oktatóreaktor nukleáris környezet-ellenőrzési feladatait a 15/2001. KöM rendelet [7] 5. mellékletének 5.2. pontja írja elő: környezeti dózisteljesítmény mérése, aeroszolminta,

folyóvízi (Duna-víz) minta, kihullási minta, talajminta, növényminta (fű) vétele és mérése. A tennivalókat a gyakorlatba az NTI-SZ-24 Környezet-ellenőrzési Szabályzat tartalmazza, melynek hatályos változatát a KDVKTVF jóváhagyta.

Általánosságban elmondható, hogy ez a szabályzat a céloknak megfelel, de megújítása több okból is időszerű. A műszerpark az elmúlt években megújult (BittTechnology RS-04 gamma-dózisteljesítmény mérő szonda, Berthold LB2040 összes-alfa-béta mérő beszerzése), amit a szabályzatnak tartalmaznia kell. Változások történtek a mintavételben, minta-előkészítésben is (pl. FPP típusú helyett üvegszálas aeroszol szűrő alkalmazása); néhány szabályzati rendelkezés (pl. etilén-glikolos mintagyűjtés kihullási minta esetében) a gyakorlatban kivitelezhetetlennek bizonyult. A tapasztalatok alapján a talaj- és a fűminta mérését célszerűbb hamvasztás nélkül gamma-spektrometriával elvégezni, mint hamvasztás után összbéta-számlálással.)

Az elmúlt 10 évben nem volt olyan környezeti minta, amelynek mérési eredménye eltért volna a szokásos értékektől, és így kivizsgálásra, vagy külön jelentés írására adott volna okot.

A szellőzőrendszer

Az Oktatóreaktor ablakait nem lehet kinyitni, a levegő cseréjét a szellőztető rendszer biztosítja, mely két ágból áll. A bejövő ág ventilátora az épület előtti „rózsakert” friss levegőjét fűjja be az épületbe; a kimenő ág pedig a benti levegőt szállítja el, amit folyamatosan GM-számláló mérőrendszerrel ellenőriznek. A két ág ventilátorainak eltérő légárama biztosítja, hogy az épületben mindig alacsonyabb legyen a légnyomás, mint az épületen kívül; tehát még egy esetleges szennyezés esetén se juthasson radioaktivitás ellenőrizetlenül a környezetbe.

ÖSSZEFOGLALÓ TANULSÁGOK

Az IBF sugárvédelmi kötete súlyos hiányosságot nem tárt fel. Általánosságban elmondható, hogy a dolgozók, a lakosság (ide értve az egyetemi hallgatókat és látogatókat is), továbbá a környezet sugárvédelme biztosított.

Nem soroltuk a hiányosságok közé azokat a problémákat, melyekkel az Oktatóreaktor személyzete eddig is tisztában volt, és kiküszöbölésükre az előkészületeket megtette. Ilyen például a SVER detektorok pótlásának nehézsége, és a kimenő levegő aktivitáskoncentráció-mérőjének cseréje; melyek az új SVER üzembe vételével megoldódnak. Ide tartozik továbbá a szivárgó bórsavoldatos kádak cseréje, mely a reaktorfelújítás során már megtörtént.

A feltárt hiányosságok nagy része adminisztratív jellegű intézkedéssel megoldható volt. Ide tartozik például a 2016. évi jogszabály-változások átvezetése az MSSz-be, az NTI-SZ-24 Környezet-ellenőrzési Szabályzat és a látogatók tájékoztatójának megújítása.

A kötetben feltárt hiányosságok egyes része csak műszaki intézkedéssel kezelhető, ilyen például a lejárt szolgálati idejű sugárforrások áttokozása és selejtezése, valamint az ólomtéglák festése.

A jogszabályok és az NTI szabályzatainak gyakori változásai, a gyors műszaki és számítástechnikai fejlődés szükségessé teszi a sugárvédelmi rendszer folyamatos felülvizsgálatát, aktualizálását. Az OAH az IBF-et OR-HA0008 számú határozatával (javítóintézkedések elrendelésével) lezárta, és OR-HA0007 számú határozatával az Oktatóreaktor továbbüzemeltetésére engedélyt adott.

IRODALOM

- [1] Országos Atomenergia Hivatal: Útmutató a BME NTI Oktatóreaktor időszakos biztonsági felülvizsgálatának végrehajtásához (1.51. sz. útmutató, Verzió száma: 1.) 2015. szeptember
[http://www.haea.gov.hu/web/v3/OAHPortal.nsf/ACA1C323EB58E62DC1257BE9002CD900/\\$File/1.51v1.pdf](http://www.haea.gov.hu/web/v3/OAHPortal.nsf/ACA1C323EB58E62DC1257BE9002CD900/$File/1.51v1.pdf) Letöltés: 2016. július 5.
- [2] 118/2011. Korm. rendelet a nukleáris létesítmények nukleáris biztonsági követelményeiről és az ezzel összefüggő hatósági tevékenységről
- [3] 487/2015. Korm. rendelet az ionizáló sugárzás elleni védelemről és a kapcsolódó engedélyezési, jelentési és ellenőrzési rendszerről
- [4] 16/2000. EüM rendelet az atomenergiáról szóló 1996. évi CXVI. törvény egyes rendelkezéseinek végrehajtásáról
- [5] OKK-OSSKI Sugáregészségügyi Főosztály I. – Ionizáló Sugárzások Főosztálya: A belső sugárterhelés ellenőrzése. Útmutató az ÁNTSZ Sugáregészségügyi Decentrumok részére (kézirat, 2. változat) 2002. december
- [6] Golder Associates (Magyarország) Zrt.: A BME NTI Oktatóreaktor Teljes Körű Környezetvédelmi Felülvizsgálata, 2012
- [7] 15/2001 KöM rendelet az atomenergia alkalmazása során a levegőbe és vízbe történő radioaktív kibocsátásokról és azok ellenőrzéséről
- [8] Dr. Turai István (szerk.): [Radioaktív anyagokkal szennyeződött személyek sugármentesítése \(dekontaminálása és dekorporációja\)](#). OSSKI Módszertani Útmutató, 2006 <http://www.osski.hu/info/mu/sugment.pdf> Letöltés: 2019. április 15.

DOSE ON LITE – DIREKT ÉS INVERZ BALESETI TERJEDÉSSZÁMÍTÁS

Nagy Attila Gábor^{1*}, Deme Sándor¹, Páles József¹,
Pázmándi Tamás¹ és C. Szabó István²

¹MTA Energiatudományi Kutatóközpont,
1121 Budapest, Konkoly-Thege Miklós út 29–33
²MVM Paksi Atomerőmű Zrt. 7031 Paks, Pf. 71.

*nagy.attila@energia.mta.hu

A kézirat beérkezett: 2019.06.17.

Közlésre elfogadva: 2019.09.01.

Dose on Lite – Direct and inverse calculation of dispersion of radioactive contaminants from accidental release.

The Centre for Energy Research (MTA EK) developed a system plan for updating the former online system for calculating dispersion of radioactive contaminants from accidental release. The system plan of the program consists of seven modules for tracking the pathways of radioactive material from the hermetic area to the environment. The current 'lite' (simplified) version is only a part of the complete program system. The database of this version consists of gamma-radiation dose rates originating from soil contamination measured at the environmental monitoring stations of the nuclear power plant and meteorological characteristics.

The first, so called Dose module serves for extrapolation of the gamma-radiation dose rate up to 30 km. General emergency occurs when the ambient dose equivalent rate exceeds 1 mSv/ outside the area of NPPH. In this case the display map on the corresponding area will be red.

The second, so called TREX module calculates, from data produced by the gamma-radiation detectors and meteorological data, the release in consecutive 10-minute intervals in Cs-137 equivalent. The first and the second modules run continuously, without operator intervention, but data output is provided only if the increase in the level is significant.

The third, so-called Training module can be run with source term and meteorological data given by the user with 10-minute time steps for a maximum of 24 hours, with time step acceleration defined by the user. This way, the 24 hours can be displayed within 12 minutes.

Keywords: accidental release, dispersion calculations, source term calculation

Az MTA EK kidolgozott egy rendszertervet a korábbi, hasonló célú online baleseti terjedésszámítás megújítására. A program rendszerterve hét modult tartalmaz a sugárzó anyag útjának követésére a hermetikus tértől a környezetig. A lite (egyszerűsített) változat csak egy része a teljes programrendszernek, ennek a változatnak a bemeneti adata az erőmű környezetellenőrző állomásain mért, a talajfelszín szennyezettségből származó gamma-sugárzás dózisteljesítmény és a meteorológiai jellemzők.

A program Dózis modulja szolgál a 30 km-ig terjedő gamma-sugárzás dózisteljesítmény extrapolálására. Az általános veszélyhelyzet akkor következik be, ha a telephelyen kívül a gamma-sugárzás környezeti dózisteljesítmény egyenértéke meghaladja az 1 mSv/h értéket. A megjelenítő térkép ilyen esetben az adott területen piros színezésű lesz. A program TREX modulja meghatározza a 10–10 perces időtartamok alatti kibocsátást Cs-137 egyenértékben és ezt az adatot átadja a TREX terjedésszámítási programnak. Az első és második modul

folyamatosan fut operátori beavatkozás nélkül, de adatot csak akkor ad ki, ha a szintemelkedés szignifikáns.

Az Oktató modul a felhasználó által megadott forrástaggal és meteorológiai adatsorral futtatható 10 perces időlépésekkel maximum 24 órás tartamra, a felhasználó által megadott időlépés gyorsítással, így a 24 óra akár 12 perc alatt is megjeleníthető

Kulcsszavak: baleseti kibocsátás, terjedésszámítás, forrástag meghatározás

BEVEZETÉS

Az általunk kidolgozott új, légköri terjedést számító Dose on Lite (egyszerűsített online dózisteljesítmény számító) program feladata a paksi atomerőműtől 30 km-es távolságig tájékoztató adatok szolgáltatása a kiülepedésből származó környezeti gamma-sugárzás dózisteljesítmény területi eloszlásáról, ezzel megkönnyítve a helyszíni felmérés területének a kijelölését.

A program – ugyancsak a környezeti gamma-sugárzási adatok alapján – meghatározza a forrástagot a paksi atomerőmű által használt TREX terjedésszámító program részére. Mind a mérések alapján számított gamma-dózisteljesítmény területi eloszlására, mind a forrástag nagyságára vonatkozóan ki kell emelni, hogy ezekre a mennyiségekre a program csak nagyságrendi tájékoztatást tud adni. A bizonytalanságok alapvető oka mind az adatokat szolgáltató mérőállomások egymáshoz képesti viszonylag nagy szögtávolsága, mind a terjedésszámításban használt paraméterek bizonytalansága.

A felsorolt két funkciót kiegészíti egy oktató modul, amely egyben esettanulmányok futtatására is alkalmas.

A paksi atomerőműben jelenleg használt Dose on program [1] az erőmű 30 km-es körzetére becsüli a radioaktív anyagok aktivitáskoncentrációját és a lakossági dózisokat. A KFKI AEKI által 2004-ben kifejlesztett verzió üzembe helyezése óta alapvetően módosultak a sugárbaeseti intézkedésre vonatkozó nemzetközi ajánlások [2], illetve az Országos Nukleárisbaleset-elhárítási Intézkedési Terv (OBEIT v3.0) [3] által megfogalmazott elvárások, ezért egy elveiben új, a környezeti mérési adatokra támaszkodó program kifejlesztése vált szükségessé. A későbbiekben kifejleszthető a teljes Dose on program, amelyik a kibocsátás rövidtávú előrejelzésére alkalmas, figyelembe veszi a hermetikus téri dózisteljesítményt és túlnyomást, a reaktorcsarnoki dózisteljesítmény is.

A DOSE ON LITE PROGRAM FELÉPÍTÉSE

A DOSE ON LITE program három modulból áll:

1. A kiülepedésből származó dózisteljesítmény területi eloszlását számító Dózis (D) modul. Bemeneti adata a gamma-sugárzás dózisteljesítményt a környezet 20 pontjában mérő ún. Bitt szondák adatai. Kimenő információ a kiülepedésből származó dózisteljesítmény a 2-10 km között minden fél kilométeren és 15, 20, 25 és 30 km-en 10°-onként definiált 756 receptorpontra és az erőmű által az erőmű 30 km-es sugarú körzetében lévő 75 településre. Színkóddal jelöli azokat a receptorpontokhoz tartozó mezőket, amelyeknél a kiülepedésből származó gamma-dózisteljesítmény eléri valamelyik származtatott intézkedési szintet (SZISZ) [3].
 - SZISZ 1, megfelel ≥ 1 mSv/h dózisteljesítménynek – vörös színezés. Ennél a szintnél az elzárkóztatás, jódpofilaxis és a kitelepítés a mérlegelhető intézkedés.
 - SZISZ 2, megfelel $0,1 \text{ mSv/h} \leq \dots \leq 1 \text{ mSv}$ dózisteljesítménynek – sárga színezés. Ennél a szintnél a helyben termelt élelmiszerek fogyasztása korlátozható.

2. A TREX Cs-137 egyenértékben megadott forrástag számító TREX (T) modul. Bemenő adatok: a gamma-sugárzás dózisteljesítményét mérő ún. Bitt szondák adatai és a meteorológiai adatok (szélsebesség, Pasquill-kategória, csapadék). Kimenő adat a forrástag Cs-137 egyenértékben.
3. Oktató program (O modul). Kézi kiválasztással szélirány-eloszlás és forrástag időfüggés fájlok hívhatók be, kiegészítve néhány további paraméter megadási lehetőségével. Ezekkel a paraméterekkel lefut a kiválasztott súlyos baleset. Megjelennek a Bitt szondák és a receptorpontok számított adatai, a származtatott intézkedési szintnek (SZISZ) megfelelő színezéssel. A megjelenés formája megegyezik a D moduléval.

Az online változat feladata a folyamatos működés. Ez a programváltozat automatikusan, online módon kapja a futtatáshoz szükséges bemeneti adatokat, és végzi a számításokat, de a számított eredményeket csak a statisztikusan szignifikáns dózisteljesítmény szint esetén jeleníti meg.

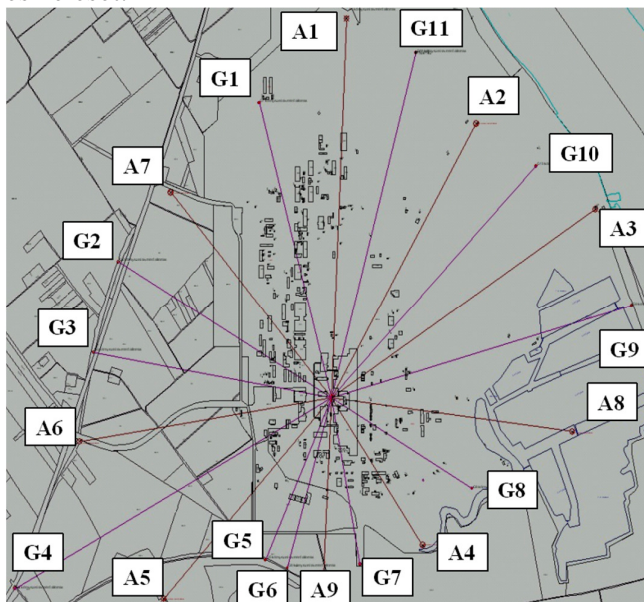
DÓZISTELJESÍTMÉNYT SZÁMÍTÓ MODUL (D MODUL)

Bemenő adat a Bitt szondák által 10 percenként 30 s-os időfelbontással mért gamma-dózisteljesítmény átlagos és minimális értéke. Kimenő adat a receptorpontokon a kiüledésből származó gamma-dózisteljesítmény táblázatos és az időfüggés grafikus formában, a receptorpontok térképszerű megjelenítése a javasolt óvintézkedésnek megfelelő színekkel:

≥ 1 mSv/h (jóprofilaxis, elzárkóztatás, kimenekítés, élelmiszerkorlátozás) – vörös színezés,
 $0,1$ mSv/h $\leq \dots \leq 1$ mSv/h (élelmiszerkorlátozás) – sárga színezés.

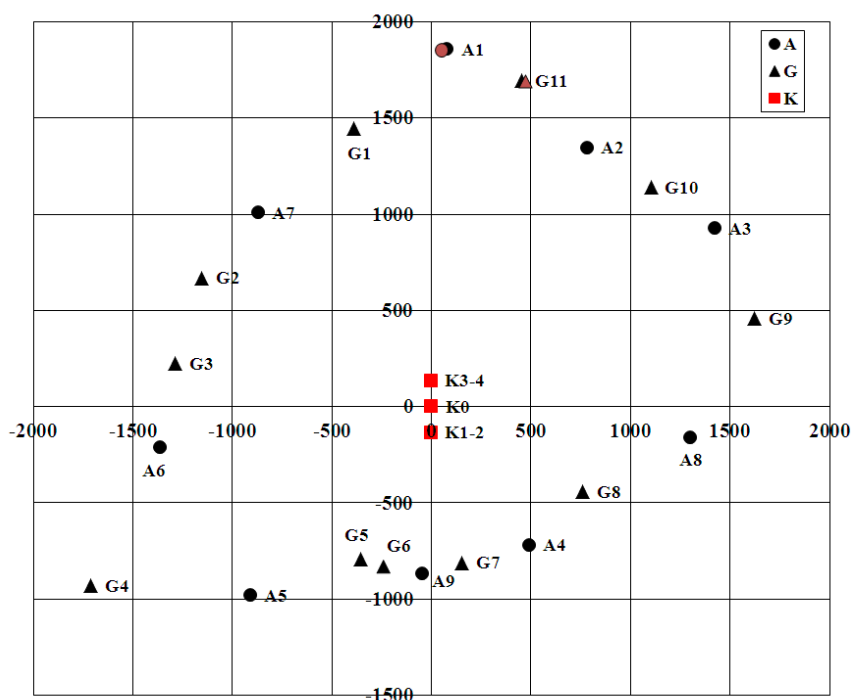
Kiindulási adatok

A mérőpontok, azaz az A és G típusú állomások elhelyezkedését a térképen az 1. ábra mutatja. Az aeroszol és jódaktivitás mérésére is szolgáló A1–A7 állomás épült meg először a közeli települések irányába az A8 és A9 állomások később kerültek telepítésre, az A8 állomás az A3 és A4 közötti nagy szögtávolság, az A9 pedig a KKAT mellé. Az A típusú állomások közé a csak a gamma-sugárzás dózisteljesítményét mérő G típusú állomások azért létesültek, hogy a szög szerinti lefedettség tegye lehetővé a bármely irányba történő kibocsátás észlelését.



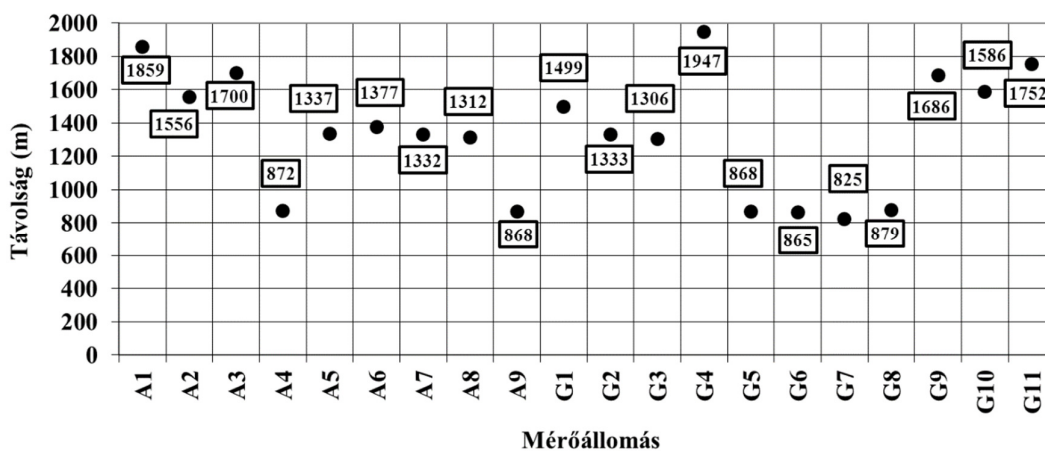
1. ábra. Az A és G típusú állomások (mérőpontok) elhelyezkedése a térképen

Az elhelyezkedést az erőművi koordináta rendszerben a 2. ábra mutatja. Az A1 és G11 állomásnál a Paks 2 építése miatt a várható, a jelenlegitől csak alig eltérő új pozíció piros színnel van jelölve. (A K betű szellőkéményt jelöl, a szellőzőkémény közötti felezőpontot K0 jelzi.)



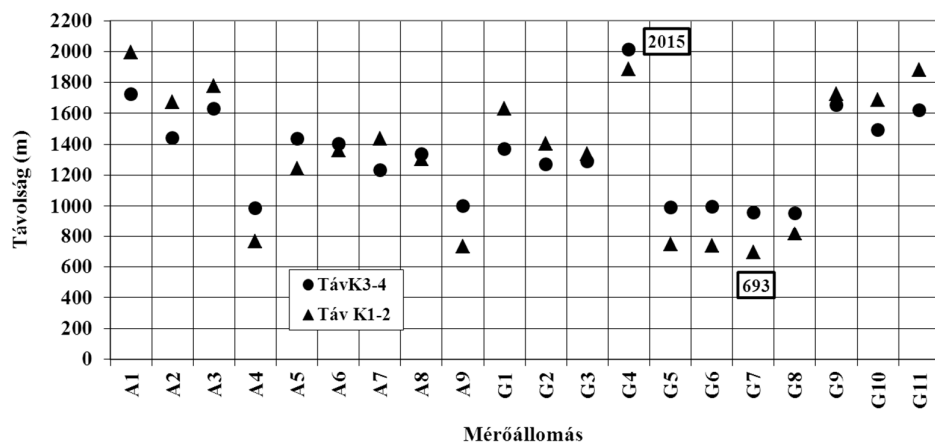
2. ábra. Az A és G típusú állomások elhelyezkedése az erőművi koordináta-rendszer szerint

A 3. ábra alapján látható, hogy a K0 ponthoz legközelebb eső G7 pont 825 m, a legtávolabbi G4 pont pedig 1947 m-re van.



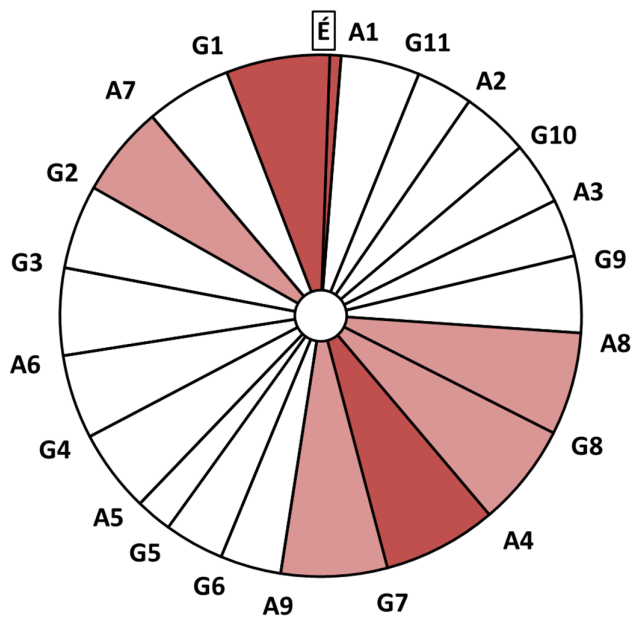
3. ábra. Az A és G típusú állomások távolsága a K0 ponttól

A 4. ábra ugyanezeket a távolságokat a K1-2 és K3-4 viszonyítva ábrázolja. Ebben az esetben legkisebb távolság 693, a legnagyobb 2015 m.

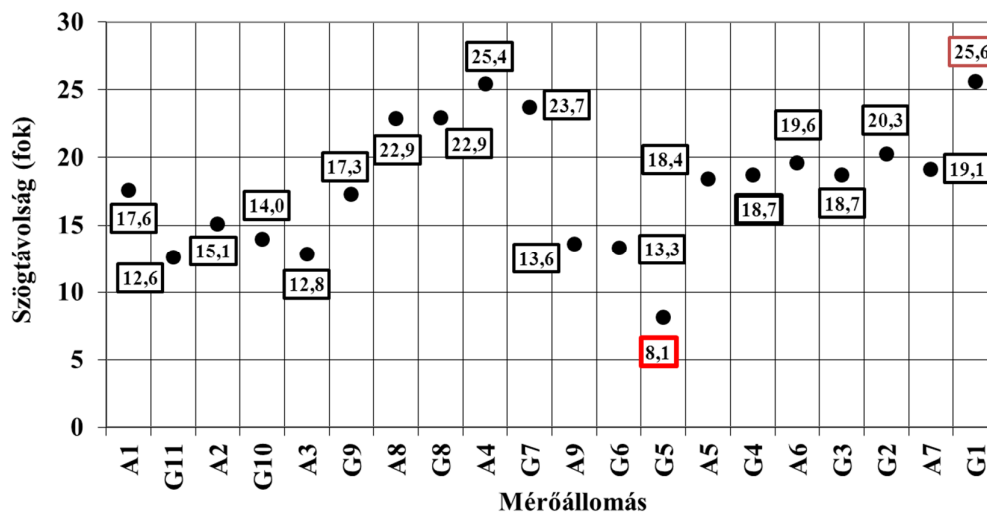


4. ábra. Az A és G típusú állomások távolsága a K1-2 és a K3-4 ponttól

Az állomások irányszögeit a K0 ponthoz képest az 5. ábra szemlélteti. Ugyanezt az adatot numerikus formában a 6. ábra mutatja. Ennek alapján megállapítható, hogy a legnagyobb szög a legkisebbnek több mint háromszorosa. Ez a tény és az állomások egymástól eltérő távolsága az erőműtől ahhoz vezet, hogy a különböző irányok lefedettsége nagyon különböző. A legkevésbé lefedett irányokat az 5. ábra színezéssel jelöli.

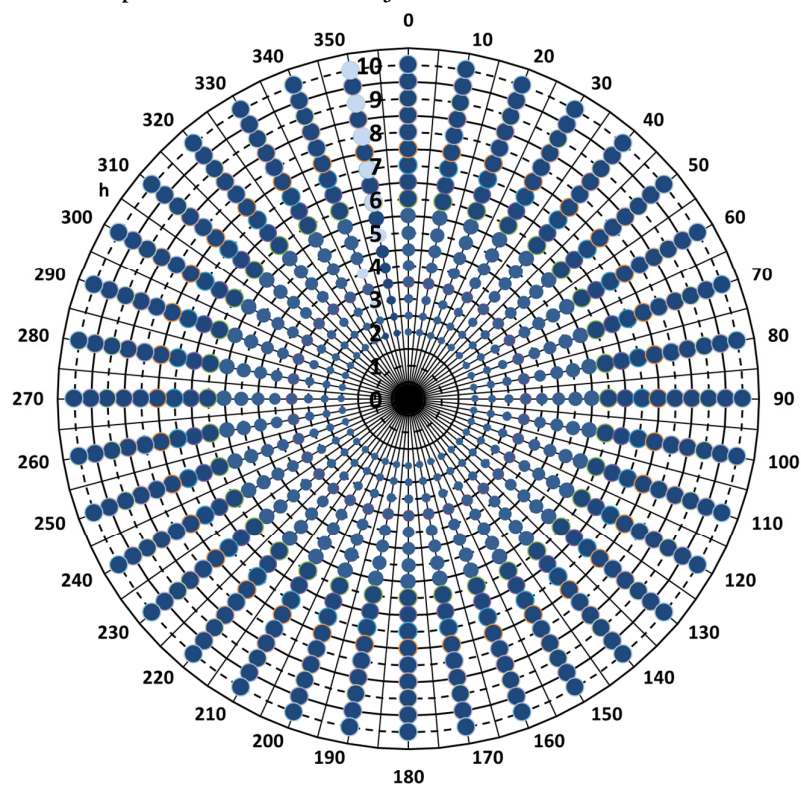


5. ábra. Az A és G típusú állomások irányjai a K0 ponthoz képest. A sötétpiros színnel jelölt szektorok szöge $>25^\circ$, a világos piros esetében $20^\circ\text{--}25^\circ$

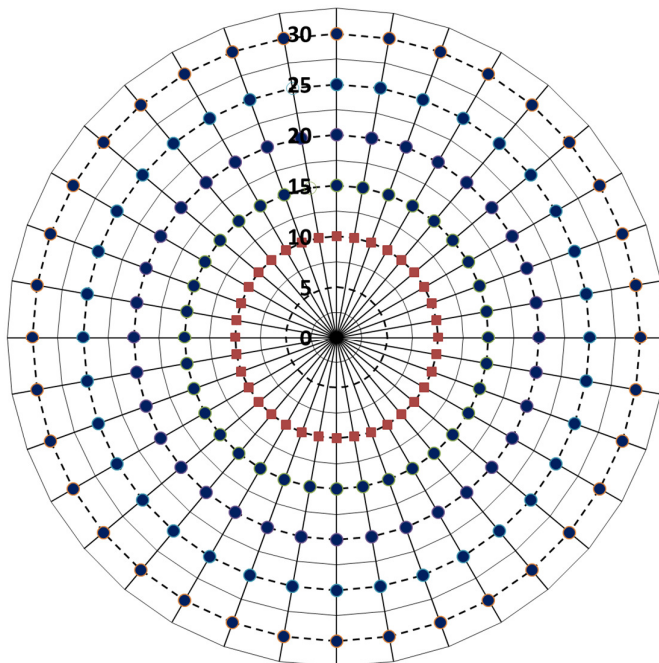


6. ábra. Az A és G típusú állomások közötti szög az óramutató szerinti következő mérőpontig

A számításoknál a következő számítási (receptor) pontok szerepelnek: 2; 2,5; 3; 3,5; 4; 4,5; 5; 5,5; 6; 6,5; 7; 7,5; 8; 8,5; 9; 9,5; 10; 15; 20; 25 és 30 km sugarú körön egyenletesen felvett 36 receptorpont koordinátái. Ebben az esetben a 2–10 km közötti távolságnál receptorpontok száma $17 \times 36 = 612$. A 612 receptorpont (számítási pont) elhelyezkedését mutatja a 7. ábra. A távolabbi 144 számítási pontot a 8. ábra mutatja.

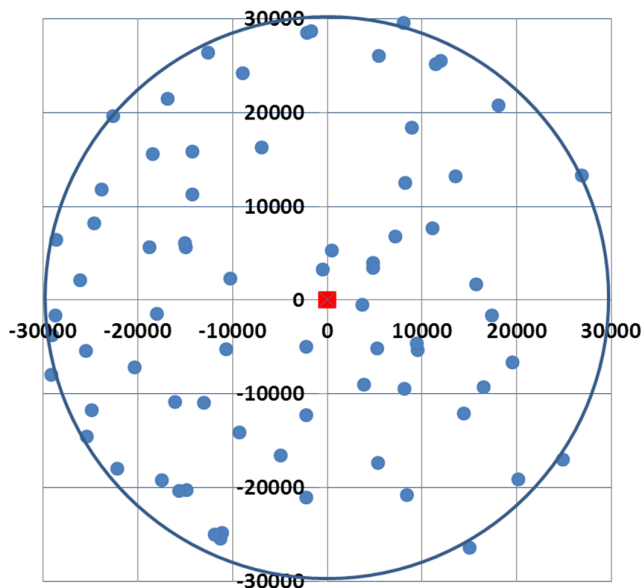


7. ábra. A 612 számítási pont a 2–10 km-es távolságtartományban 0,5 km-enként, 10°-os lépcsőkben. A 350°-nál egyes pontok csak a számérték leolvashatósága miatt világosak



8. ábra. A 144 számítási pont a 15–30 km-es távolságtartományban 5 km-enként, 10°-os lépcsőkben. Az ábrán eltérő színnel feltüntettük a 10 km-es gyűrűt is.

További 75 számítási pont az erőmű 30 km sugarú körében fekvő 75 település.



9. ábra. Az erőmű 30 km-es sugarú körzetében lévő települések. A piros négyzet az erőmű kéményeinek középpontja.

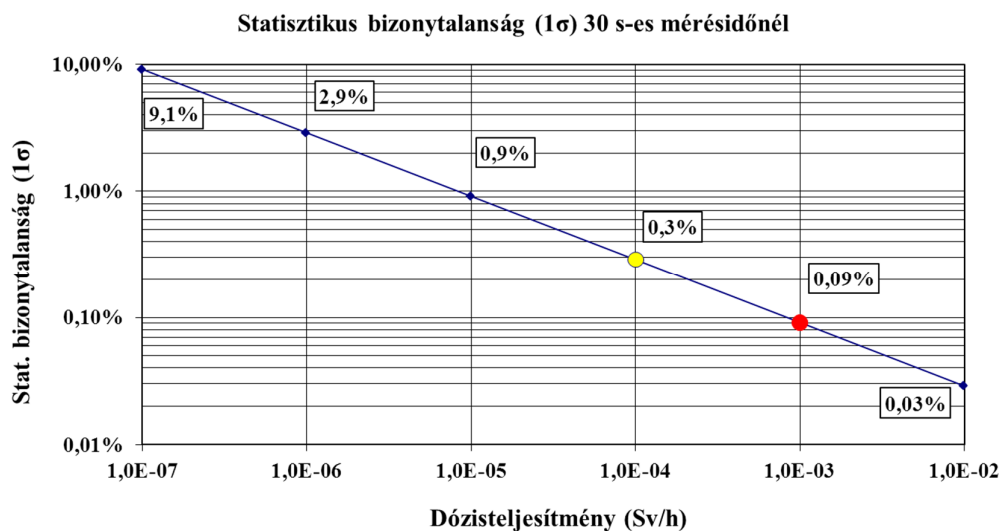
A Lite program jelenlegi verziójában folyamatosan számítjuk a receptorpontokban (a 30 km-es sugárban) a kiüledésemből származó gamma-dózisteljesítményt. A TREX forrástagot akkor kezdjük számolni, ha a dózisteljesítmény bármely receptorpontban eléri a 0,1 mSv/h-t. Ezt kiegészíti, hogy az udvartéri Bitt szondák mérései alapján is elindítjuk a forrástag számítását,

ha a mért érték meghaladja a fenti küszöböt. A településekre számított táblázatban az értékeket szintén folyamatosan számítjuk és meg is jelenítjük. A táblázat sorait a térképhez hasonlóan sárgára vagy pirosra színezzük, ha az adott településen a dózisteljesítmény eléri a küszöbértéket. Ha bármelyik receptorponton a kiülepedésből származó gamma-sugárzás dózisteljesítmény eléri vagy meghaladja 0,1 mSv/h értéket, akkor az érintett szektorszegmensek a dózisteljesítménynek megfelelően színesek lesznek, egeret fölé húzva megjelenik a számérték is.

A 0,1 mSv/h dózisteljesítményt azért választottuk indulási küszöbnek, mert a 30 s-os dózisteljesítmény érték egyszeres statisztikus szórása ebben az esetben már nem éri el a 0,5%-ot (10. ábra), így a kiülepedésnek megfelelő minimum és a teljes sugárzásnak megfelelő átlagos dózisteljesítmény jól elkülöníthető és nem a minimum érték statisztikus ingadozás következménye.

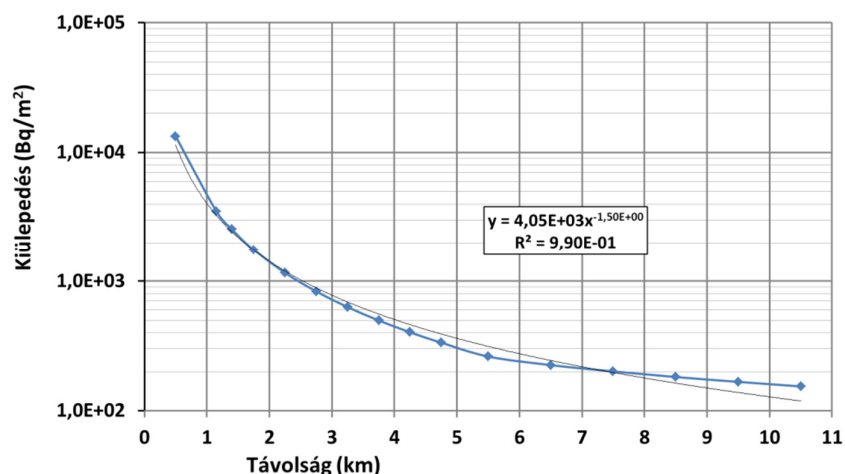
Megjegyezzük, hogy környezetellenőrző rendszer figyelmeztető szintje 0,25, vészszintje 0,5 μ Sv/h.

Szintemelkedés esetén megkezdődik a kihullásból származó gamma-dózisteljesítmény meghatározása. Egy mérési ponton az adott 10 percre vonatkozó 20 mérési adat minimumát tekintjük a kihullásból eredő dózisteljesítménynek [4], míg a teljes átlagos dózisteljesítményből kivonva a minimális dózisteljesítményt megkaphatjuk a felhőből származó 10 perces átlagos dózisteljesítményt. (Ezt az értéket a rendszer nem jeleníti meg, de az utólagos feldolgozásnál kiszámítható.)



10. ábra. A Bitt szonda 30 s alatti számlálási statisztikus bizonytalansága a dózisteljesítmény függvényében. Az 1 mSv/h érték felel meg az általános veszélyhelyzetnek, a 0,1 mSv/h pedig az élelmiszer fogyasztás korlátozásának.

Ha a mérési ponthoz képest távolodunk az erőműtől, akkor talajközeli kibocsátásnál – változatlan egyéb körülmények esetén – a felületi szennyezettség monoton csökken. A 11. ábra megadja a felületi szennyezettség távolságfüggését 10^{12} Bq Cs-137 kibocsátása esetén, ha a szélesebbség 10 m magasan 5 m/s, a felszíni érdesség durva (magas a növényzet), a kibocsátás magassága 10 m. A számításokat a PC COSYMA programmal végeztük [5]. Az 500 m-es távolságon túl a távolságfüggés menete azonos az összes Pasquill-kategóriára.



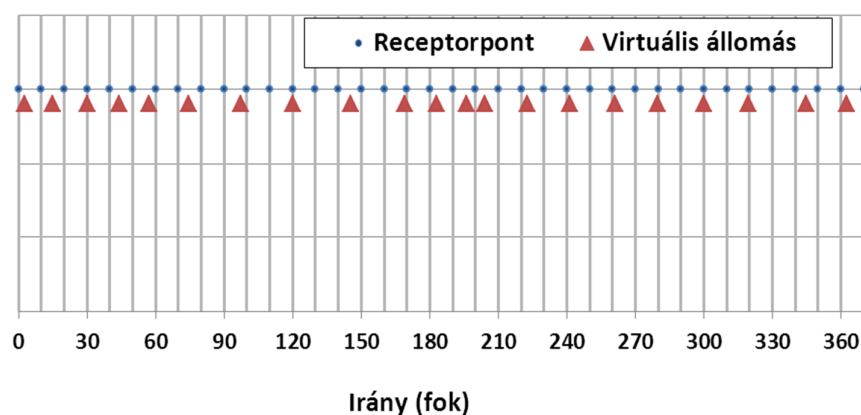
11. ábra. A felületi szennyezettség távolságfüggése $1 \cdot 10^{12}$ Bq Cs-137 kibocsátása esetén, száraz időben

Meg kell jegyezni, hogy a távolságfüggés nagyon sok paraméter függvénye, ezek a forrás geometriai jellemzői, a kibocsátás magassága, a kibocsátott anyagok fizikai–kémiai jellemzői, a szélesebbesség, a diszperziós jellemzők, a talajborítás (növényzet), az esetleges csapadék. Jelentősen befolyásolhatja a terjedést, ha a csóva áthalad a Duna felett. A bemutatott számítás átlagos esetnek fogadható el, a továbbiakban ezt használjuk.

A 11. ábra képletét használva kiszámítottuk az adott állomáson a Bitt szondával mért adat és a 2–10 km-es távolságra extrapolált értéket, azaz a Bitt szonda adata és virtuális (ugyanabban az irányban, a receptorpontnak megfelelő távolságban) állomás közötti normálási tényezőt.

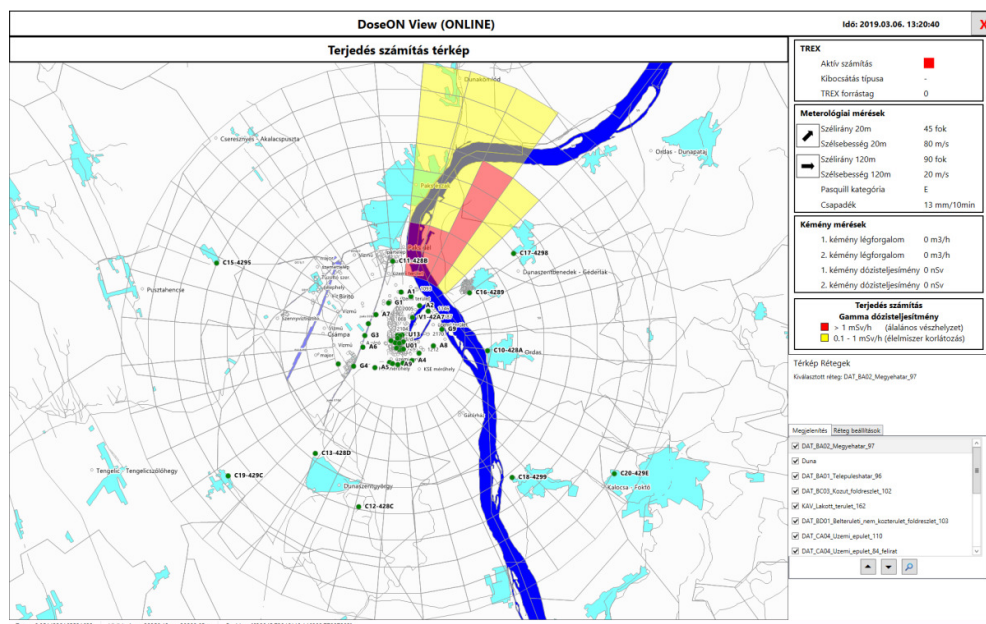
A következő lépésben a virtuális állomásokra kiszámított dózisteljesítmény értékeket a receptorpontokra kell átszámítani. Ennél – az egyszerűség érdekében – lineáris interpolációt használunk. Ez a közelítés huzamos, több 10 perces cikluson át tartó kibocsátás esetén a szélirány időbeli ingadozása révén – egyre jobb közelítést fog adni.

A virtuális állomáspontok és a receptorpontok irány szerinti elhelyezkedését mutatja a 12. ábra. Látható, hogy a virtuális állomások között 1–3 receptorpont helyezkedik el.

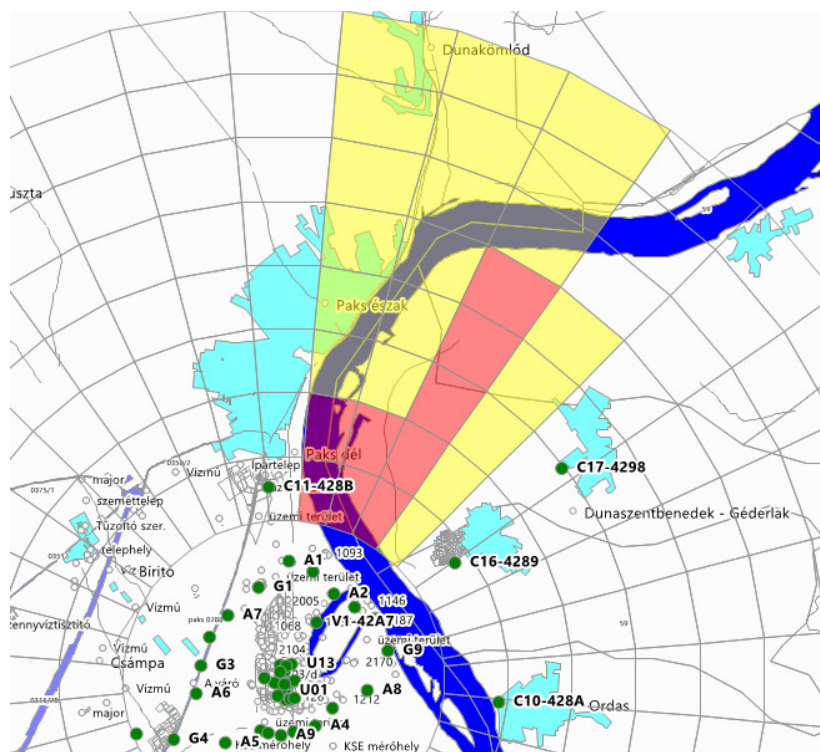


12. ábra. A 10°-onként megadott receptorpontok és a 20 virtuális állomás szöge. Két virtuális állomás közé egynél több receptorpont is eshet

A számítások révén kapott dózisteljesítményeket a receptorpontok esetében grafikusán (13. ábra), a települések esetében táblázatos formában jelenítjük meg, szinttűlépés esetén színezéssel. A 14. ábra a 13. ábra színezéssel érintett részét mutatja.



13. ábra. Az óvintézkedési javaslattal érintett pontok, színkóddal



14. ábra. A szintemelkedéssel érintett szektor-szegmensek

A TREX FORRÁSTAG MODUL (T MODUL)

A modul feladata, hogy a mért gamma-sugárzás dózisteljesítménye alapján az erőmű által használt TREX légköri terjedésszámító program részére forrástagot számítson ki. A gamma-sugárzás dózisteljesítményét a szellőzőkéményekben és a környezetben elhelyezett Bitt szondák mérik. Amennyiben a kéményekben lévő Bitt szondák 10 $\mu\text{Sv/h}$ -t meghaladó jelzést

adnak, akkor baleseti kéménykibocsátást tételezünk fel. Amennyiben nincs kéménykibocsátás, de a környezeti szondák bármelyikének jelzése meghaladja a $10 \mu\text{Sv/h}$ -t, akkor épületen keresztüli kibocsátással (épületkibocsátással) számolunk. Kéménykibocsátás esetén az épületkibocsátást kizárjuk, mert a szellőzőrendszerek az épületen belül a környezethez képest depressziót hoznak létre, ezzel megakadályozva az épületkibocsátást. A két kiépítés kéményeit külön-külön kezeljük és adjuk meg I és II. kéménykibocsátásként, mert a két kéményben egymástól különböző légszűrés lehet.

Kéménykibocsátás számításnál a Bitt szonda által mért dózisteljesítmény adat mellett szükség van a kémény légforgalom adataira is.

A kéménykibocsátás meghatározása a kémény Bitt szonda jelzése és a légforgalom alapján

A kéményben (a H1 szellőzőhídban) lévő Bitt szonda a H1 szellőzőhíd légtérfogának gamma-sugárzását méri. Ha ismerjük azt, hogy milyen összefüggés van a légtérfog egy adott nuklidra vonatkozó aktivitáskoncentrációja és a detektor jelzése között, akkor a detektor jelzése alapján megadható a légtérfog aktivitáskoncentrációja a számításnál használt nuklid gamma-sugárzásának egyenértékében. A számításoknál konzervatívan feltételezzük, hogy sem a szellőzőhíd fala, sem a detektor felszíne nem szennyeződik el.

A számításokat először egy olyan hipotetikus nuklidra végeztük el, amely bomlásakor egy 1 MeV -es gamma-fotont bocsát ki. A többi nuklid jelzése az adott nuklid gamma-dózisállandójával lesz arányos a hipotetikus nuklidhoz képest.

A H1 hídban a Bitt szonda és a sugárzó térfogat geometriai méreteit a 15. ábra mutatja. A detektor jelzését térfogati integrálással lehet meghatározni. A kapott eredmény a következő.

Ha a térben 1 Bq/m^3 homogén aktivitáskoncentrációt és bomlásonként egy 1 MeV -es gamma-foton kibocsátást tételezünk fel, akkor a térfogati numerikus integrál megoldásával $6,44 \cdot 10^{-12} \text{ Gy/h}$ dózisteljesítményt kapunk. Ugyanez az érték Microshield programmal [6] számolva $5,88 \cdot 10^{-12} \text{ Gy/h}$. A továbbiakban ez utóbbi, több tényezőt figyelembe vevő értéket használva megállapítható, hogy ha a szellőzőkéményben lévő gamma-szonda felső méréshatára 10 Gy/h , akkor ez $1,7 \cdot 10^{12} \text{ Bq/m}^3$ koncentráció mérését teszi lehetővé a feltételezett hipotetikus nuklidnál.



15. ábra. A térfogati integrálási határok értelmezése a szellőzőkémény Bitt szonda esetén. A méretek méterben vannak megadva, a Bitt szonda a szaggatott vonallal jelölt sík geometriai középpontjában van.

Az érzékenységet meghatároztuk Cs-137 nuklidra is. Ez $3,65 \cdot 10^{-12} \text{ Gy/h}$ 1 Bq/m^3 aktivitáskoncentráció esetén, azaz az 1 MeV -es érték 0,62-ed része,

A DOSE ON LITE program kiszámolja a 10 percre vonatkozó, a szellőzőkéményben lévő átlagos aktivitáskoncentrációt Bq/m^3 Cs-137 gamma-sugárzás egyenértékben. Ezen adatok és a 10 percre vonatkozó légforgalom ismeretében az 1. táblázat alapján meghatározható a kibocsátott nuklidok Cs-137-re vonatkozó aktivitása.

A számításnál konzervatívan nem vesszük figyelembe a falakon és detektoron kiülepedő szennyezettséget.

1. táblázat. Dóziskonverziós tényezők (Dkt.) a Cs-137 dóziskonverziós tényezőjére normalva

Nuklid	Dkt.	Nuklid	Dkt.	Nuklid	Dkt.	Nuklid	Dkt.
Kr-85	0	I-134	4,41	Sr-90	0	Cs-137	1
Kr-85m	0,24	I-135	2,47	Sr-91	1,75	Ba-140	0,31
Kr-87	1,17	Te-127	0,01	Mo-99	0,26	Zr-95	1,3
Kr-88	2,74	Te-127m	0,29	Tc-99m	0,24	La-140	3,62
Xe-133	0,04	Te-129	0	Ru-103	0,87	Ce-141	0,1
Xe-135	0,42	Te-129m	0,25	Ru-105	1,37	Ce-143	0,43
Xe-135m	0,76	Te-131	0,73	Ru-106	0,35	Ce-144	0,02
I-131	0,67	Te-131m	2,34	Rh-105	0,13	Sb-127	1,1
I-132	3,89	Te-132	0,36	Cs-134	2,73	Sb-129	2,3
I-133	1,06	Sr-89	0	Cs-136	3,63		

Az épületen át történő kibocsátás meghatározása a környezeti Bitt szondák jelzése és a meteorológiai adatok alapján

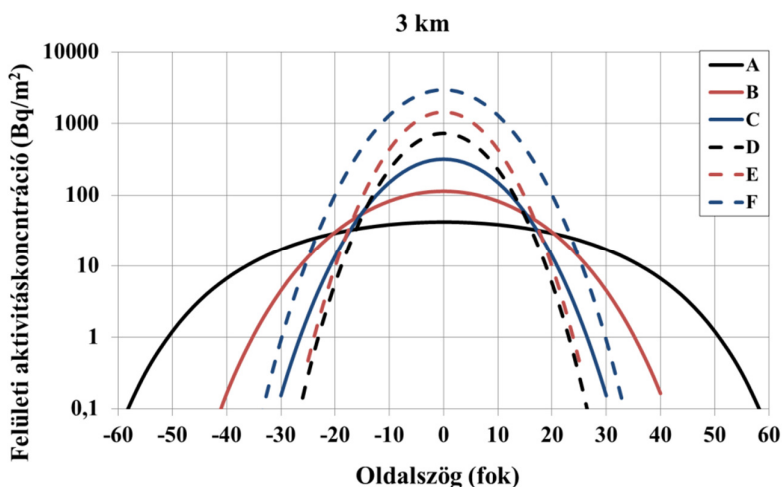
A forrástag meghatározása az inverz terjedésszámításon alapul. Ennek lényege, hogy egy adott 10 perc alatti kiülepedésből eredő dózisteljesítmény növekmény alapján meghatározzuk a kiülepedés felületi aktivitáskoncentrációjának növekményét Cs-137 egyenértékben, majd a kiülepedési vagy a kimosási tényezőt és a csapadékintenzitást felhasználva meghatározzuk a talajközeli légköri 10 perces átlagos aktivitáskoncentrációt. Ezután a további meteorológiai adatok (Pasquill-kategória és szélsébség) alapján számítjuk a hígulást és ennek révén végül megkapjuk a forrástagot. Miután kiindulási adatként csak a kiülepedésből eredő gamma-sugárzás dózisteljesítmény adat áll rendelkezésre, ezért a kibocsátott nuklidok külön-külön nem határozhatók meg, ezért számításainkat Cs-137-re végeztük el, amely az 1. táblázat alapján átszámítható más aeroszol formájú radionuklidra. A jódiotópok esetében az aeroszol formát tételezzük fel.

Adott forrástagnál a receptorponton várható kiülepedés számítását a COSYMA programmal [5] végeztük el. A Bitt szondák mérési adatai alapján a mért, kiülepedésből származó dózisteljesítményeket a 3 km-es távolságban lévő, egyenletes szögkiosztású receptorpontokra számítottuk át, kiküszöbölve a Bitt szondák eltérő távolságát és egyenetlen szögkiosztását az erőmű középpontjához képest.

A számításokhoz felhasznált felületi szennyezettség – dózisteljesítmény összefüggés Cs-137 esetén: 1 Bq/m^2 szennyezettség $2 \cdot 10^{-12} \text{ Gy/h}$ dózisteljesítményt hoz létre [6]. A Bitt szondák Sv/h egységben mérik a dózisteljesítményt, ez a szokásos környezeti sugárzási térben számértékben kifejezve mintegy 20%-kal több mint a Gy/h érték, de a különbséget elhanyagoljuk, ami konzervatív megközelítés.

A következőkben a forráserősség és a talajközeli aktivitáskoncentráció összefüggést vizsgáljuk. A számításokat a 11. ábra számításának megfelelő paraméterekkel végeztük.

Első lépésként meghatároztuk a csóva intenzitásának szektorok szerinti eloszlását a hat Pasquill-kategóriára (16. ábra). Látható, hogy míg a maximális felületi szennyezettség szélső értékei között közel két nagyságrend arány van, addig a csóvaszélesség csak mintegy kétszeres arányt mutat.



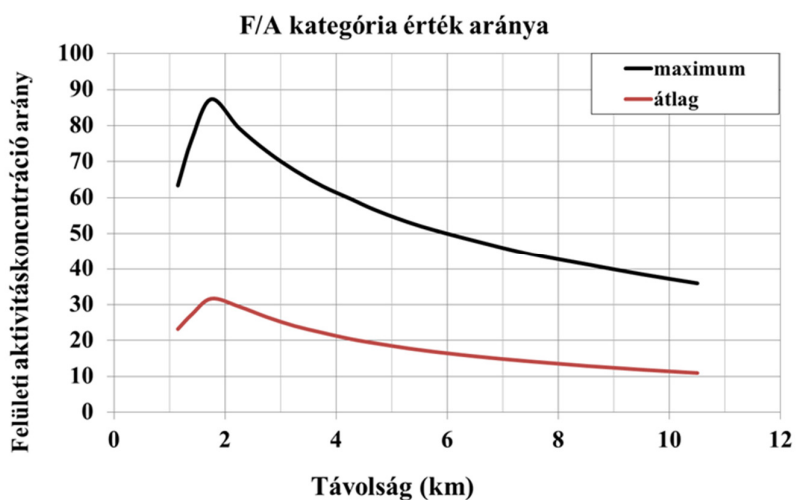
16. ábra. A csóva intenzitásának szög szerinti eloszlása a hat Pasquill kategóriára **3 km-es** távolságnál

Ha a csóva maximális értéke, azaz a csóvatengelyi érték helyett a 360 fokos szögre átlagolt értéket vizsgáljuk, akkor az A és F kategória intenzitás arányára kisebb értéket kapunk, mert ebben az esetben a csóvaszélesség kis mértékben kompenzálja a maximum értékek közötti arányt. E két érték arányának távolságfüggését az F/A kategóriára adja meg a 17. ábra. A görbék kezdeti szakaszának eltérő menetét az épülethatás okozza. A COSYMA program által számolt épülethatás a 2 km-nél nagyobb távolságoknál már jelentéktelen. (Az épülethatás a valóságban nagyon összetett az erőmű épületeinek nagy száma és jelentős méretei miatt.)

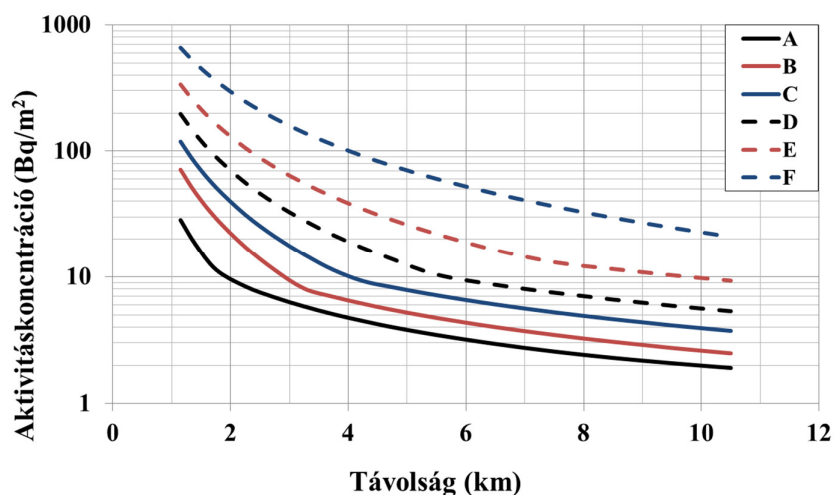
A továbbiakban az átlagos értékeket használjuk, mert ennek meghatározása kisebb hibával jár, mint a maximum értéke, miután az átlag értéket több pont együttes értéke adja meg.

Az átlagos kiülepedés távolságfüggését a hat Pasquill kategóriára a 18. ábra mutatja.

A továbbiakban használt 3 km-es referencia távolságot azért választottuk, mert a Bitt szondák távolsága az erőmű épületétől (a kémények középpontjától) nagyon különböző, míg a 3 km-re extrapolált érték ezt a távolságot azonossá teszi minden Bitt szondára vonatkozóan. A 3 km-re vonatkozó átlagos kiülepedést a hat Pasquill kategóriára a 2. táblázat adja meg.



17. ábra. Az F/A Pasquill kategóriánál a maximum és átlagértékek aránya a távolság függvényében. A 2 km alatti anomáliát az épülethatás okozza.

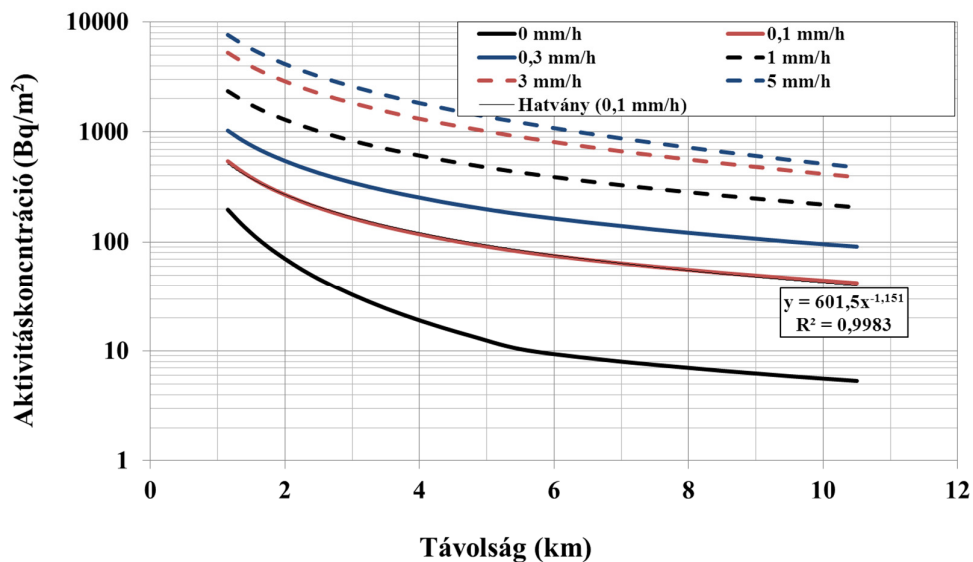


18. ábra. Az átlagos kiülepedés távolságfüggése a hat Pasquill-kategóriára

2. táblázat. Az átlagos kiülepedés aktivitáskoncentrációja Bq/m²-ben 3 km-en $1 \cdot 10^{12}$ Bq forráserősségnél, 5 m/s-os szélességnél és a hat Pasquill-kategóriára vonatkozóan és a szélső értékek aránya

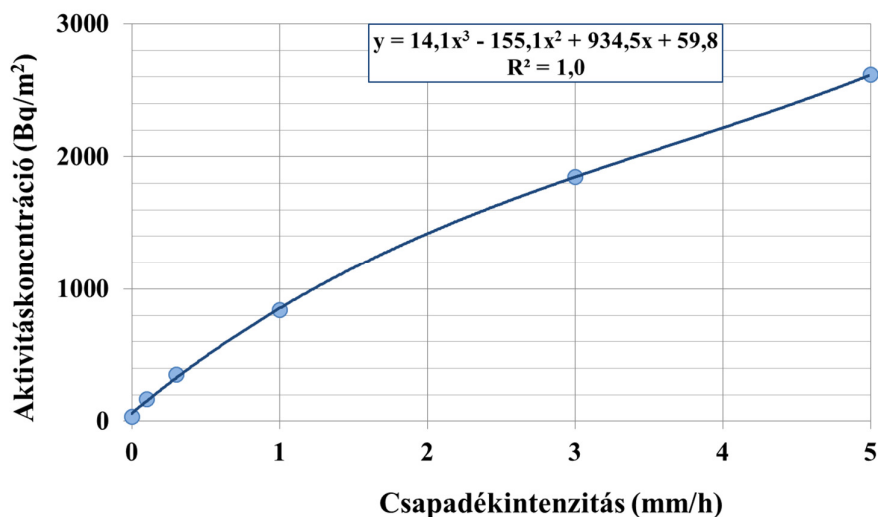
A	B	C	D	E	F	F/A érték arány
6,3	9,7	18	33	65	161	25

Csapadék. Az eddigiekben csapadégmentes időjárást tételeztünk fel. Csapadék esetén a száraz kihullás mellett a kimosódás is fellép. Esetünkben a talajfelszíni Cs-137 mennyiségét határoztuk meg különböző intenzitású csapadék esetén. Az összes adat D Pasquill-kategóriára vonatkozik, miután általában csak ennek a kategóriának megfelelő időjárási körülmények között tud csapadék kialakulni.



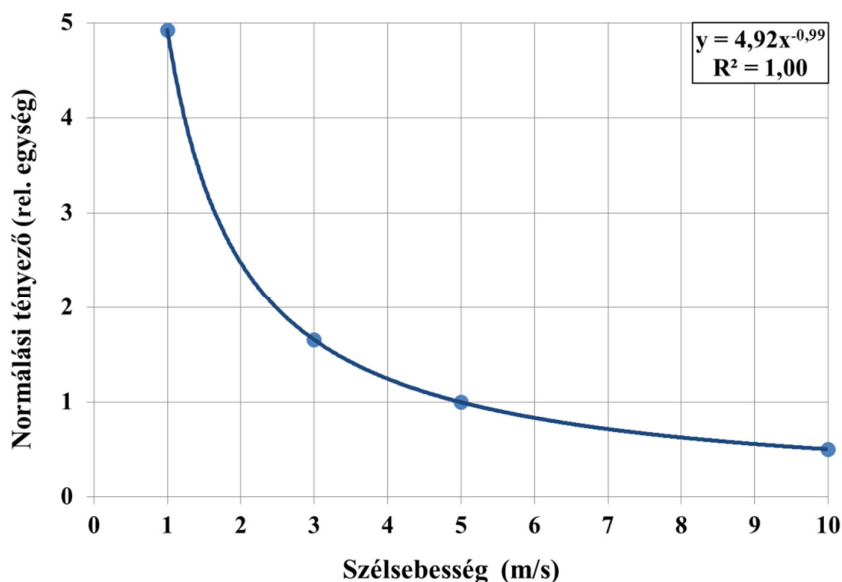
19. ábra. Talajfelszíni aktivitáskoncentráció száraz időben és különböző intenzitású esőnél D-Pasquill-kategória, 5 m/s szélesség esetében

A 3 km-es távolságra a 20. ábra adja meg a talajfelszíni aktivitás csapadékkéntesség függését. Ha az adott 10 percen nem volt csapadék, akkor a kiülepedésre vonatkozóan a 2. táblázat adatát kell használni D kategória esetén is.



20. ábra. Az átlagos talajfelszíni aktivitáskoncentráció az esőintenzitás függése 10^{12} Bq kibocsátása esetén 3 km-es távolságnál

Szélesség. Az aktivitáskoncentráció – változatlan egyéb paraméterek esetén – a szélességgel fordítottan arányos. Az eddigi számítások 5 m/s-os szélességre vonatkoznak, ettől eltérő szélesség esetén az aktivitáskoncentráció korrekcióját a 21. ábra adja meg. Adott aktivitáskoncentrációnál a forráserősséget a korrekciós faktorral való osztással kaphatjuk meg.



21. ábra. Az aktivitáskoncentráció korrekciós tényezője a szélesség függvényében

Az esetleg hiányzó Bitt szonda adatának meghatározása

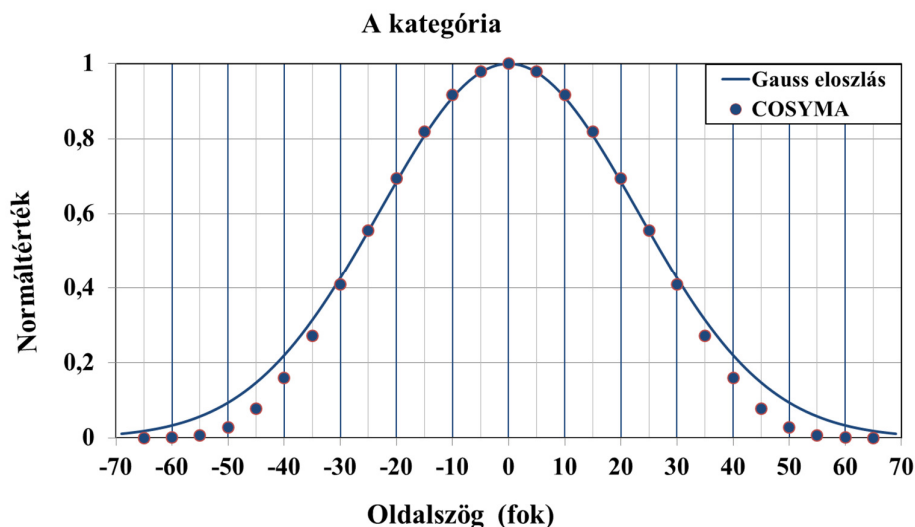
Karbantartás vagy meghibásodás következtében hiányozhat Bitt szonda mérési adat. Karbantartást csak akkor végezhetnek egy Bitt szondán, ha a két közvetlenül mellette levő szonda üzemképes. A továbbiakban tehát abból indulunk ki, hogy a hiányzó adatot a szonda két oldalán található közvetlenül szomszédos adatából tudjuk meghatározni. A meghatározás módja lineáris interpoláció, figyelembe véve a két mérési adatot biztosító és a meghatározandó adatú Bitt szonda erőműtől mért távolságát.

OKTATÓI MODUL (O MODUL)

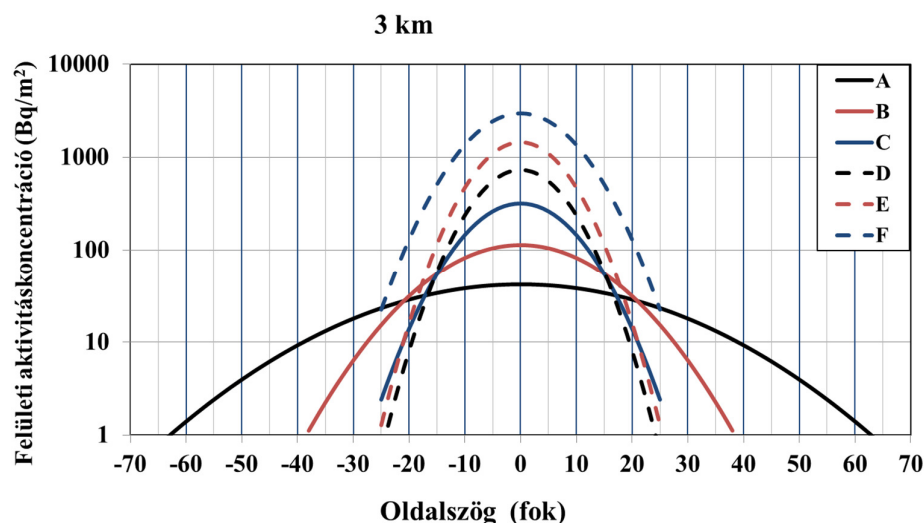
Az oktatói modul révén a grafikus felhasználói felületen keresztül megadandó forrástaggal és meteorológiai adatsorral szimulálhatóak a súlyos baleseti szituációk, a program kimenetének megjelenítése megegyezik a valós baleseti szituációéval. Az oktató program a teljes feszültség kimaradással (TFK) járó súlyos balesetekre jellemző épületkibocsátásokra számítja ki a receptorpontokra és a környezeti Bitt szondák helyére a talaj felületi aktivitáskoncentrációját és ez alapján a védőintézkedések javasolt kategóriáit. A kibocsátást minden esetben épületkibocsátásként kezeljük, mert ha van kéményen keresztüli kibocsátás, akkor biztosítható a kibocsátott levegő hatékony aeroszol és elemi jódszűrése, így a környezetszennyezés nem érheti el a baleseti intézkedési szintet.

A számításokhoz szükség van arra, hogy 1°-os felbontásban rendelkezésre álljanak a hat Pasquill-kategóriára vonatkozó aktivitás kiülepedési adatok a számításoknál használt alapparaméterekre, azaz a forráserősség $1 \cdot 10^{12}$ Bq Cs-137, a kibocsátás magassága 10 m, az épület szélessége 100 m, magassága 40 m, a 10 m-en mért szélesebbesség 5 m/s, nincs csapadék.

Az előzőekben a COSYMA programmal [5] meghatároztuk a kiülepedést 5°-os felbontásban 3 km-es távolságra. Ezekre az adatokra illesztettünk Gauss eloszlásokat, amelynek révén megkaptuk az 1°-os felbontású számértékeket. Az illesztéseket a görbék maximumának 0,6-os értékére végeztük. A kapott egysége eloszlásokat példaként 22. ábra az A kategóriára adja meg. A hat kategória normálás nélküli értékeit a 23. ábra adja meg.



22. ábra. Az A Pasquill kategória normált adataira illesztett Gauss eloszlás. Az eloszlás σ -értéke 23°



23. ábra. A hat Pasquill kategória esetén létrejövő felületi aktivitáskoncentráció Bq/m² egységben az alapparaméterek esetén

Az oktatói modul algoritmusa

Kiinduló adatok

A program vezérlésére grafikus felhasználói felület szolgál. Ezen megadható:

- A forrástag fájl (a korábban bevitt forrástag fájlok valamelyike Cs-137 egyenértékben). A forrástag megadja a kibocsátást 10 perces időlépéssel a baleseti kibocsátás teljes időtartamára, de legfeljebb 24 órára ($6 \times 24 = 144$ ciklus). A forrástag alapértelmezésben $1 \cdot 10^{12}$ Bq/10 perc. Lehetőség van a felhasználó által szerkesztett forrástag használatára is.
- A forrástag szorzója. Beírható 0,1 és $9,9 \cdot 10^5$ között tetszőleges szám. A szám alapértelmezésben 1
- A szélirány fájl a korábban bevitt szélirány fájlok valamelyike. A szélirány fájl megadja a terjedési szélirányt 1°-os szögfelbontással a 0°–359° szögtartományban 10 perces időlépésekkel. A szélirány alapértelmezésben 0°. Lehetőség van a felhasználó által szerkesztett szélirány fájl használatára is.
- A szélesség értéke 10 m-es magasságban. Az adott futás teljes időtartamára vonatkozó szélesség 1–10 m/s tartományban adható meg. A szélesség alapértelmezésben 5 m/s
- A Pasquill-kategória. Az adott futás teljes időtartamára vonatkozó Pasquill-kategória. Alapértelmezésben D Pasquill-kategória
- A csapadék intenzitása. Az adott futás teljes időtartamára vonatkozó csapadékintenzitás megadható a 0–5 mm/h tartományban. A csapadék intenzitása alapértelmezésben 0 mm/h.
- Program léptetési sebesség, megadható kézi léptetés vagy automatikus léptetés 5 s-ként. Ennek révén egy 24 órás esemény futási ideje 12 perc. Alapértelmezés a kézi léptetés.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Láng E., Deme S., A Dose_on terjedés- és dózisszámoló programegység, KFKI AEKI, Budapest, AEKI-KER-2004-716-01/0, 2004. április 26.
- [2] Criteria for Use in Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency, GSG-2-Pub 1467, 2011
- [3] Országos Nukleárisbaleset-Elhárítási Intézkedési Terv OBEIT v. 3.0, 2018. február
- [4] Deme Sándor, Pázmándi Tamás, C. Szabó István, Szántó Péter Az általános környezeti veszélyhelyzet megállapítása és a megállapítás bizonytalansági tényezői. Sugárvédelem IX. évf. (2016) 1. szám, 1–10. oldal
- [5] PC COSYMA (Version 2): An Accident Consequence Assessment Package for Use on a PC Report EUR 16239 (1996)
- [6] Microshield ver. 6. Grove Engineering.

Készült a SOMOS Alapítvány támogatásával

A LAKOSSÁGI ÓVINTÉZKEDÉSEK BEVEZETÉSÉNEK SUGÁRZÁS MONITOROZÁSI KÉRDÉSEI NUKLEÁRIS VESZÉLYHELYZETBEN

Manga László^{1*}, Deme Sándor² és Vincze Árpád³

¹MVM Paksi Atomerőmű Zrt. 7031 Paks, pf. 71

²MTA Energiatudományi Kutatóközpont, 1121 Budapest, Konkoly-Thege Miklós út 29–33

³Országos Atomenergia Hivatal, 1036 Budapest, Fényes Adolf utca 4

*mangal@npp.hu

A kézirat beérkezett: 2019.07.04.

Közlésre elfogadva: 2019.10.07.

Environmental radiation monitoring in a nuclear emergency

Kapitány and Vincze [1] have described the theoretical bases of the implementation of protective actions and pointed out that decisions should be based on Operation Intervention Levels (OIL).

In this paper we discuss the practical issues of the environmental determination of OILs, especially OIL1 that justifies sheltering and evacuation measures, if greater than 1 mSv/h gamma-radiation dose rate is originating from soil contamination.

The question we address is that when, by what means, and where the dose rate should be measured after the onset of the accident and how the measurement results should be interpreted. We address how the data of the environmental monitoring stations of the Paks NPP can be used in selecting the most appropriate measurement areas. An important issue is to determine the conditions for using radiological survey vehicles (car, helicopter).

Based on IAEA documents we also present the derivation of the OIL1 1 mSv/h ambient dose rate for pressurized water reactors.

Keywords: nuclear emergency, intervention level, protection strategy

Kapitány Sándor és Vincze Árpád "A lakossági óvintézkedések bevezetésének feltételei veszélyhelyzetben" c. cikkükben [1] bemutatják az óvintézkedések bevezetésének elméleti kérdéseit. Ebben ismertetik, hogy az óvintézkedések bevezetése a Származtatott Intézkedési Szintek (SZISZ) alapján történhet.

Jelen cikkünkben a SZISZ környezeti meghatározásának gyakorlati kérdéseit vizsgáljuk, ezek közül is az elzárkóztatást, a kimenekítést megalapozó SZISZ1-et, amelyik a talajfelszín szennyezettségéből eredő 1 mSv/h gamma-sugárzás dózisteljesítményt jelenti.

A kérdés az, hogy ezt a dózisteljesítményt a baleset kezdete után mikor, milyen eszközzel és hol kell mérni és a mért eredményeket hogyan kell értelmezni. Foglalkozunk azzal, hogy a Paksi Atomerőmű környezet-ellenőrző távmérő állomásainak adatait hogyan lehet felhasználni a mérési területek kiválasztásában. Fontos kérdés a felmérő jármű (gépkocsi, helikopter) alkalmazásának feltételeinek meghatározása.

Kulcsszavak: nukleáris veszélyhelyzet, intézkedési szint, felmérési stratégia

BEVEZETÉS

Kapitány Sándor és Vincze Árpád "A lakossági óvintézkedések bevezetésének feltételei veszélyhelyzetben" c. cikke (Sugárvédelem, XI. évf. (2018) 2. szám. 1–7) az óvintézkedések bevezetésének elméleti kérdéseivel foglalkozott. Ez a cikk azzal fejeződik be, hogy az óvintézkedések bevezetése a Származtatott Intézkedési Szintek (SZISZ) alapján történhet.

E cikkünkben az intézkedések bevezetésének gyakorlati kérdéseivel foglalkozunk, ezek közül is az elzárkóztatást, a kimenekítést megalapozó SZISZ1-gyel, amely a talajfelszín szennyezettségéből eredő, 1 m magasan mért 1 mSv/h gamma-dózisteljesítményt jelenti [2]. Ez az érték az atomerőműnél a 30 km-es körzetre és a korai időszakra vonatkozik [3]. (A SZISZ1 levezetését a Függelék mutatja be.)

A származtatott intézkedési szint mérése több gyakorlati kérdést vet fel, ezek közül annak a kérdésével foglalkozunk, hogy

- mikor kell mérni
- hol kell mérni
- mivel kell mérni
- hogyan kell mérni
- hogy kell a mérési eredményeket értékelni.

MIKOR KELL MÉRNI?

Az általános veszélyhelyzeti intézkedések szempontjából el kell különíteni az elzárkóztatást és a kimenekítést. Az elzárkóztatás elrendelhető már olyan veszélyhelyzetben is, amikor még nem kezdődött el a kibocsátás, viszont a kimenekítés kritériuma, a SZISZ1 értékének meghaladása bekövetkezhet.

A talajszennyezettségből eredő gamma-sugárzás dózisteljesítmény területi eloszlását a csak kibocsátás megszűnése után célszerű meghatározni, mert a kibocsátás tartama alatt a talajszennyezettség, így a dózisteljesítmény is még növekedhet.

A kibocsátás időfüggése szempontjából vizsgáljuk meg a súlyos balesetek várható lefolyását. A súlyos sugárbaesetek csak a hűtés teljes elvesztése miatt bekövetkező zónaolvadás esetén következnek be. A láncreakció leállása után a zónaolvadás kezdetének időpontja elsősorban attól függ, hogy a zóna mennyi idő alatt veszíti el hűtését. A zónaolvadás kevesebb, mint fél óra után már bekövetkezhet, de ha a vízvesztés lassú ütemű, akkor a zónaolvadás kezdete a reaktor leállításától számítva akár 10 óra is lehet. Ez azt jelenti, hogy a baleseti esemény és a jelentős baleseti kibocsátás kezdete között jelentős idő is eltelhet.

Ha a baleset teljes feszültségkimaradással jár, akkor nem működnek a szellőzőrendszerek és a kibocsátás nem a szellőzőkéményen át, hanem kis magasságban, főként a reaktorcsarnok falának tömítetlenségein keresztül megy végbe. Ezt az esetet épületkibocsátásnak nevezzük. Ha van áramellátás, akkor aeroszolra és jódra szűrni lehet a szellőzőkéményen át kibocsátott levegőt, a helyiségekben – a környezethez képest – depresszió keletkezik, ezért – nem lehet épületkibocsátás.

A kibocsátás tartama alatt általában a kis járulékos kockázattal járó elzárkóztatás elrendelése valószínűsíthető. A baleset-elhárítási intézkedési tervek lehetővé teszik, hogy a lakosság elzárkóztatását már a tényleges kibocsátás kezdete előtt el lehet rendelni, ha a technológiai helyzet alapján jelentős környezeti kibocsátás következhet be. Az elzárkóztatás maximális ideje 48 óra lehet, ezt csak nagyon indokolt esetben lehet meghosszabbítani. (A baleseti analízisek alapján általában 24 óra elegendő a zóna hűtésének helyreállítására.)

Az elzárkóztatás jelentősen csökkenti a lakosság dózist az elzárkóztatás nélküli esethez képest. A dózis elsősorban a nagyobb épületekben csökken, ahol a talajsugárzás dózisa akár a védelem nélküli érték ötvened részére is csökkenhet (1. táblázat).

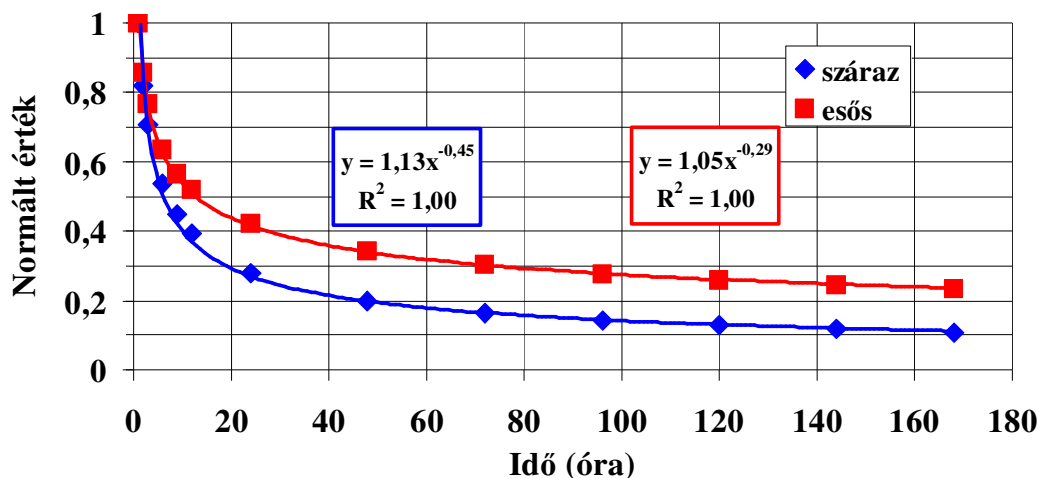
Ki kell emelni a talajszennyezettség szerepét a lakosság sugárterhelése szempontjából. Ennek oka, hogy míg a felhő csak a csóva elhaladási ideje alatt sugároz, addig a talajszennyezettség folyamatos sugárterhelést okoz és annak intenzitása a kibocsátás után a lebomlásnak megfelelően csökken (1. ábra). A csökkenést fokozza a talajba való bemosódás is, ezt azonban annak bizonytalansága miatt nem vettük figyelembe. Az ábrán megadott görbék a

résaktivitás kibocsátásának felelnek meg [4], a jód esetében elemi állapotot feltételezve. A száraz és az esős időre vonatkozó görbék azért különböznek, mert a száraz ülepedés eltérő az aeroszolokra és az elemi jódra, míg ugyanerre a két csoportra a kimosási tényező azonos. Megállapítható, hogy az adott esetben a 48 órás elzárkóztatás alatt a kezdeti, talajszennyezettségtől származó dózisteljesítmény az eredeti érték ötödére, illetve a harmadára csökken.

1. táblázat. Dóziscsökkentő tényezők a lakossági intézkedéseknél [2]

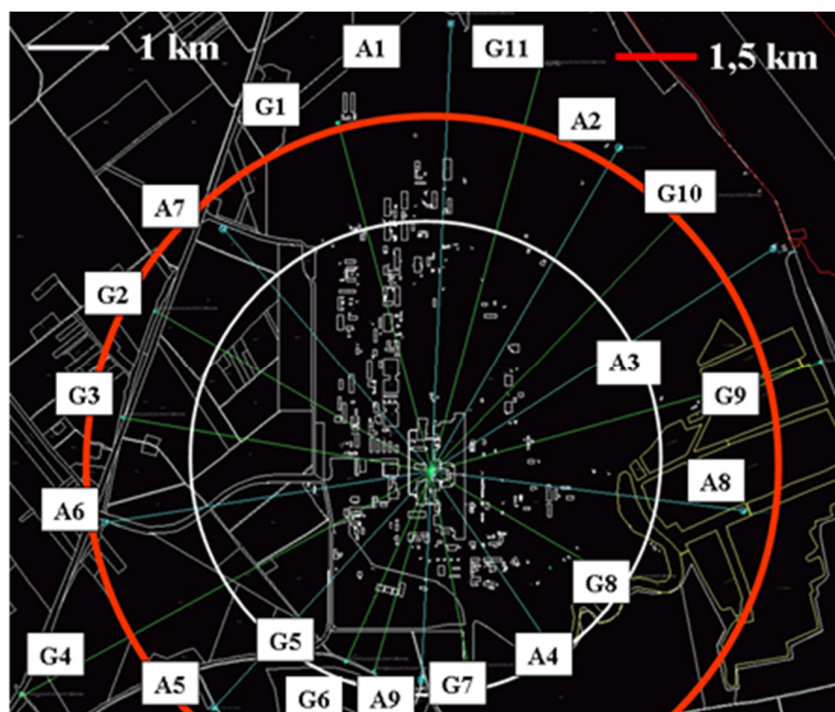
A lakossági intézkedések	Redukciós tényező	Dózisterhelési útvonal
Elzárkóztatás egyszerű épületben	0,4	Talajsugárzás
	0,6	Felhősugárzás
	0,5	Inhaláció*
Elzárkóztatás nagyméretű épületben	0,02	Talajsugárzás
	0,3	Felhősugárzás
	0,2	Inhaláció*
Jódtabletta bevétele	0,1	Pajzsmirigy és anyaméh dózisa a radiojód inhalációja révén

*a légcsere sebességétől függ



1. ábra. Az egy óra időtartamú kibocsátás után a talajfelszíni sugárzás 1. óra végére normált, relatív intenzitása az eltelt idő függvényében száraz időjárásnál és a kibocsátás idején 5 mm/h esőnél [4].

A sugárzási szint pontos felmérését csak a kibocsátás megszűnése után lehet elvégezni. A paksi atomerőmű esetében a kibocsátás megszüntének időpontját legegyszerűbben a környezeti mérőállomásokon (2. ábra) elhelyezett gamma-sugárzást mérő szondák jelzése alapján lehet meghatározni. Ha a szondákkal mért dózisteljesítmény mindegyik mérőállomáson csökken, akkor a kibocsátást megszüntnek tekinthetjük és meg lehet kezdeni a kiülepedésből származó gamma-sugárzási szint felmérését.



2. ábra. Az A és G típusú állomások, a környezeti gamma-sugárzás mérőpontjai. A fehér kör sugara 1 km, a piros köré 1,5 km az erőmű kéményeinek középpontjától számítva.

HOL KELL MÉRNI?

A "hol kell mérni" kérdés azért előzi meg a "mivel kell mérni" kérdést, mert a mérés helyszíne meghatározza azt is, hogy mivel lehet mérni. Az OBEIT 3.5 (2. verzió) [5] baleseti monitorozási stratégiai útmutató a következőket mondja. "A méréseket ideálisan sík terepen, járművektől, fáktól, épületektől, utaktól távol kell elvégezni. Elsőként azok a területek vizsgálandók, ahol a csóva felmérése során a legnagyobb dózisteljesítményeket találták. Elsőbbséget kell adni azoknak a helyeknek is, ahol a csóva áthaladása alatt csapadék hullott."

A környezeti mérőállomások gamma-szondáinak jelzése alapján megadhatók azok az irányok, amelyeknél a dózisteljesítmény a legnagyobb. A csapadékra vonatkozóan az erőmű mérései csak az erőmű közvetlen környezetére vonatkoznak, de az OMSZ mérései alapján kijelölhetőek a kibocsátás ideje alatti csapadékos területek.

Az ideálisan sík terepen, járművektől, fáktól, épületektől, utaktól távoli pontok nem relevánsak a lakosság szempontjából, ezért a települések területén is mérni kell a kiüledés dózisteljesítményét. Az elsődleges felmérést célszerű a gépkocsival, az utakon haladva végezni, meghatározva azt a pontot, ahol a dózisteljesítmény eléri a 0,1, illetve az 1 mSv/h értéket, majd ahol a dózisteljesítmény lecsökken 1, illetve 0,1 mSv/h érték alá. Amennyiben a megadott dózisteljesítmények lakott helyen lépnek fel, akkor az adott helyen az eredeti útirányhoz képest keresztirányú mérésekre is szükség van.

A paksi erőmű esetében különböztessünk meg két alapesetet. Ha a legszennyezettebb területek az erőműhöz képest Dunával ellentétes, nyugati irányban vannak, akkor a felmérésre a 6-os úton való végighaladás a célszerű, ellenkező esetben viszont a Duna bal parti települések átmenő útjainak felmérése javasolt.

MIVEL KELL MÉRNI?

A kérdés kettős. Az egyik, hogy milyen műszerrel, a második pedig hogy milyen közlekedési eszközzel.

A műszer legyen alkalmas a természetes háttértől, azaz 100 nSv/h-tól legalább 100 mSv/h-ig mérni. Az érzékenység mellett fontos az is, hogy érzékenysége, azaz (imp/s)/(nSv/h) legyen minél nagyobb, hogy a felmérési időt csökkenteni, jármű esetén a haladási sebességet növelni lehessen. Ez a térbeli felbontás romlásával jár, de adott esetben gyorsaság ennél fontosabb tényező.

A feladat elvégzésére elsősorban a hazai fejlesztésű, dózisteljesítmény mérésére alkalmas műszerek jöhetnek számításba. Ilyenek a légi sugárfelderítésből ismert nagyfelületű SZBT-10-es GM csövet tartalmazó detektorok (pl.: BNS-98, BNS-98L), de a felderítés kapcsán a spektrum felvételére alkalmas félvezető PIN dióda is sok előnyös tulajdonsággal rendelkezik [7].

A gépjárműves felderítés terén megemlíthetjük az Ø75×50 mm-es NaI(Tl) szcintillációs detektort tartalmazó BNS-94FM-et [8], vagy a GM-csövet és félvezető detektort is tartalmazó IH-99D-t vagy az érzékenyebb IH-99 DM-et [9]. Amennyiben a nemzetközi piacot is figyelembe vesszük, a műszerpaletta még szélesebb.

A második kérdés a közlekedési eszköz megválasztása. A legkézenfekvőbb olyan terepjáró gépkocsi használata, amelynek mérőműszere egy térképes megjelenítő rendszerhez csatlakozik. Előnyt jelent, ha a mért adatok egy távoli vezetési ponton valós időben megjelenhetnek. Nagymértékű környezetszennyeződés esetén megoldást jelent páncélozott (sugárárnyékoló) jármű vagy helikopter felhasználása. Ki kell emelni, hogy a légi járművekkel végzett mérések csak nagyságrendi becslésre és a földi mérési terület kijelölésére alkalmasak.

A helikopteres felderítés kapcsán rendelkezünk hazai tapasztalattal. E szerint 300 km²-t lehet 1 óra alatt felderíteni 150–180 km/h sebességgel 80–100 méteres magasságból [10]. Ezek a paraméterek függnak a helikopter típusától, a képzett személyzet létszámától, a műszerek érzékenységétől és üzemidejétől és egyéb jellemzőktől.

Másik légi felderítési módszer az egyre inkább elterjedt pilóta nélküli technika, amely téren ugyancsak rendelkezünk hazai tapasztalattal. A SZOJKA-III típus S-6, S-2 (Si/Li) félvezető detektorokkal és SZBT-10-es GM csővel képes nagyságrendi becslést adni 500 µGy/h feletti földi sugárszintű területről 300 méteres magasságból 160 km/h sebesség mellett [7]. A pilóta nélküli repülő másik családjába tartozó drónos felderítés terén is vannak már hazai fejlesztések, de egyelőre kísérleti szinten. Nagy előnyük a helikopteres felderítéshez képest, hogy lényegesen olcsóbbak és több drón együttes alkalmazása révén rövidebb idő alatt nagy területek felderítésére van lehetőség, akár sokkal alacsonyabb magasságokban is, ugyanakkor a kisméretű drónok érzékenyebbek az időjárásra.

A másik ugyancsak gyorsnak mondható felderítési módszer a gépjárműves felderítés. Ezen a téren is rendelkezünk hazai fejlesztésű típusokkal. Ilyenek például a katonai alkalmazásra készült Komondor ABVF vagy az FABV [8], illetve a katasztrófavédelemnek készült KML gépjárművek [8].

Az alkalmazott jármű fajtájától függ a műszer elhelyezése a járművön. Fontos, hogy az elhelyezés jó látószöget biztosítson az alatta található terep felmérésére. A pilóta nélküli repülőknél esetén a jármű alsó pontja a logikus választás az előzőekben már említettek miatt.

A gépjárműves felderítés esetén már nem ennyire egyszerű a helyzet. A páncélozott katonai járművek esetén a páncéltól adódó sugárárnyékolást figyelembe kell venni. Ebből adódik, hogy egyrészt a járművön kívüli elhelyezés a praktikus, mert ilyenkor nem kell külön számolni a páncélzat vastagságából adódó gyengítési együtthatóval, másrészt a detektorok darabszáma a meghatározó. Ezek változhatnak 2-4 detektor között. Két detektor esetén a

180°-os, 3 detektor esetén 120°-os és négy detektor esetén a 90°-os elhelyezésről beszélhetünk. Fontos még a detektorok esetén a jármű felőli árnyékolás. Ez esetben magának a járműnek az árnyékoló hatását is jól ki lehet használni [9]. Az egyéb (nem sugárárnyékoló) gépkocsik esetén a detektorok elhelyezését ez a tényező kevésbé befolyásolja, viszont a benne ülő személyzet sugárzásnak való kitettsége ebben az esetben sokkal nagyobb.

Fontos továbbá, hogy a műszert megfelelő burkolóanyaggal védeni kell az elszennyeződéstől, például könnyen cserélhető védőfólia használatával.

HOGYAN KELL MÉRNI?

Légi felderítés esetén kiterjedt szennyezettségre a sugárszint az alábbiak szerint határozható meg (IH-31L műszerre) [6] :

$$P_1 = k_1 P_h^{k_2 h} \quad (1)$$

P_1 = sugárszint, Gy/h;

P_h = h magasságon mért dózisteljesítmény, Gy/h;

h = mérési magasság, m;

k_1 = terepviszonytól függő elnyelési faktor (1,7 – 2);

k_2 = légköri elnyelési faktor (0,007 - 0,012), m⁻¹

A k_1 és k_2 értékei alapján két függvényt lehet használni. A mai korszerűbb műszerek esetén – nagyfelületű szennyeződés kiterjedésre – a függvények száma 12 vagy 24 is lehet, amit a kezelő személyzet állít be a környezeti paramétereknek megfelelően.

Ugyancsak lehetőség van egy magyar szabadalom [11] szerint két, vagy több magasságon mért dózisteljesítmény adatokból görbeillesztéssel (pl.: legkisebb négyzetek módszere) meghatározni a megfelelő gyengítési tényező függvényét és a továbbiakban a légköri viszonyok, a repülési magasság és a terepviszonyok változatlanlansága esetén azt felhasználni a sugárszint meghatározására [7].

Amennyiben figyelembe vesszük a magassági gyengítési tényezőt (a földfelszín és a detektor közötti légréteg gyengítését) az időjárási és terepviszonyokat, akkor is csak közelítőleg tekinthetjük a földi felderítéssel egyenértékűnek a mérést. Másik nagyon fontos tényező a megfelelő felbontás. A mérési ciklus 0,5 másodperc. Hazánkra jellemző átlagos háttérsugárzás 80 nGy/h. Ha a sugárzás intenzitása 280 nGy/h-ra nő, akkor ezt a növekedést a műszer már jelzi. [7].

A gépjárműves felderítés során ugyancsak az 1 méteres referenciamagasság a mérvadó a detektorok látószögének és a gépjármű árnyékolási képességének megfelelő korrekciós tényezőket alkalmazva, a detektorok darabszámát figyelembe véve.

Ezek ismeretében még mindig van egy nehezen megoldható kérdés, a mérés reprezentativitásának biztosítása, különösen akkor, ha a kibocsátás idején esett az eső.

Ilyen esetben – amennyiben van rá lehetőség – célszerű kombinálni a légi és szárazföldi felderítést. A gépkocsis felmérés alkalmas a részletesen vizsgálandó, az 1 mSv/h dózisteljesítményt meghaladó területek határának kijelölésére. A gépkocsival történt mérésnél alapvetően az útfelület szennyezettségét mérjük. Száraz időben ez irányadó lehet, de esős időben történt kibocsátásnál az utak szennyezettsége lényegesen kisebb, az útról lefolyt csapadék útvonala pedig nagyobb a középértéknél. Az átlagos kiülepedés mérésére a fűvel borított vízszintes területek (parkok, futballpályák) az ideálisak, amelyek csak terepjáró gépkocsival közelíthetők meg. Kisebb kiterjedésű területek esetén egyszerű, többpropelleres

(kvadro-, oktokopterek) drónok, nagyobb kiterjedésű területek esetén merevszárnyú, pilóta nélküli vagy helikopter alkalmazása optimálisabb.

HOGY KELL A MÉRÉSI EREDMÉNYEKET ÉRTÉKELNI?

A döntéshozó szervek felé minden releváns mérési eredményt meg kell adni, törekedve arra, hogy a mérési pontok elsősorban ott legyenek, ahol a normál életvitelnél a lakosság jelentős időt tölt.

Ebben nagy segítséget nyújtanak a különböző sugárzási és meteorológiai paramétereket mérő távadók, illetve a döntést támogató rendszerek. A szoftverek segítségével lehetőség van az adatok megszürésére, illetve előrejelzésekre is.

Mivel ilyen helyzetben a döntéshozók nagy nyomás alatt vannak (sok az információ, időkényszer, minél gyorsabb kommunikáció), ezért igyekezni kell a döntés szempontjából releváns eredmények közlésére. Amennyiben a telepített távadó állomások nem szolgáltatnak elegendő adatot a döntés meghozatalához, akkor szükség van a mobilizálható erők bevetésére. Ezek azok a technikák, amelyeket az előzőekben ismertettünk. Mivel ilyenkor az idő az egyik legfontosabb tényező a lakossági óvintézkedések minél hamarabbi meghozatala érdekében, ezért a gyalogos felderítési módszerekre nem térünk ki.

FÜGGELÉK. A SZISZ1 LEVEZETÉSE

A SZISZ1-ként a talajfelszín felett 1 m magasan mért dózisteljesítményt használjuk, az I-II veszélyhelyzeti tervezési kategóriába tartozó létesítmények esetén a veszélyhelyzet korai időszakában (első hét nap), a MÓZ-SÓZ területén. Az erre vonatkozó általános kritériumok a következők: 100 mSv effektív dózis, 100 mSv magzati és 50 mSv pajzsmirigy egyenértékű dózis az első hét napra integrálva ($\dot{A}K(sürgős, 7 nap)$) [3].

A SZISZ1 érték feletti mérési eredmény esetén a jódpofilaxis, az elzárkózás és a kimenekítés sürgős óvintézkedések közül a biztonságos azonnali kimenekítés javasolt [12]. Amennyiben ez nem lehetséges, akkor biztonságos helyen történő elzárkóztatást és jódpofilaxist célszerű elrendelni, amíg a biztonságos kimenekítést nem lehet megoldani. A kimenekített lakosság regisztrációja, monitorozása, dekontaminálása és orvosi szűrésének szükségessége egyéb SZISZ értékek mérése alapján dönthető el [12].

A SZISZ1 származtatása az alábbi megfontolásokon alapul:

A kiindulási, lehetséges forrástagok egyrészt a 3000 MW hőteljesítményű, különböző kiegészítési szintű PWR és BWR reaktor zónákra végzett súlyos baleseti események elemzéséből, másrészt korábbi balesetek tapasztalatai alapján (csernobil, fukushima) kerültek meghatározásra. A sugárterhelés szempontjából a nagyon kis mennyiségben kibocsátható, vagy elhanyagolhatóan kis dózist okozó hasadvány-termékeket nem vesszük figyelembe a forrástagok jellemző összetételének meghatározásakor (nemesgázok, nagyon rövid felezési idejű izotópok). Ennek megfelelően 19 jól elkülöníthető forrástag került meghatározásra a zóna leállása után eltelt idő függvényében ($A(t, mix)$) [12].

A fentiek szerint meghatározott forrástag-idő függvények mindegyikére kiszámításra kerül a SZISZ1 érték időbeli függése ($SZISZ1(t, mix)$) alábbi lépések szerint:

1. Az egyes forrástagokban (mix) lévő valamennyi izotóp relatív aktivitását meghatározzuk a zóna leállást követő idő (t) függvényében ($RA_i(t, mix)$):

$$RA_i(t, mix) = \frac{A_i(t, mix)}{\sum_{j=1}^n A_j(t, mix)}$$

ahol n a figyelembe vett radionuklidok száma és $A_i(t, mix)$ az alábbi módon kerül meghatározásra:

$$A_i(t, mix) = I_{\bar{u},i}(t) \times RF_i(mix), \text{ ahol}$$

- $I_{\bar{u},i}(t) = I_{\bar{u},i}(t_0) \times e^{-\lambda_i \times (t-t_0)}$,
 - $I_{\bar{u},i}(t_0)$ az $\bar{u}$ típusú üzemanyagban az i izotóp teljes mennyisége a leállást követő 30. percben ($t_0=1800$ s), a második tag a bomlás korrekció a t_0 idő óta eltelt idő különbségre számítva, és
 - $RF_i(mix)$ az adott mix forrástag esetében az i izotóp kibocsátási hányada.
2. Vonatkoztatási személy meghatározása az ICRP ajánlásai alapján. A vonatkoztatási személy egy elméleti modell, nem az érintett lakosság egy konkrét tagját értjük alatta. A modell konzervatív módon egyesíti az ICRP által bevezetett különböző korú vonatkoztatási személyek belső és külső dózis modelljeit úgy, hogy az adott besugárzási útvonalon a legnagyobb dózisterhelést kapjuk. Ezzel biztosítható, hogy az érintett lakossági csoport egyik tagja sem kaphat a vonatkoztatási személyre számítható dózissal nagyobb sugárterhelést [13].
 3. Besugárzási útvonalak és a vonatkozó dóziskonverziós tényezők meghatározása. Ezzel kapcsolatban feltesszük, hogy az érintett lakosság normál életet él 7 napig, azonban nem fogyaszt a szennyezett területről származó élelmiszert, tejet vagy ivóvizet, mert feltételezzük, hogy az általános veszélyhelyzet kihirdetése miatt az élelmiszer-fogyasztási korlátozások megelőző óvintézkedésként már bevezetésre kerültek. A SZISZ1 esetében csak a talajra kihullott szennyezettségtől származó dózist vesszük figyelembe, a radioaktív felhőtől származó külső és annak belélegzésétől származó belső dózisokat nem, hiszen feltesszük, hogy az általános veszélyhelyzet kihirdetése alapján bevezetett megelőző óvintézkedések ezek elkerülését lehetővé tették.
 4. A talaj szennyezettségétől származó sugárterhelés számítása során az alábbi besugárzási forgatókönyveknek megfelelő dózisokat számítottuk: az alábbi referencia személyekre [12]:
 - a. a talajra kihullott radioaktív izotóptól származó, az egyéves gyermeket érő külső effektív dózis és az embriót érő egyenérték dózis 7 napra integrálva;
 - b. a talajra kihullott radioaktív izotópok természetes visszaporlódása során a levegőbe visszajutott izotóptól származó, az 1 éves gyermeket érő külső effektív dózis és az embriót érő egyenérték dózis 7 napra integrálva;
 - c. a talajra kihullott radioaktív izotópok természetes visszaporlódása során a levegőbe visszajutott izotópok belélegzéséből származó, könnyű fizikai terhelésnek kitett légzési sebességű felnőttet érő lekötött effektív dózis és hasonló körülményeknek kitett állapotos nő esetében az embriót érő lekötött egyenérték dózis;
 - d. radioaktív por véletlen lenyeléséből származó, átlagos mozgás aktivitással jellemezhető gyerek lekötött effektív dózisa és hasonló körülményeknek kitett állapotos nő esetében az embriót érő lekötött egyenérték dózis;
- Az egyes besugárzási útvonalakhoz tartozó izotópspecifikus (i) dóziskonverziós tényezők (teljes effektív dózis Δ időre integrálva $E_{\text{talaj},i}(\Delta)$ [Sv/(Bq/m²)], illetve az embriót érő egyenérték dózis $H_{\text{talaj,emb},i}(\Delta)$ [Sv/(Bq/m²)] levezetése és értékei a [12] irodalomban találhatók, részletezésüktől itt eltekintünk.
5. A környezeti dózisegyenérték-teljesítmény meghatározása. A SZISZ1 esetében a környezeti dózisegyenérték-teljesítményt $H^*(10)$ mérjük 1 m magasságban, amelyet a

fentebb ismertetett dóziskonverziós tényezők ismeretében az alábbi módon tudunk számítani.

Meghatározzuk az adott i izotóp egységnyi felületi aktivitása esetén mérhető környezeti dózisegyenérték-teljesítményt [$H^*_{talaj,i}$ [(Sv/s)/(Bq/m²)] az alábbi egyenlet alapján.

$$H^*_{talaj,i} = e_{sik,i}(felnőtt) \times CorF_{talaj} \times SF_{e \rightarrow H^*}$$

ahol $e_{sik,i}(felnőtt)$ [(Sv/s)/(Bq/m²)] az egységnyi felületi aktivitás-koncentrációjú i izotóppal egyenletesen szennyezett végtelen síkra számítható effektív dózisteljesítmény, $CorF_{talaj} = 0,7$, a talaj egyenetlenségére vonatkozó korrekciós faktor és $SF_{e \rightarrow H^*} = 1,4$ scaling-faktor, amely a releváns foton-energiák esetében a mérhető környezeti dózisegyenérték-teljesítmény és az effektív dózis-teljesítmény hányadosa.

A SZISZ1 értékének számítása forrástagonként az idő függvényében ($SZISZ1(t, mix)$ [μSv/h]) az alábbi egyenlet alapján történik:

$$SZISZ1(t, mix) = \left(\sum_i (RA_i(t, mix) \times H^*_{talaj,i}) \right) \times WF_{SZISZ1} \times UC \times DA_{SZISZ1}(t, mix)$$

ahol

- $WF_{SZISZ1} = 3$, biztonsági tényező annak elkerülésére, hogy a SZISZ1 feletti mérési eredmény alapján nem indokolt beavatkozást rendeljenek el, $UC = 3,6 \times 10^9$ (μSv/h)/(Sv/s) dimenziókonverziós tényező.
- $DA_{SZISZ1}(t, mix)$ [Bq/m²] az adott mix forrástagnak megfelelő izotóp-összetétel esetében az a legkisebb összes felületi aktivitáskoncentráció érték ($A_{SZISZ1}(t, mix)$), amely esetében már az SZISZ1-hez tartozó általános dóziskritérium (ÁK(sürgős, 7 nap)) valamelyike teljesül. Általánosságban egy adott általános kritériumhoz tartozóan ez a feltétel a következőképp írható fel:

$$A_{SZISZ1}(t, mix) \times \left(\sum_i (E_{talaj,i}(7 \text{ nap}) \times RA_i(t, mix)) \right) \geq \text{ÁK(sürgős, 7 nap)}$$

A [12] irodalom szerint a fentiek alapján számított SZISZ1(t,mix) függvények mindegyik forrástag esetében a 1000 μSv/h állandó értéknek megfelelő vonal felett helyezkednek el, ezzel konzervatív módon biztosítható, hogy a SZISZ1 érték feletti mérés esetén nagy valószínűséggel a kapcsolódó általános kritérium teljesül, tehát a sürgős beavatkozás indokolt.

HIVATKOZÁSOK

- [1] Kapitány Sándor, Vincze Árpád: A lakossági óvintézkedések bevezetésének feltételei veszélyhelyzetben, Sugárvédelem, XI. évf. (2018) 2. szám. 1–7.
- [2] Actions to Protect the Public in an Emergency due to Severe Conditions at a Light Water Reactor. EPR-NPP Public Protective Actions. IAEA, Vienna (2013)
- [3] Országos Nukleárisbaleset-elhárítási Intézkedési Terv (v3.0, 2018. február)
- [4] Deme Sándor, Pázmándi Tamás, C. Szabó István, Szántó Péter. Az általános környezeti veszélyhelyzet létrejöttét befolyásoló tényezők vizsgálata, Sugárvédelem VII. évf. (2014) 1. szám. 43–56
- [5] OBEIT 3.5 útmutató 2. verzió (2014). OAH honlap.

- [6] Zelenák János, Csurgai József, Halász László, Solymosi József, Vincze Árpád: A légi sugárfelderítés képességei alkalmazhatóságának vizsgálata elveszett, vagy ellopott sugárforrások felkutatása, illetve szennyezett terepszakaszok felderítése során, Hadmérnök IV. évf. (2009) 1. szám 46-62
- [7] Nagy Gábor, Bäumlér Ede, Csurgai József, Molnár László, Pintér István, Vincze Árpád, Zelenák János, Solymosi József: PIN dióda alkalmazhatósága pilóta nélküli légi sugárfelderítésben, Repüléstudományi Konferencia, Szolnok, 2009
- [8] Gamma Műszaki Zártkörű Részvénytársaság weblap link: <http://www.gammatech.hu/?module=downloads&lang=hun&category=datasheets#bns94fm.pdf> (letöltés ideje: 2019.03.22)
- [9] Reinhardt Anikó, Bäumlér Ede: Járműfedélzeti sugárszintmérő detektorok elhelyezésének optimalizálása, XXXVI. Sugárvédelmi Továbbképző Tanfolyam, Hajdúszoboszló, 2011. Bäumlér 2011
- [10] Zelenák János, Nagy Gábor, Csurgai József, Molnár László, Pintér István, Bäumlér Ede, Solymosi József: A légi sugárfelderítés képességei alkalmazhatóságának vizsgálata elveszett, vagy ellopott sugárforrások felkutatása, illetve szennyezett terepszakaszok felderítése során, Repüléstudományi Konferencia, Szolnok, 2009
- [11] Solymosi József, Bäumlér Ede, Nagy Lajos György, Gujgiczér Árpád, Gresits Iván, Zagyvai Péter, Dorogi László, Vodicska Miklós, Vajda Nóra, Takács Márta: Eljárás és berendezés ismeretlen összetételű és/vagy többkomponensű főként hasadási termékekkel kontaminált terepszakaszok sugárszintjének légi felderítésére, HU 201161 B Szolgálati találmány.
- [12] EPR-NPP-OILs (2017) – „Operational intervention levels for reactor emergencies and methodology for their derivation. IAEA, Vienna (2017).
- [13] International Commission on Radiological Protection, Assessing Dose of the Representative Person for the Purpose of the Radiation Protection of the Public and the Optimisation of Radiological Protection: Broadening the Process, ICRP Publication 101, Elsevier, Oxford (2006).

Készült a SOMOS Alapítvány támogatásával

40 ÉVES LETT A PILLE

Deme Sándor, Apáthy István, Csőke Antal, Hirn Attila

Energiatudományi Kutatóközpont
1121 Budapest, Konkoly-Thege Miklós út 29-33.
*deme@aeki.kfki.hu

A kézirat beérkezett: 2019.10.03

Közlésre elfogadva: 2019.11.05.

Pille became 40 years old

As of this year, in 2019, it was 40 years ago that Pille, the best-known Hungarian space equipment was completed, tested and waited for its delivery to the Salyut-6 space station, with the first Hungarian cosmonaut on board Soyuz-34, to perform measurements with the instrument. However, due to the almost-tragedy of Soyuz-33, the space flight of the Hungarian cosmonaut was delayed by one year. The Pille was delivered to Salyut-6 by Bertalan Farkas, on board Soyuz-36, where he performed successful measurements with the first-ever TL dosimeter system with an on-board reader.

Measurements have been conducted with later versions of Pille with upgraded electronics on board each permanent space stations operated since then. Moreover, a special version of the Pille system has also made it to the US Space Shuttle. Pille is currently operated as part of the on-board service dosimeter system in the Russian segment of the International Space Station (ISS). The Pille on-board reader performs automatic read-outs every 90 minutes, approximately after each full orbit around the Earth. Thanks to this, there are tens of thousands of dosimetric data available from the ISS.

And the story is not over. In summer of 2018, a new Pille system was delivered to ISS to replace the system already operating continuously and reliably there for 15 years. According to the plans, the new system will serve the cosmonauts until the end of the lifetime of the ISS, at least until year 2024.

In our paper, we are going to present the main stages of the development of Pille and its results. The main features of the different versions of the instrument will be also given. We are going to briefly mention Pille's cousin on Earth, PorTL, which is also used in the environment monitoring system of Paks NPP.

Keywords: Pille, space dosimetry, space stations, on board TLD system

Ebben az évben, 2019-ben volt 40 éve annak, hogy a legismertebb hazai, űrben használt műszer, a Pille elkészült; bevizsgálva várta, hogy a Szojuz-34 űrhajón egy magyar űrhajóssal együtt felkerüljön a Szaljut-6 űrállomás fedélzetére, és ott a magyar űrhajós mérjen vele. De a Szojuz-33 majdnem tragédiája miatt a magyar űrutazás egy évet késett. A berendezés első példányát 1980 májusában Farkas Bertalan a Szojuz-36-on vitte magával a Szaljut-6 űrállomásra, ahol a Pillével, az első űrállomás-fedélzeti TL dózismérő kiértékelő rendszerrel sikeres méréseket végzett.

A Pille különböző, elsősorban elektronikai szempontból továbbfejlesztett változataival azóta valamennyi állandóan lakott űrállomás fedélzetén végeztek méréseket, sőt, az amerikai űrsikló fedélzetére is eljutott. Jelenleg a Nemzetközi Űrállomás (ISS) orosz szegmensében a szolgálati dozimetriai rendszer részeként üzemel, de űrséták esetén az európai, amerikai, kanadai, japán űrhajósok is használják a Pille dózismérőit. A műszer az űrállomás minden Föld körüli fordulatánál, másfél óránként automatikus kiolvasást is végez, ennek révén több tízezer nagy időbeli felbontású dózismérési adat áll rendelkezésünkre.

A történet pedig közel sem ért véget. Legutóbb 2018 nyarán jutott fel a Pille legújabb példánya, hogy az ott már 15 éve folyamatosan és megbízhatóan működő rendszert leváltsa. A tervek szerint a Pille rendszer egészen az űrállomás élettartamának végéig, azaz legalább 2024-ig fogja szolgálni az űrhajósokat az ISS fedélzetén.

Közleményünkben bemutatjuk a Pille fejlesztésének szakaszait, eredményeit, ismertetjük a különböző változatok főbb jellemzőit. Megemlékezünk földi unokatestvéréről, a PorTL készülékről is, amit többek között a paksi atomerőmű környezetellenőrző rendszerében használnak.

Kulcsszavak: Pille, űrdozimetria, űrállomások, fedélzeti TLD rendszer

MIÉRT 40 A 39?

Közismert, hogy a Pille berendezés első példányát 1980 májusában Farkas Bertalan a Szojuz-36-on vitte magával a Szaljut-6 űrállomásra, ahol a Pillével, az első űrállomás fedélzeti TL dózismérő kiértékelő rendszerrel sikeres méréseket végzett. Felmerül a kérdés, hogy 2019-ben, e cikk megírásának időpontjában, 39 évvel az ürrepülés után hogyan lehet 40 éves a Pille.

A válasz egyszerű. Az eredeti tervek szerint Farkas Bertalan repülése 1979-re volt betervezve, mi ennek megfelelően 1979 tavaszára elkészítettük a Pillét, átadtuk a szovjet partnerintézetnek vizsgálatra, és 40 éve, 1979 májusában már készen állt a felhasználásra.

Nézzük az eseményeket időrendben.

- 1979. április: a Szojuz-33 űrhajó a szovjet és bolgár személyzettel műszaki hiba miatt nem tudott kapcsolódni a Szaljut-6 űrállomáshoz. A pályakorrekciók során az űrhajó főhajtóműve nem működött megfelelően, így a Szaljut-6 űrállomással való dokkoláshoz és a leszálláshoz sem lehetett azt igénybe venni. A leszállást csak egy kisebb teljesítményű hajtóművel, annak kevesebb üzemanyagával tudták megvalósítani. Ezzel a megoldással le lehetett annyira lassítani az űrhajót, hogy az belépjen a légkörbe, de nem volt mód az utángyorsításra a fokozatos magasságcsökkentés érdekében. A ballisztikus pálya, a levegő hirtelen fékező hatása miatti lassulás igen nagy terhelést jelentett az űrhajósokra, eszméletvesztés következett be, de túléltek az eseményt. Ez után a szovjet szakemberek úgy módosították az űrhajó üzemanyag-ellátó rendszerét, hogy a rendelkezésre álló összes üzemanyagot bármelyik hajtóművel fel lehessen használni.
- 1979. június: a **Szojuz-34** űrhajót - a tervezett szovjet és magyar űrhajós helyett - személyzet nélkül küldték fel az űrállomásra.
- 1979. augusztus: az űrállomás harmadik állandó személyzete a **Szojuz-34**-gyel visszatért a Földre.
- 1980. április: a **Szojuz-35** űrhajó felvitte a negyedik állandó személyzetet az űrállomásra.
- 1980. május: a **Szojuz-36** fedélzetén egy éves késéssel feljutott az űrállomásra a szovjet-magyar kettős, Valerij Kubaszov és Farkas Bertalan.
- 1980. június: a szovjet-magyar űrpáros visszatért a Földre a **Szojuz-35** fedélzetén.

Mi már 1979-ben kapcsolatban voltunk Farkas Bertalannal és Magyarai Bélával, a Pille használatát mutattuk be nekik. A tervek szerint egy szakértői csapatnak, köztük a cikk szerzői közül két főnek is ki kellett volna utazni Moszkvába, az irányító központba. Néhány nappal az utazás előtt értesültünk csak róla, hogy a szovjet-magyar űrpáros repülését bizonytalan időre elhalasztották.

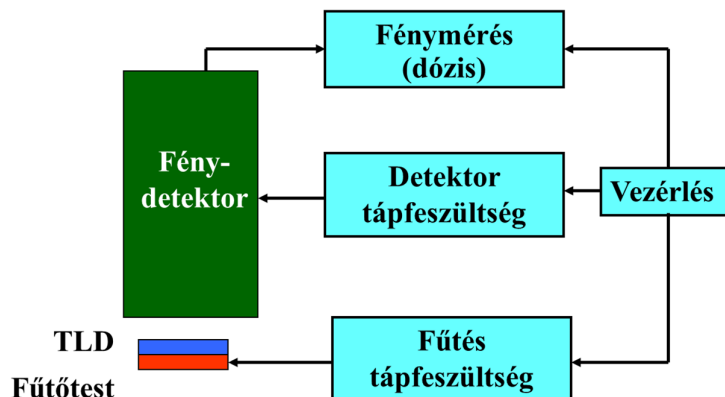
Egyik érdekes emléke az 1979-re tervezett űrutazásnak, hogy az ürrepülés alkalmából kibocsátott 100 forintos emlékérméhez 1979-ben is készültek próbaveretek, valamint létezik néhány példány "próbaveret" jelölés nélkül, 1979-es évszámmal (1. ábra).



1. ábra. Az űrutazás emlékérme 1979-es és 1980-as változata (forrás Internet)

A PILLE SZÜLETÉSÉNEK ELŐZMÉNYEI

A Pille egy termolumineszcens (TL) dózismérő rendszer. A termolumineszcens rendszer dózismérőből és dózismérő kiolvasóból áll. A működés lényege, hogy ha a TL dózismérőt besugározzuk és utána felmelegítjük, akkor a dózismérő a besugárzás dóziséval arányos fény mennyiséget bocsát ki. A dózismérő kiolvasó működési elvét a 2. ábra mutatja. A dózismérőt (TLD) mintegy 250–350 °C-ra felfűtjük, és a kilépő fényt megmérve a dózismérő által elnyelt dózissal arányos fényt kapunk.



2. ábra. A termolumineszcens dózismérő kiolvasó elvi vázlata

Ilyen elven működő rendszerekkel már az 1960-as évek második felétől foglalkoztunk a Központi Fizikai Kutatóintézetben. Akkor még a dózismérő hazai előállítású, termolumineszcens tulajdonságokkal rendelkező üveg volt. A kiolvasót kész, egyenként néhány kilós egységekből raktuk össze egy 1,5 m magasságú műszerkeretben. A fénydetektor fotoelektron sokszorozó volt, ennek elektronikus zaját úgy csökkentettük, hogy a detektort egy hűtőköpennyel vettük körül, amelyen csapvíz folyt át.

A következő lépcső az autonóm, erre a célra konstruált kiolvasó készülék volt. Ez körülbelül akkora volt, mint egy mikrohullámú sütő, 20 liter térfogatú, 15 kg tömegű, fogyasztása 200 W. Egy ilyen, tudományos együttműködés keretében tőlünk kapott készüléket használtak szovjet partnereink a moszkvai Orvosbiológiai Problémák Intézetében (OBPI). Ez az intézet végezte az űrállomáson dolgozó szovjet űrhajósok dózismérését. Ez úgy történt, hogy az űrhajósok ruhájába még a Földön bevarrták a dózismérőket tartalmazó tokot, és az űrhajós visszatérése (akár egy év) után kiolvasták azokat.

1978-ban már tervbe volt véve magyar űrhajós repülése, 1979 tavaszára. A magyar űrhajós részére tudományos programot kellett kidolgozni, ennek keretében látogatták meg a KFKI

főigazgatóját a szovjet szakemberek, akik előadták az OBPI javaslatát: dolgozzunk ki egy űrállomás fedélzeti TLD rendszert, melynél a kiolvasó ne legyen 1 kg-nál nagyobb tömegű, 1 dm³-nél nagyobb térfogatú és néhány wattnál nagyobb átlagos fogyasztású, bírja ki az akkor még durva felbocsátási vibrációt és a kemény dokkolást. Meg kell jegyezni, hogy a várható kérést már egy héttel korábban jelezte Jurij Akatov, az OBPI-s partnerünk. Erről a látogatásról már korábban beszámoltunk. Nos, a végeredmény: a főigazgató – kikérve az űrkészülékek fejlesztésében nagy tapasztalattal rendelkező Apáthy István véleményét – igent mondott, megígérve teljes támogatását az alkatrészek "speciális" beszerzésében, a műhelykapacitásban.

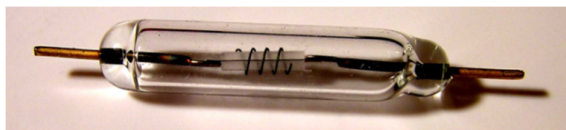
A követelmények egyike volt, hogy a műszernek három napot ki kell bírnia tiszta hélium atmoszférában, mert a teljesen kész űrhajót ellenőrzés céljából megtöltik héliummal, hogy a hegesztés esetleges szivárgásait hélium detektorral ki lehessen mutatni. Nos, ez az adott méretek mellett teljesíthetetlennek látszott, mert a hélium bediffundál a fotoelektronsokszorozó üvegén át, és a fotoelektronsokszorozó tönkremegy, vákuumzárt doboz pedig már nem fért bele a tömegkeretbe. Ekkor megkérdeztük, hogy az űrhajósok hogyan fogják ezt a tesztet kibírni. A válasz az volt, hogy az űrhajósok csak a tesztelés után mennek be az űrhajóba. Sikerült elérni, hogy ugyanez legyen a helyzet a Pillénél is.

Ilyen előzmények után összeállt a főigazgató által megbízott, Fehér István vezette csapat, amelynek ki kellett fejlesztenie a Pille névre keresztelt dózismérő rendszert, ami doziméterekből, kiolvasóból és a mechanikus terhelést csökkentő "kilövődobozból" állt. Le kellett azt gyártani, tesztelni, és a szovjet partnernek átadni, amire mindössze kilenc hónap állt rendelkezésre. A dózismérő fejlesztést Fehér István személyesen irányította, míg a kiolvasó fejlesztésének, gyártásának koordinálását Deme Sándorra bízta.

Engedményként a kilövődoboz részére további tömegkeretet kaptunk.

A PILLE ELSŐ VÁLTOZATÁNAK FEJLESZTÉSE

Az első kérdés a doziméter megválasztása volt. A szokásos fűtőtál sem fogyasztás, sem méret, sem az űrben való használhatóság szempontjából nem jöhetett számításba. Ismert volt viszont a Harshaw cég búra dózismérője, amely alkalmas lehetett a feladat megoldására. Ennél a dózismérőnél (3. ábra) a fűtőlapka két oldalára egy-egy TL tulajdonságokkal rendelkező CaF₂ egykristályt szorít oda egy rugó, biztosítva a felmelegítés során a hőkontaktust. A dózismérő hővesztését csökkentette, hogy a búra belsejében vákuum van. Ez egyszersmind a földi bemérésnél az űrállomás fedélzetén tapasztalhatóval azonos hőtani feltételeket eredményezett.



3. ábra. A Harshaw gyártmányú búra dózismérő. (Fotó KFKI)

A búra dózismérő magyar változatát Fehér István és a Tungsram gyár szakemberei fejlesztették ki (4. ábra), és a Tungsramban gyártották le a szükséges darabszámot is. A magyar búra dózismérő TL anyaga érzékenység szempontjából optimális szemcseméretű CaSO₄(Dy), amelyet e célra Kása Imre (BME) készített. Ezeket a szemcséket egy alacsony olvadáspontú üveg rögzíti a fűtőtálcához. Az üveget Boksay Zoltán készítette, míg a tokozást a Tungsram munkatársa, Magyar László oldotta meg.

A dózismérő kifűtéséhez kisméretű és jó hatásfokú fűtőegységre van szükség. Ennek kifejlesztésében Apáthy István nyújtott segítséget Szabó Bélának és Vágvölgyi Jenőnek, a készülék elektronikus konstruktöreinek.

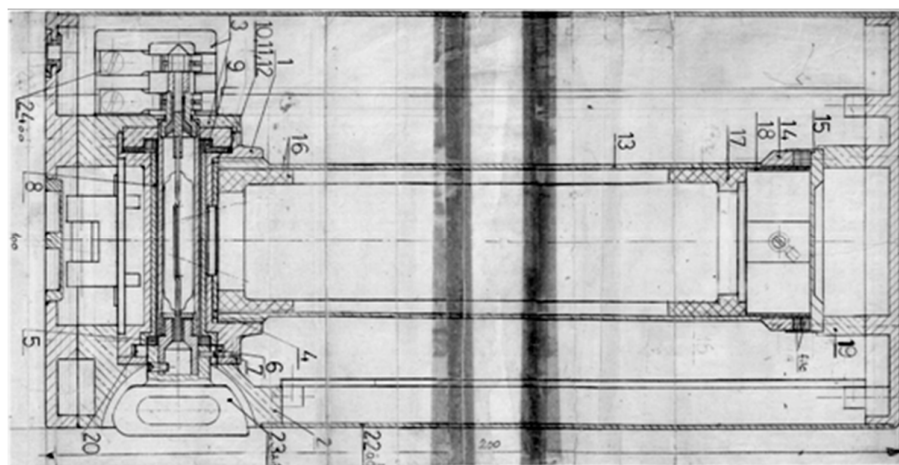


4. ábra. A magyar fejlesztésű búra dózismérő. (Fotó KFKI)

A dózismérőből kilépő fény mérésére a fotoelektronsokszorozó (FES) detektor szolgál. Egyértelműen kis geometriai méretű detektorra volt szükség. Az EMI gyár képviselője segített az optimális típus kiválasztásában, a legkisebb méretű, kis háttérzajú és nagy érzékenyséű típust a mai napig is használjuk. A detektor működtetésére szolgáló nagyfeszültségű tápegységnek kis áramot, de nagyon pontos és stabil, egyszerűen állítható, 1000 volt körüli feszültséget kellett szolgáltatni jó hatásfokkal, kis méretben és tömeggel.

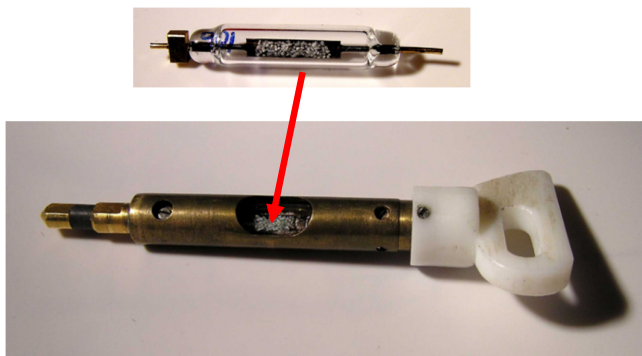
A fotoelektronsokszorozó fénnel arányos kimeneti áramának mérése digitális módszerrel történt, a mért dózis értékének kijelzése is digitális lett. A vezérlést a kollégák időzítő láncok sorozatával oldották meg.

A legnehezebb mechanikai problémát a dózismérők egyszerű kezelhetősége, azoknak a mérőterbe juttatása és a tökéletes fényszigetelés jelentette. Ezt a laboratóriumi készülékeknek egy fényzáró fiók betolásával végzik, de ez a megoldás nagyon helyigényes, a Pillénél nem volt megvalósítható. A készülék mechanikai tervezője, Csőke Antal ezt a feladatot egy elfordítható, henger alakú "kulccsal" és a kiolvasóban azt befogadó forgattyúházzal oldotta meg (5. ábra). Minden egyes dózismérő búra külön – az azonosításhoz/naplózáshoz sorszámmal ellátott – kulcsba lett beépítve (6. ábra). A kulcsra lévő nyíláson lép ki a benne lévő búrából kifűtéskor kilépő fény; a kulcs egyik végén a kezelő fogantyú, azzal szemben lépcsőzetesen kialakított, koaxiális nagyáramú csatlakozók találhatók, ezek vezetik a fűtőáramot a búrához. A kiolvasóban a kulcsot befogadó forgattyúház hüvelye alaphelyzetben zárja a FES „ablakát”. A kulcsnak a készülék nyílásába (7. ábra.) történő bedugásakor a hüvelyen lévő, a kulcs nyílásával egybeeső nyílás a FES felé zárva van. A kulcs elfordításakor a búra „láthatóvá válik” a FES számára, ekkor azonban a külső fény már nem tud behatolni a mérőüregbe. A kulcs elfordítása egyszersmind – a forgattyúház végén elhelyezkedő optokapu segítségével – automatikusan elindítja a mérést, melynek végén a kijelzőn megjelenik a mért dózis értéke.



5. ábra. A mechanikai egység – még 1978-ban ceruzával készült – eredeti műszaki rajza

A fejlesztési fázis jól felszerelt saját műhelyünkre hárult. A műhelyrajzokat Csőke Antalné, a prototípus mechanikai kivitelezését Tonelli Miklós végezte, az elektronikai szerelésben Takács Márton segített.



6. ábra. A dózismérő "kulcs", benne a magyar fejlesztésű búra dózismérő. (Fotó KFKI)

A készülék végső formájának (7. ábra.) kialakulásáig több változatot készítettünk. Az első változat még álló helyzetű volt (8. ábra), de ezt a változatot a rossz kezelhetőség miatt elvetettük. Kialakult a végső, fekvő változat, egyelőre még zöld színre festve (9. ábra). Végül a Pille - mint sok orvosi berendezés - krémszínű lett, különleges, egészségügyi szempontból engedélyezett, kétkomponensű festékkel befestve (7. ábra.).

A Pille gyártásában szinte az egész Műszaki Főosztály részt vett, végső változatát a KFKI központi műhelye készítette el. A munkákat Szenté Ferenc irányította, az alkatrészeket Csikós József készítette, a végszerelést Rigó László végezte.

Az elektronikus konstrukció kipróbálására is készült egy deszkamodell (10. ábra).



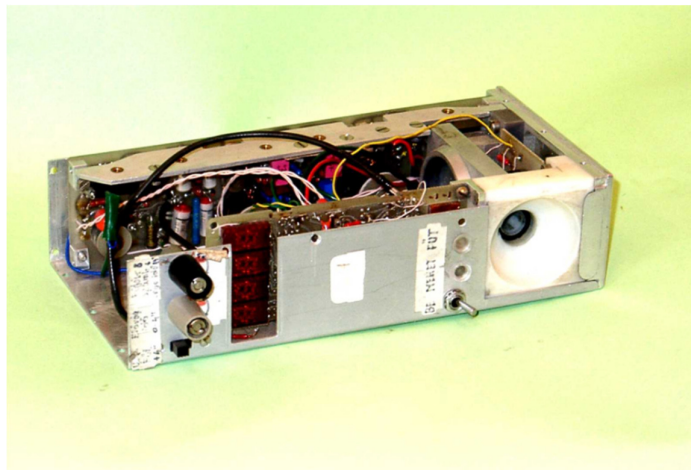
7. ábra. A dózismérő kulcsot a készülék jobb oldalán levő nyílásba kell behelyezni. (Fotó KFKI)



8. ábra. A Pille álló változata.
(Fotó KFKI)



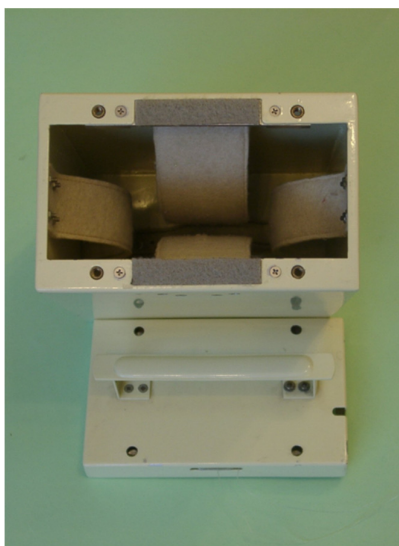
9. ábra. A zöld Pille. (Fotó KFKI)



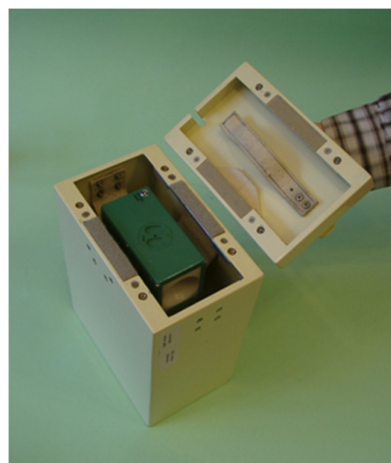
10. ábra. A lemez Pille. (Fotó KFKI)

A Pille fejlesztése hamarosan olyan fázisba jutott, hogy Szabó Péter Pál kollégánk elkezdhette annak bemérését, beszabályozását, az optimális paraméterek beállítását. Ugyanakkor tudtuk, hogy elsősorban a Pille fotoelektronsokszorozója nem bírja ki a felbocsátásnál fellépő vibrációt és a dokkolási ütést. A feladat megoldásában Csőke Antal gépésztervezőnknek Ránky Miklós és Endrőczy Gábor „rezgésszakértő” segített. Megszületett a "kilövődoboz", amely csökkentette a vibrációt és a dokkolási ütést is. A kilövődoboz

belsejében filccel bevont laprugók voltak. A laprugók csökkentették az ütést, a vibráció csökkentése érdekében a rugókra filc "lengéscsillapító" került (11. ábra). A tesztelésekhez még egy prototípus Pillét használtunk (12. ábra). Az összeszerelt kilövődobozt és a dózismérők szállítódobozát a 13. ábra mutatja.

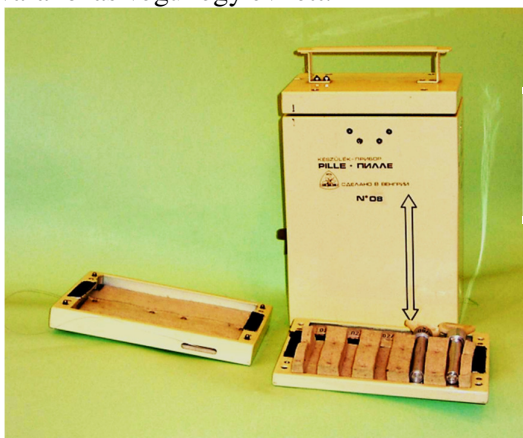


11. ábra. A kilövődoboz a filccel bevont laprugókkal. (Fotó KFKI)



12. ábra. A kilövődoboz a tesztelő Pillével. (Fotó KFKI)

A Pille végső, ún. repülőpéldánya elkészült, kiszállítottuk a szovjet partnerintézetbe (13. ábra), ahol azt megfelelőnek találták. Vártuk a néhány héttel későbbre kitűzött felbocsátást... A várakozás végül egy év lett.



13. ábra. A kilövődoboz és a dózismérők szállítódobozának levett fedéllel. (Fotó KFKI)

VÉGRE FELSZÁLL A PILLE

1980 május közepén már tudni lehetett, hogy hamarosan felszáll a Szojuz a szovjet és a magyar űrhajóssal. Mindkét magyar űrhajós jelöltet ismertük, de nem tudtuk, hogy ki a kiválasztott

Egy kis szakértői csapatot Apáthy István vezetésével néhány nappal a repülés előtt kiküldtek Moszkvába azzal a feladattal, hogy a magyar űrhajós által végzendő kísérleteknél szükség esetén tanácsot adjanak a magyar űrhajósnak.. Még a felbocsátás előtt kirándulást szerveztek nekünk Csillagvárosba, majd a felbocsátás napján már a Moszkva közeli Kalinyingrádban, a Repülésirányító Központban voltunk (14. ábra). Kaptunk egy szobát, amit

1975-ben még a Szojuz-Apollo közös szovjet-amerikai űrrepülésre rendeztek be a NASA szakemberei számára. A szobában láthattuk a TV-kapcsolatot Bajkonurral, az űrállomás fontosabb környezeti paramétereit és mindazt az információt, amit nekünk szántak. Minden fontos eseményt valós időben néztünk (a magyar TV-nézők ugyanazt másfél óras késleltetéssel), de az események alatt telefonjaink nem működtek.

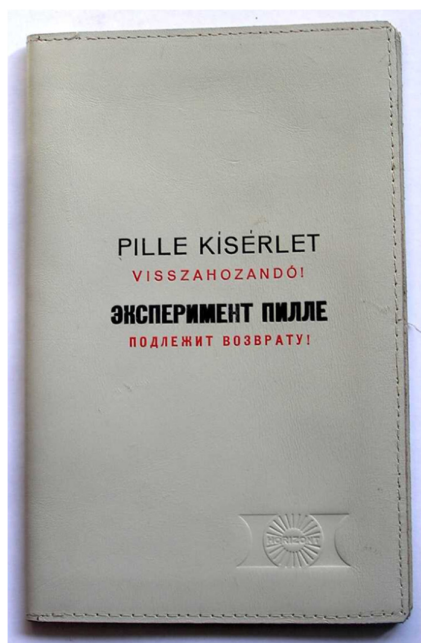


14. ábra. A magyar szakértői csapat a Repülésirányító Központban. A cikk szerzői közül Apáthy István balról a harmadik, Deme Sándor pedig jobbról a harmadik. A jobboldalon a két szovjet kísérő. (Fotó Repülésirányító Központ)

Hat magyar kísérletet kellett Farkas Bertalannak végrehajtani (Dózis kísérlet a Pillével, Munkaképesség, Interferon, Ötvös, Bealuca és Bioszféra); mindenki izgatottan várta, hogy ezek miként sikerülnek. A Pille kísérletnél részben lenullázott, részben ismert dózissal besugárzott dózismérőket küldtünk fel.

A Pille mérések az első és az utolsó "munkanapon" történtek, így hamar sor került az első sorozatmérésre. A rádióon lediktált adatok megfeleltek a várakozásnak mind a lenullázott, mind a besugárzott dózismérőknél. Néhány hét múlva megkaptuk az eredeti jegyzeteket is (15. ábra), valamint a Farkas Bertalan által végzett fedélzeti mérés fényképét (16. ábra).

Ezzel az első Pille-mérés sikerrel lezárult, de a program folytatódott...



Дата	: 19.04.2013. 06.13
Время (час)	: 26.10
Номер дозиметра	: Место установки : Показания прибора
04/1	: 30-4 (К) : 40 : 40
04/2	: 30-4 (БИ) : 47 : 48
04/3	: 3П-4-2 (К) : 48 : 48
04/4	: 3П-4-2 (БИ) : 47 : 40
04/5	: ПХО, левый борт, к поручню : 42 : 52
04/6	: ПХО, левый борт, к поручню : 45 : 43
04/7	: ПХО, левый борт, к поручню : 51 : 55
04/8	: ПХО, левый борт, к поручню : 44 : 43
04/9	: панель 34 : 45 : 43
04/10	: пост № I : 46 : 39
04/11	: Р0, сп. место 1 : 50 : 54
04/12	: Р0, сп. место 2 : 51 : 54
04/13	: в укладке калибровка : 971 : 52
04/14	: в укладке калибровка : 926 : 53
04/15	: в укладке калибровка : : 958
04/16	: в укладке калибровка : : 950

15. ábra. A Pille-mérések fedélzeti naplója az első és utolsó munkanap méréseivel. (Fotó KFKI)



16. ábra. Farkas Bertalan a Pillével mér az űrállomás fedélzetén. (Fotó Interkozmosz)

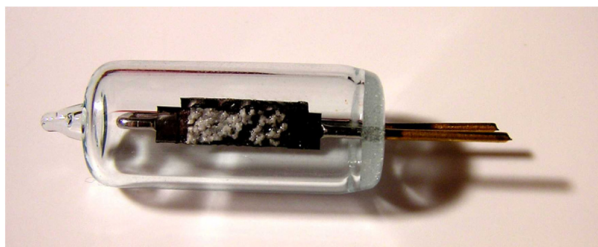
A KLASSZIKUS PILLE TOVÁBBFEJLESZTÉSE 1980 UTÁN

A Pille Farkas Bertalan repülése utáni változatainak felhasználási adatait részletesen ismerteti egy korábbi cikkünk, itt elsősorban a műszaki fejlesztés lépéseire térünk ki.

A Szaljut-7 űrállomás fedélzetére egy új Pille rendszer került fel. Ebben már a dózismérő újabb, szintén a Tungsram által gyártott változatát használtuk (17. ábra). Ennél a változatnál mindkét kivezetés a dózismérőnek azonos oldalán van. Ez a megoldás kettős előnnyel járt az előző változathoz képest. A fűtőlemez előfeszítésének köszönhetően nem jött létre annak

melegítés hatására történő deformációja, emellett a dózismérő pontos pozicionálása is megoldódott.

Meg kell jegyezni, hogy a kilövődobozra csak az első, Farkas Bertalan úrutazásához készült Pillénél volt szükség. A későbbi felbocsátásokra vonatkozó vibrációs és ütési követelmények már nem tették szükségessé a különleges külső védelmet, a későbbi példányoknál csak egy tűzálló textilanyagból (Nomex) készült „védőzsákra” volt szükség.



17. ábra. A búra dózismérő második, jelenleg is használt változata. (Fotó KFKI)

A következő fejlesztést a Pille NASA által tervezett alkalmazása tette szükségessé. A NASA – ellentétben a szovjet követelményekkel – nem a fedélzeti áramforrást kívánta használni a Pille esetében, hanem akkumulátoros változatot kért. Ez mechanikai és elektronikai változtatásokat kívánt meg. Az elkészült változattal (18. ábra) Sally Ride, az első amerikai női űrhajós mért a Challenger-6 űrsikló fedélzetén, 1984 októberében (19. ábra). A méréssel a dózisteljesítmény magasságfüggését mérte t 350–500 km-es tartományban.



18. ábra. A Pille akkumulátoros változata. (Fotó KFKI)



19. ábra. Sally Ride a Challenger űrsikló fedélzetén a Pille rendszerrel. (Fotó: NASA)

Meg kell említeni, hogy a Polgári védelem részére a Tungsram mintegy két tucat Pillét gyártott le. Ennek konstrukciója lényegében megegyezett az első Pille változattal (20. ábra).



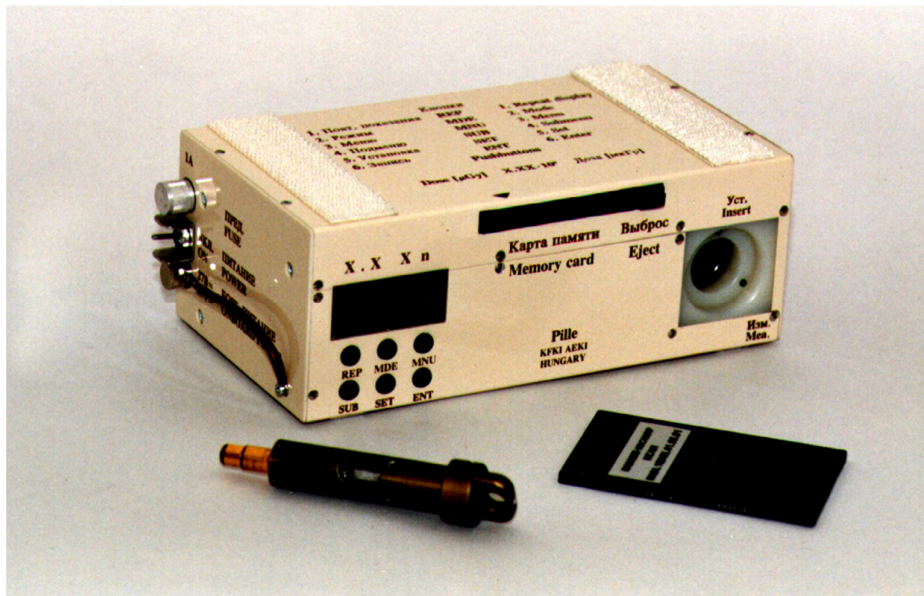
20. ábra. A Tungsram által gyártott Pille (Fotó KFKI)

A MIKROPROCESSZOROS PILLE

Az eddig ismertetett fejlesztések a KFKI Sugárvédelmi Főosztályán történtek. Az ott dolgozó, elektronikus területtel foglalkozó fejlesztők kilépése miatt a fejlesztés irányítása átkerült a KFKI AEKI Űrelektronikai Kutatócsoportjához; ennek a csoportnak a vezetője, Apáthy István lett a főkonstruktor és az új készülék analóg áramköreinek a kidolgozója. A digitális áramköröket és a szoftvert Bodnár László, a BL Electronics cég vezetője fejlesztette, a mechanikai részek tervezője továbbra is Csőke Antal maradt. A felhasználói elvárásokat Deme Sándor tolmácsolta. Az építés technikai részében segítséget nyújtottak Cseri Sándor, Csikós József, Detréné Németh Ingeborg, Hajós Géza, Héjja István, Mihály László és Rigó László.

A mikroprocesszoros megoldás nem csak a dózismérők automatikus azonosítását, a mérési eredmények és a kifutási görbék tárolását tette lehetővé, de a programozott automatikus üzemmódot is. A kiolvasó készüléket közvetlenül számítógéphez lehetett csatlakoztatni. A dózismérőkbe memóriacsip került, ami tartalmazta a dózismérők azonosító kódját; ennek alapján választotta ki a kiolvasó az adott dózismérőnek a kiolvasó belső táblázatába előre beírt és a mérés kiértékeléséhez szükséges egyedi paramétereit. A Pille menürendszerrel

rendelkezett, navigálni a nyomógombok segítségével lehetett (21. ábra). A mikroprocesszoros Pille mérete és tömege kissé meghaladta az analóg Pille méretét (22. ábra) és tömegét, de ekkorra már nem voltak meg az erre vonatkozó kezdeti szigorú előírások. A mikroprocesszoros Pille mérési adatai memóriakártyára kerültek, melyet időről időre kicseréltek; a „megtelt” kártyát a mérések kiértékelésére visszahozták a földre, helyére egy új kártya került.

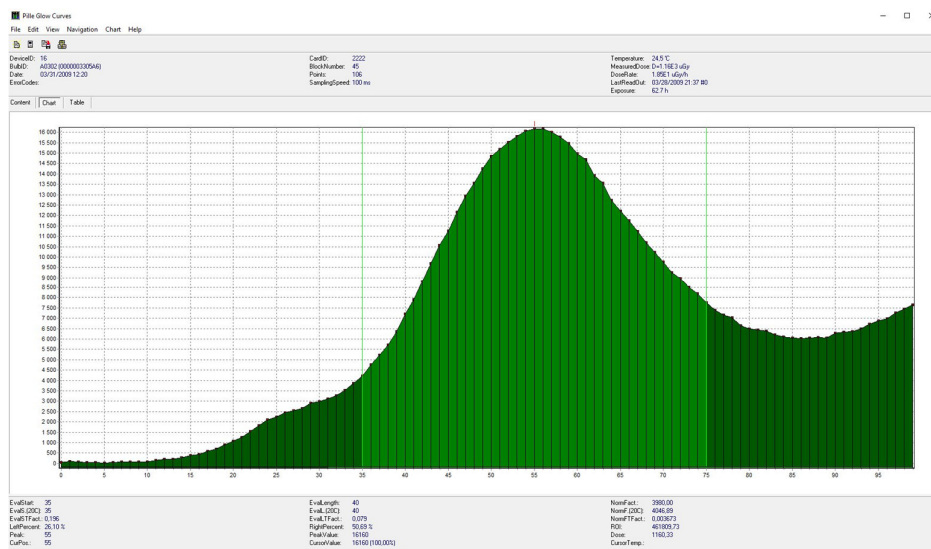


21. ábra. A mikroprocesszoros Pille, előtte balról a dózismérő, jobb oldalon a memóriakártya (Fotó KFKI)



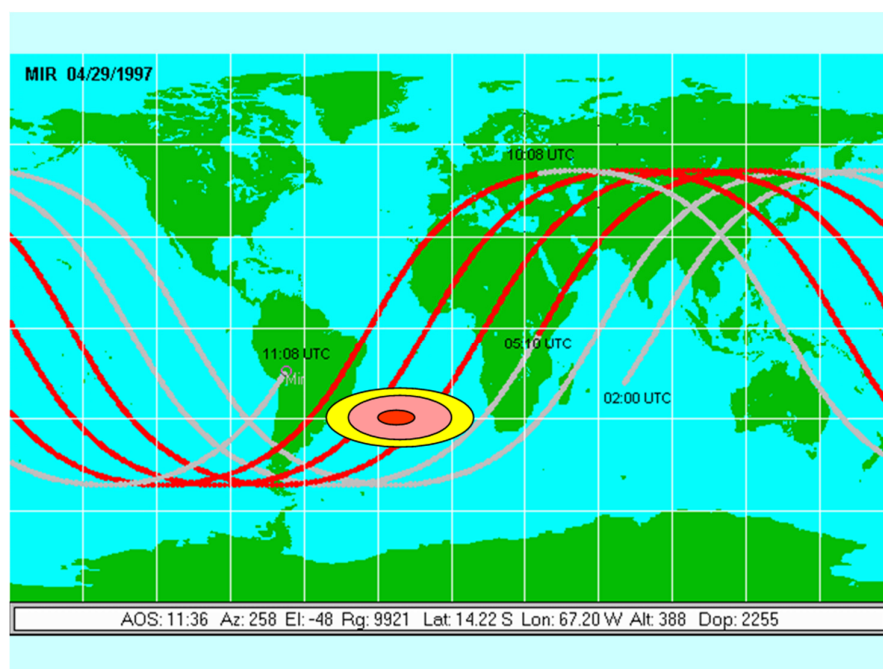
22. ábra. Három Pille változat. Legalul az analóg változat, középen a mikroprocesszoros Pille első változata, felül a jelenleg is használt második mikroprocesszoros változat. (Fotó KFKI)

A memóriakártyán egy-egy mérési blokk a dózismérő azonosító kódján, a mérés időpontján, a mért dózison és számos egyéb mérési paraméteren kívül minden egyes mérés kifutási görbéjét is tartalmazza (23. ábra), ennek révén a hibás mérések könnyen kiszűrhetővé váltak.



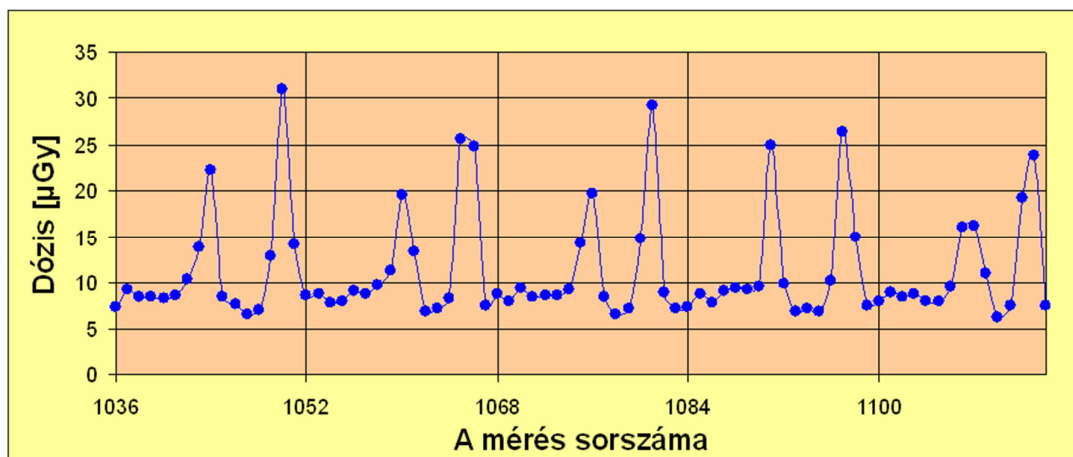
23. ábra. A memóriakártyán tárolt kifutási görbe és a mérési adatok. (Fotó KFKI)

Az új Pille automatikus üzemmódban is használható. Ez tette lehetővé, hogy szelektíven meg lehessen határozni a Föld körüli sugárzási tér aszimmetriájából eredő, az ún. Dél-Atlanti Anomáliában (DAA) található nagyintenzitású sugárzási tér (24. ábra) részarányát a teljes dózisban.



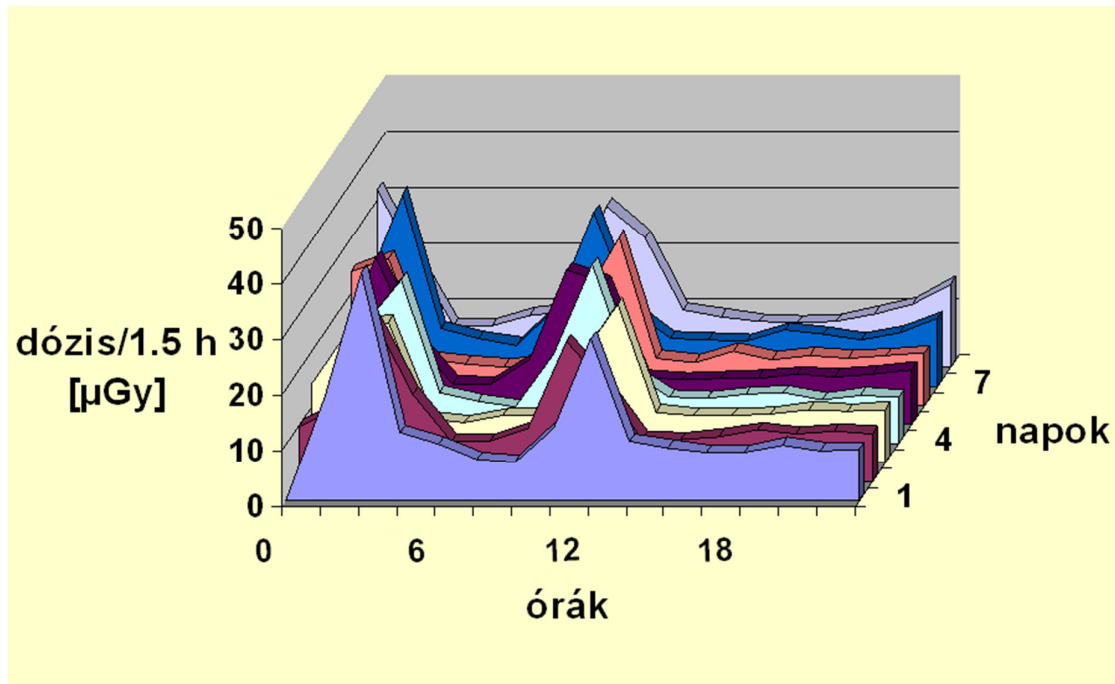
24. ábra. A Mir űrállomás pályája és a nagyintenzitású sugárzási tér (DAA). (Forrás Interkozmosz)

A 25. ábra a Pille 90 percenként automata üzemmódban kiolvasott dózisát mutatja a Mir űrállomás fedélzetén. Az űrállomás naponta kétszer haladt át a DAA-n, egyszer észak-déli, másodszer dél-északi irányban, a csúcsok közötti idő mintegy 9, illetve 15 óra.



25. ábra. A Pille által 90 percenként automata üzemmódban kiolvasott dózis. A kiugró értékek a DAA-n történő áthaladás alatti megnövekedett dózis következménye

Ha egy teljes hét mérési adatait vizsgáljuk (26. ábra), akkor látható a csúcsok lassú időbeli eltolódása. Ez annak a következménye, hogy az űrállomás keringési ideje kissé kevesebb 90 percnél.



26. ábra. A 90 perces automata kiolvasások egy hetes adatai

1995-ben a mikroprocesszoros Pille első példányával (Pille'95) Thomas Reiter (27. ábra) ESA- és tiszteletbeli magyar űrhajós az Euromir'95 küldetés keretében a Mir űrállomás fedélzetén elvégezte annak dozimetriai feltérképezését, valamint nagy időfelbontású

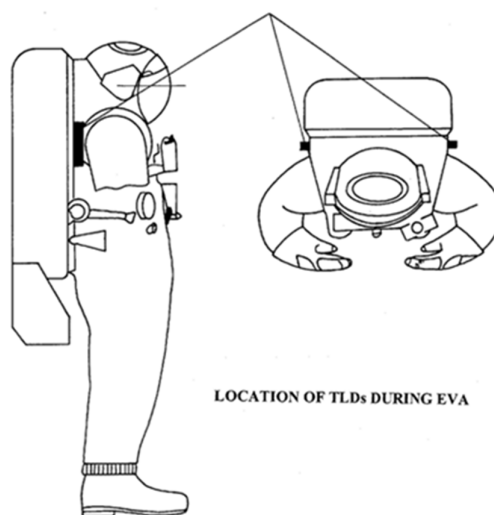
méréssorozatot hajtott végre. 1997-ben, a NASAMir4 küldetés keretében a Pille'96 rendszer jutott fel az Atlantis űrsiklóval ugyancsak a Mir űrállomásra. Jerry Linenger és Michael Foale NASA-űrhajósok – a rutinméréseken felül – elvégezték az űrséta járulékos dózisének meghatározását, amihez az új amerikai űrruhák készítésénél dózismérőink elhelyezésére külön zsebeket alakítottak ki (28. ábra); a lehetséges elhelyezési helyek keresését a NASA-nál végeztük.

Időközben az „új” Pille földi pályafutása is megkezdődött: Pakson két hordozható, akkumulátoros példányt állítottak az atomerőmű tágabb környezete sugárzásmonitorozásának szolgálatába.

A cikk megírásáig mindössze egy alkalommal fordult elő Pille meghibásodás az űrállomásokon. A hibát Thomas Reiter német űrhajós próbálta kijavítani (27. ábra), ami megfelelő szerszám hiányában nem sikerült, de rövid időn belül feljutott a tartalék kiolvasó a Mir űrállomás fedélzetére, a mérések töretlenül folytatódhattak.



27. ábra. Thomas Reiter a Mir űrállomás fedélzetén 1995-ben. (Fotó: ESA)



28. ábra. A dózismérők elhelyezése a NASA űrhajósainál (Fotó: NASA)

PILLÉK A NEMZETKÖZI ŰRÁLLOMÁSON

A Mir űrállomást időközben felváltotta a közel húsz nemzet közreműködésével felépült Nemzetközi Űrállomás (ISS, International Space Station). Magyarország – az űrállomáshoz való hozzájárulásaként – egy-egy továbbfejlesztett Pille rendszert szállított le az űrállomás amerikai (Destiny), illetve orosz (Zvezda) moduljában történő felhasználásra.

Az egy sorba rendezett, mindössze öt nyomógommbal sokkal egyszerűbbé és logikusabbá vált a kiolvasó kezelése (29. ábra). A dózismérő kulcsokba épített memóriacsip az azonosítón kívül a dózismérő egyedi paramétereit is tartalmazza, így nincs szükség a kiolvasóban paraméter-táblázatra; a rendszer „nyitottá” vált, új dózismérők rendszerbe állításakor nem kell a táblázatot újra és újra bővíteni.



29. ábra. A mikroprocesszoros Pille második változata. (Fotó KFKI)

A rendszer NASA-példánya (Pille-ISS), melyet a Discovery űrsikló 2001-ben vitt fel az űrállomásra, a biológiai kísérletek számára biztosított volna dozimetriai adatszolgáltatást. A NASA a biológiai labor kiépítését felfüggesztette, így aztán a Pillét az ESA dózistérképezési programja során (DOSMAP) használták; Jim Voss (30. ábra) NASA-űrhajós 4 hónap alatt közel 1700 mérési adatot gyűjtött. A Pille-ISS-t később NASA-szakemberek a sugárvédelmi rendszer szolgálati részévé szerették volna minősíteni, de ez politikai okokból meghiúsult. Ezt követően a rendszerrel további méréseket az ISS fedélzetén nem végeztek. Tíz évvel később, az utolsó űrrepülőgépes küldetés alkalmával az Atlantis visszahozta a Pille-ISS-t a Földre, amely 2017-ben hazakerült Magyarországra, és ma a KFKI környezetmonitorozó hálózatának részeként üzemel tovább.



30. ábra. Jim Voss a Nemzetközi Űrállomás fedélzetén a mikroprocesszoros Pille jelenlegi változatával. (Fotó: NASA)

2003-ban, a moszkvai OBPI-vel együttműködésben egy másik Pille rendszer is feljutott az ISS-re (Pille-MKSZ), ez már mint a fedélzeti és személyi dozimetria szolgálati berendezése. A detektorokat azóta is rendszeresen használják dózistérképezésre és űrséták alatt, valamint a nagyobb sugárzást létrehozó napkitörésekkor személyi dózismérésre. Charles Simonyi (31. ábra) magyar származású űrturista mindkét repülése során (2007, 2009) a Pillével számos olyan mérést hajtott végre, melyeket a hivatásos űrhajósok idő hiányában nem tudnak elvégezni (pl. személyi dózismérés a hálókahelyen, fedélzeti keresztkalibráció, a Pille kiolvasó önárnyékolásának meghatározása).



31. ábra. Charles Simonyi a Pillével mér az ISS fedélzetén. (Fotó: Roszkoszmosz-RSC_Energia)

A Pillét időről időre kísérleti célú vizsgálatokra is használják. 2006–2009 között az ESA Matryoska–II kísérletében az űrállomás belsejében elhelyezett antropomorf fantom felszínén végeztek vele méréseket. 2010-ben a Pille dózismérőivel részt vettünk a „vízfüggöny” kísérletben: a fedélzeten tárolt, de tisztálkodásra még fel nem használt nedves higiéniai kendőket és törülközőket tartalmazó csomagok sugárzásárnyékoló (sugárzásvédő) hatását mérték meg az űrállomás egy kevésbé árnyékoló részén.

Üzemeltetésének 15 éve során a Pille rendszerrel körülbelül 60 ezer mérési adatot gyűjtöttek. Az űrséták alatt valamennyi űrügynökség (orosz, amerikai, európai, japán, kanadai) űrhajója a Pillét használja személyi dózisének mérésére.

A 2003 óta megbízhatóan szolgálatot teljesítő Pille rendszer szavatossági ideje időközben lejárt, így az orosz fél szükségesnek látta a rendszer lecserélését. Egy, a korábbival megegyező új rendszert 2018-ban juttattak a Nemzetközi Űrállomásra. Annak beüzemelése alatt egyszerre két Pille kiolvasó működött a Zvezda modulban (32. ábra), a fedélzeten használt Pille dózismérők száma pedig a korábbi 12-ről 17-re emelkedett.



32. ábra. Két Pille egy időben az ISS fedélzetén. (Fotó Roszkoszmosz-RSC_Energia)

A PILLE FÖLDI ALKALMAZÁSA

Csoportunk és a BL Electronics Bt. együttműködésében kifejlesztésre került egy – részben a Pille technológiáján alapuló – hordozható, földi, kereskedelmi célú TL dózismérő rendszer is, a PorTL (33. ábra), amely az űrbéli technológiák földi hasznosulásának egy kiváló példája. A rendszert felhasználják magyarországi és külföldi kutatóhelyeken, az oktatásban és nukleáris létesítmények környezet-ellenőrző szolgálatainál (paksi atomerőmű, KFKI telephely).



33. ábra. A PorTL dózismérő rendszer. (Fotó KFKI)

A PILLE JÖVŐJE

Az Orosz Űrügynökség a Pille rendszert az űrállomás üzemidejének végéig, vagyis legalább 2024-ig használni kívánja. Időközben azonban újabb igény jelentkezett, a dózismérők tokozás árnyékolásának csökkentésére. A korábbi dózismérő kulcsok helyett a búra egy kisméretű, vékony falú hengeres patronba került. A patronokat befogadó ún. <http://www.sugarvedelem.hu/sugarvedelem>

univerzális kulcs (34. ábra) lehetővé teszi, hogy az új dózismérőket a fedélzeti Pille kiolvasó átalakítása nélkül is lehessen használni. Az új detektorok a szigorú teszteken sikerrel vizsgáztak; az első példányok várhatóan ez év őszén jutnak az ürállomásra.



34. ábra. Az univerzális kiolvasó kulcs és az új típusú Pille dózismérő vékony falú tokozással. (Fotó KFKI)

Azon túl, hogy az űrséták alatti dózismérés pontosabbá válik, a kisméretű dózismérőkkel antropomorf fantomok belsejében is méréseket végezhetünk. Néhány éven belül várható, hogy az orosz Enyergija vállalat a német DLR-rel együttműködésben feljuttatja a Matryoska-III fantomot az ISS fedélzetére. A kísérlethez már elkészítettük az új típusú Pille dózismérő patronok behelyezésére szolgáló tartószerkezet prototípusát.

Az elmúlt évtizedek alatt számos csoport próbálkozott a világban a Pilléhez hasonló műszer kifejlesztésével, de egyikük sem járt sikerrel. Így a Pille továbbra is az egyetlen olyan űrkvalifikált dózismérő rendszer, melynek segítségével TL dózismérők emberes űrhajók és űrállomások fedélzetén kiolvashatók, egyszersmind a legismertebb magyar űrműszer itthon és határainkon túl.

A Pille előzményeiről, történetéről és a mérési eredményekről számos cikk szól, ezek közül néhány az alábbi irodalomjegyzékben szerepel.

Végezetül itt szeretnénk köszönetet mondani mindazoknak, akik nagyon sokat dolgoztak azon, hogy a Pillék mindig határidőre, kifogástalan minőségben elkészüljenek.

TOVÁBBI IRODALOM

Békés Mártonné, Fehér István, Deme Sándor és Suha Zoltán. Termolumineszcens üvegdoziméter. KFKI Közlemények, 17, 179–184. (1969)

Deme S., A Pille története, avagy hogyan lett az elefántból bolha, Fizikai Szemle, 1981/1, 32-36. (1981)

Fehér, I., Deme, S., Szabó, B., Vágvolgyi, J., Szabó, P.P., Csőke, A., Ránky, M., Akatov, Yu.A., A new thermoluminescent dosimeter system for space research, Advances in Space Research, 1, 61-66. (1981)

Akatov, Yu.A., Arkhangelsky, V.V., Aleksandrov, A.P., Fehér, I., Deme, S., Szabó, B., Vágvölgyi, J., Szabó, P.P., Csőke, A., Ránky, M., Farkas, B., Thermoluminescent dose measurements on board Salyut type orbital stations, *Advances in Space Research*, 4, 77-81. (1984)

Deme S., Apáthy I., Újra felszáll a Pille, *Fizikai Szemle* 1999/3, 80-84. (1999)

Apáthy, I., Deme, S., Fehér, I., Akatov, Yu.A., Reitz, G., Arkhangelski, V.V., Dose measurements in space by the Hungarian Pille TLD system, *Radiation Measurements*, 35, 381-391. (2002)

Apáthy I., Bodnár L., Csőke A., Deme S., Fehér I., PorTL - a földre szállt Pille, *Hiradástechnika*, LXI., 2006/4, 23-27. (2006)

Apáthy, I., Akatov, Yu.A., Arkhangelsky, V.V., Bodnár, L., Deme, S., Fehér, I., Kaleri, A., Padalka, I., Pázmándi, T., Reitz, G. Sharipov, S.: TL dose measurements on board the Russian segment of the ISS by the “Pille” system during Expedition-8, -9 and -10, *Acta Astronautica* 60, 322-328. (2007)

Szántó, P., Apáthy, I., Deme, S., Hirn, A., Nikolaev, I.V., Pázmándi, T., Shurshakov, V.A., Tolochev, R.V., Yarmanova, E.N., Onboard cross-calibration of the Pille-ISS Detector System and measurement of radiation shielding effect of the water filled protective curtain in the ISS crew cabin, *Radiat. Meas*, 82, 59-63. (2015)

Hirn Attila, Apáthy István, Csőke Antal és Deme Sándor Pille 40 – egy korszakokon átívelő történet. http://www.mant.hu/kiadvanyok/urtan_evkonyv_2018.pdf

EGY EGYÉNRE SZABHATÓ TÜDŐRADONDOZIMETRIAI MODELL LÉTREHOZÁSA ÉS ALKALMAZÁSA

Füri Péter

Magyar Tudományos Akadémia, Energiatudományi Kutatóközpont,
Budapest, 1121, Konkoly Thege-Miklós út 29–33.
furi.peter@energia.mta.hu

A kézirat beérkezett: 2019.07.24.

Közlésre elfogadva: 2019.11.11.

Developing and applying a customizable radon progeny lung dosimetry model

To investigate how the intersubject variability of the airway geometry and breathing mode affects the radiation burden of the airways we created a customizable radon progeny clearance and dosimetry model. The calculations performed in this study showed, that the absorbed cell nucleus dose rates are higher in case of mouth than nose breathing and chronic obstructive pulmonary disease (COPD) significantly increases the radiation burden. According to these results breathing mode and health status considerably affects the dose rates of the airways. The Radact version of the Stochastic Lung model is a unique tool to demonstrate this.

Keywords- radon, absorbed cell nucleus dose, stochastic lung model, intersubject variability

A radon leányelemek bomlásából származó sugárterhelés egyéni adottságoktól való függésének vizsgálatához létrehoztunk a Sztochasztikus Tüdőmodellben egy egyénre szabható nyáktisztulási, illetve dozimetriai modellt. Az elvégzett számítások igazolják, hogy a tüdő bronchiális régiójának sugárterhelése nagyobb száj-, mint orrlégzés esetén, valamint a krónikus obstruktív tüdőbetegség (COPD) jelentősen megnöveli a sejtmagokra vonatkoztatott elnyeltdózis-teljesítményeket. A légutak sugárterhelésének mértéke erősen függ tehát a vizsgált egyén légzési módjától, illetve egészségi állapotától is. Ennek vizsgálatához egyedülálló eszköz a Sztochasztikus Tüdőmodell új, Radact változata.

Kulcsszavak – radon, elnyeltdózis-teljesítmény a sejtmagban, Sztochasztikus Tüdőmodell, egyének közötti variabilitás

BEVEZETÉS

A légzés nélkülözhetetlen életfolyamat. A légzés során azonban számos szilárd részecske, illetve folyadék csepp is a felső légutakba vagy a tüdőbe kerülhet. Ezek okozhatnak asztmát, emfizémát, illetve krónikus obstruktív tüdőbetegséget (COPD) is. A belélegzett radon leányelemek bomlása emellett a természetes eredetű sugárterhelés fő forrása is. Több epidemiológiai vizsgálat igazolja, hogy a belélegzett levegő Rn-aktivitáskoncentrációja és a tüdőrák kialakulásának valószínűsége között szoros összefüggés van [1, 2]. A sugárvédelem fontos feladata tehát a radon leányelemeinek belégzés utáni bomlásából származó sugárterhelés meghatározása.

Lakásokban az UNSCEAR 2000-es jelentése szerint világátlagban 40 Bq/m^3 radonleányelem-aktivitáskoncentráció mérhető [2], de a lakások egy kis részében ennél akár több nagyságrenddel nagyobb értékek is előfordulhatnak.

A humán légzőrendszer

A jelen munka módszereinek és eredményeinek megértéséhez szükséges a humán légzőrendszer egyes elemeinek rövid ismertetése.

A humán légzőrendszer felosztható felső légutakra (extrathorakális rendszer), bronchiális, illetve acináris régióra. Az extrathorakális rendszer (mely az orrot, szájat, a garatot és a géget jelenti) fontos szűrő, nedvesítő és előmelegítő funkciót is ellát.

A bronchiális és az acináris régió bifurkációkból (légúti generációkból) épül fel, azaz minden anyaga két leányágra bomlik.

A bronchiális légutak csövein még nem találhatók léghólyagok (alveolusok), tehát e régió csupán a tüdő mélyebben fekvő része felé vezeti a levegőt. A légzőrendszer bronchiális részére jellemző tisztulási mechanizmus a nyaktisztulás.

A bronchiális légutak után következő acináris légutak felületét már nagy részben alveolusok fedik. A tüdő e nagy felületű (kb. 140 m^2) részében zajlik a gázcsere.

Mivel a legtöbb – az ionizáló sugárzás daganatkeltő hatásához köthető – elváltozást a légzőrendszer bronchiális régiójában írták le, (illetve az elnyelt dózisok is itt a legnagyobbak) a dózisszámítás során a légutaknak csupán e részére koncentráltunk.

A radon és bomlástermékei

A radon nemesgáz, így nem kapcsolódik a levegőben lebegő porszemcsékhez. Nem ülepedhet ki ezért a légutakban. Mivel a radon felezési ideje kb. 3,8 nap, de a légzőrendszerben csupán néhány másodpercet tölt, annak a valószínűsége, hogy a rendelkezésre álló idő alatt elbomoljon, igen kicsi. A belélegzett radon túlnyomó többsége tehát még azelőtt kilégzésre kerül, hogy a polónium 218-as tömegszámú izotópjára bomlana. Nem szükséges ezért a radon gáz bomlásából származó sugárterhelés modellezése.

A radon leányelemek már nem nemesgázok, így jelentős hányaduk tapad meg a levegőben lebegő porszemcsék felületén. A belélegzett porszemcsék diffúzióval, impakcióval, illetve szedimentáció (gravitációs ülepedés) hatására is kiülepedhetnek a légutakban, így a radonnál jóval hosszabb időt, akár órákat is eltölthetnek a légzőrendszerben.

A radon 222-es tömegszámú izotópja először alfa-bomlással a polónium 218-as tömegszámú izotópjává alakul. A 218-as tömegszámú polónium már nem nemesgáz, így számottevő hányada tapad ki a lebegő porszemcsék felületére. Ez az úgynevezett kitapadt frakció. Ennek méreteloszlása természetesen a környezeti részecskék méreteloszlásától függ.

A 218-as tömegszámú polónium atomoknak van ki nem tapadt frakciója is. Ezen részecskék mérete jellemzően sokkal kisebb a kitapadt atomokat hordozó részecskék méreténél. [3].

A polónium 218-as tömegszámú izotópjának bomlásából egy 6 MeV-os alfa-részecske kibocsátásával 214-es tömegszámú ólom keletkezik. Ezután ebből az izotópból béta-bomlással a bizmut 214-es tömegszámú izotópja jön létre, majd újabb béta-bomlást követően a polónium-214-es tömegszámú izotópjához jutunk. A 214-es tömegszámú polónium egy 7,69 MeV-os alfa-részecske kibocsátásával 210-es tömegszámú ólom alakul. Ez az izotóp nem stabil, ám felezési ideje 22,3 év, így annak a valószínűsége, hogy a légutakban töltött idő alatt elbomlik, elhanyagolható.

A radon bomlási sorában alfa- és béta-bomlások is szerepelnek. A béta-bomlások során kibocsátott elektronok ionizáló képessége (így biológiai hatása is) sokkal kisebb, mint a jóval nagyobb tömegű alfa-részecskéké. A sejtmagokra vonatkoztatott elnyeltdózis-teljesítmények számításánál a béta-bomlások dóziszárulékát ezért elhanyagoltuk.

A belélegzett radon bomlástermékek légzőrendszeri kiülepedéseloszlása erősen inhomogén. Adódnak ezért olyan légúti területek, ahol nagy mennyiségű radioizotóp tud kiülepedni akár kis mennyiségű belélegzett radon leányelem esetén is [4, 5, 6].

A belélegzett radon leányelemek biológiai hatásának becslésekor fontos feladat tehát az inhalált radioizotópok kiülepedéseloszlásának minél pontosabb meghatározása.

A belélegzett radon bomlástermékek kiülepedéseloszlása vizsgálható kísérleti úton, gamma-kamerával, illetve Single Photon Emission Computer Tomography (SPECT) technikával is. A kísérleti eljárások azonban erősen korlátozott felbontásuk miatt ma még nem alkalmasak a 2 mm-es átmérő alatti kis légutak vizsgálatára, illetve – mivel jellemzően csupán kétdimenziós képet adnak – nem képesek az egymást térben átfedő légutakban kiülepedett radioizotóp mennyiség meghatározására sem.

A kísérleti eljárások e hiányosságai miatt kiemelkedően fontos szereppel bírnak a numerikus tudómodellek, melyek használatával tetszőleges felbontással jellemezhető a belélegzett radioizotópok kiülepedés- és dóziseloszlása. Numerikus modellezés segítségével szimulálható továbbá a nyáktisztulás hatása is, mely kulcsfontosságú az olyan hosszú felezési idejű izotópok esetén, mint a 214-es tömegszámú ólom és bizmut, melyek jelentős távolságot tehetnek meg a légzőrendszerben a mozgó nyákréteggel, mielőtt elbomlanak.

A Sztochasztikus Tudómodell és az input adatok

Az összes numerikus tudómodell közül a legrészletesebb, legflexibilisebb és legpontosabb teljes légzőrendszeri aeroszol-depozíciós modell a Sztochasztikus Tudómodell, melynek első verzióját Koblinger László és Werner Hofmann dolgozta ki 1985 és 1992 között [7, 8, 9, 10]

A Sztochasztikus Tudómodell a légutak geometriáját Monte-Carlo technikák alkalmazásával az egyik legnagyobb légzőrendszeri adatbázis [11] adatainak statisztikus kiértékeléséből levezetett eloszlás- és korrelációs függvények alapján hozza létre. Az acináris régió leírásához felhasználja továbbá a Haefeli-Bleuer és Weibel féle acináris geometria felépítését és jellemzőit is [12].

E modellt a múltban több területen fejlesztették és használatával számos nemzetközi referált folyóiratban jelent meg publikáció [13, 14, 15, 16].

A Sztochasztikus Tudómodell a felső légutakban empirikus formulák segítségével határozza meg a kiülepedett részecskefrakciót. E szimulációk során a Cheng és munkatársai által 2003-ban publikált formulát alkalmaztuk [17].

A felhasznált légzési paraméterek egészséges felnőtt férfi esetén az ICRP 66-os kiadványából [22] származnak. A COPD-s felnőttre használt légzési paramétereket és a légutak szűkületének mértékét pulmonológusokkal való konzultáció során állapítottuk meg (1. táblázat).

1. táblázat. Légzési paraméterek

Személy	FRC (cm ³)	Légzési térfogat (cm ³)	Légzési frekvencia (1/perc)
Ülő egészséges felnőtt férfi	3300	750	12
COPD-s felnőtt férfi	4000	1200	16

A légzőrendszer -a belélegzett radon leányelemek bomlásából származó sugárterhelését- számos tényező befolyásolja. Ezek közül a légzési mód, illetve a légúti geometria függ a testalkattól, egészségi állapottól, a kortól, illetve a nemtől is.

Jelen munka legfontosabb kérdése, hogy egy kiválasztott személyre jellemző egyéni adottságok (légzési mód és egészségi állapot) hogyan befolyásolják az inhalált radon

leányelemek bomlásából származó – a sejtmagokra vonatkoztatott – elnyeltdózis-teljesítményeket.

A légzési mód hatásának vizsgálatához szimulációkat végeztünk orr- vagy szájlégzést végző ülő egészséges felnőtt férfire. Az egészségi állapot hatásának vizsgálatához számításokat végeztünk továbbá beteg, COPD-s orrlégző felnőttre is.

A lakásra jellemző egyensúly-ekvilans radonleányelem aktivitáskoncentráció minden szimulációnál 40 Bq/m^3 , a leányelemek aktivitásának aránya pedig $0.58/0.44/0.29$ volt [2]. A kitapadt leányelemek 200 nm aerodinamikai átmérőjűek, a ki nem tapadt leányelemek pedig 1 nm termodinamikai átmérőjűek voltak [3].

Az elvégzett szimulációkban a potenciális alfa-energiakoncentráció 6%-át képviselik a ki nem tapadt 218-as tömegszámú polónium részecskék [3]. Kizárólag ezen izotóp alkotja továbbá a ki nem tapadt részecske frakciót.

A leányelemek aktivitáskoncentrációjából, illetve izotóparányából az 2. táblázatban látható izotópszám szerinti koncentrációkat az ICRP 65 [18] által leírt eljárás szerint határoztuk meg.

2. táblázat.: Szám szerinti izotópkoncentrációk

Izotóp	Szám szerinti koncentráció (részecske/ m^3)
^{218}Po	6020 (2360 ki nem tapadt)
^{214}Pb	40177
^{214}Bi	19460

A dozimetriai és a tisztulási modell

A radon leányelemek bomlásából származó sugárterhelés valósághű modellezéséhez egy nyáktisztulási illetve elnyeltdózis-teljesítmény modell került kidolgozásra a Sztochasztikus Tüdőmodell új, Radact nevű változatában [25].

A dózisszámítás első lépése a kiüledéseloszlás meghatározása volt. Ezután következett a nyáktisztulás hatásának modellezése, illetve a bomlások valószínűségének szimulálása a tisztulási modellel.

Harmadik, utolsó lépésként a dózisteljesítményt számító modell háromdimenziós részecskepályák létrehozásával szimulálta a kibocsátott alfa-részecskék útját a kibocsátó izotóptól a célsejtek magjáig. Ennek során a modell a sugárérzékeny sejt magjában megtett út alatt leadott energia, illetve a sejtmag tömegének ismeretében kiszámította a sejtmagokra vonatkoztatott elnyeltdózis-teljesítményeket.

A tisztulási modellben a kiülededett részecskék azonnal mozogni kezdtek a légutakat fedő nyákréteggel. A nyáksebesség $0,55 \text{ cm/perc}$ [19] volt a tracheában mely a légzőrendszerben lefelé haladva $0,67$ -es faktorról [20] csökkent minden egyes légúti generációban.

A nyáksebességet egy adott légúti generációban tehát a $0,55 \cdot 0,67^{k-1}$ képlettel határoztuk meg, ahol k a légúti generáció száma volt.

A sejtmagokra vonatkoztatott átlagos elnyeltdózis-teljesítmények számítása során szükséges az egy átlagos alfa-részecske találata során egy sejtmagban elnyelt energia számítása. Ehhez ötvenezer 218-as és 214-es tömegszámú polónium izotópot elhelyeztünk el véletlenszerűen a légutakat borító nyákréteg tetején. Minden elhelyezett ^{218}Po izotópból egy 6 MeV -es, illetve ^{214}Po izotóp esetén egy $7,69 \text{ MeV}$ -es alfa-részecskét indítottunk el a légutak közepe körül elhelyezett bazális, illetve kiválasztó célsejtek magja felé.

A sugárérzékeny (bazális és kiválasztó) sejtek mélységeloszlása a Mercer és munkatársai [21] által publikált adatok alapján lett meghatározva.

EREDMÉNYEK

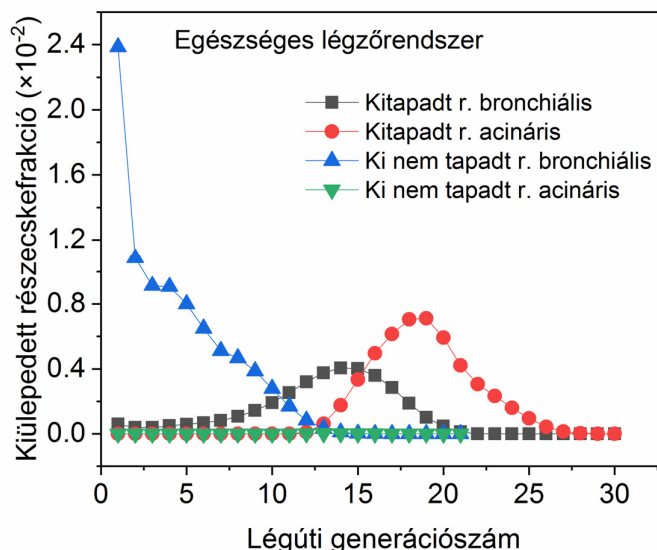
A kiülepedett leányelem részecskefrakciók nagysága kitapadt és ki nem tapadt radon leányelemek esetén.

A dózisszámítás során első lépés a belélegzett részecskék kiülepedésseloszlásának meghatározása. A kiülepedett részecskefrakció a kiülepedett és a belélegzett részecskék számának arányaként adható meg.

A ki nem tapadt és a kitapadt részecskék kiülepedésseloszlása lényegesen eltér egymástól (1. ábra). A felső légutakban nagy valószínűséggel ülepednek ki a ki nem tapadt részecskék (41,8% száj és 90,3% orrlégzés esetén), így a belélegzett leányelemek csupán kis része éri el a bronchiális, illetve acináris régiót. A szájban vagy orrban ki nem ülepedett ultrafinom részecskék azonban nagy valószínűséggel ülepednek ki a bronchiális légutakban is. A ki nem tapadt részecskék kiülepedésseloszlásának maximuma ezért a centrális légutakban, azaz a nagy átmérőjű bronchiális légúti generációkban található.

A kitapadt leányelemek felső légúti kiülepedése nem jelentős (1,74% szájlegzés és 7,32 % orrlégzés esetén). E leányelemek tüdőbeli kiülepedésseloszlása egy bronchiális és egy acináris csúccsal jellemezhető.

A bronchiális csúcs maximuma a 12.-16., az acináris csúcs maximuma a 17.-20. légúti generáció között található.



1. ábra. A kiülepedett leányelem részecskefrakciók nagysága kitapadt és ki nem tapadt radon leányelemek esetén orrlégző, ülő felnőtt férfira

A sejtmagokra vonatkoztatott elnyeltdózis-teljesítmények számítása

A sejtmagokra vonatkozó elnyeltdózis-teljesítmények számítása során a leglényegesebb paraméterek az adott légúti generációban elbomlott 218-as illetve 214-es tömegszámú polónium atomszám, az egy találattal során átlagosan leadott energiamennyiség és az adott célsejt találati valószínűsége. E paraméterek mindegyike függ a vizsgált személy légzési módjától, illetve egészségi állapotától.

Mivel a légutak száma a bifurkációk miatt 2^{k-1} összefüggés szerint növekszik (itt k a légúti generációs szám) az adott légútban kiüledett 218-as és 214-es tömegszámú polónium atomok száma általában csökken a garattól az utolsó légúti generáció felé haladva.

A találati valószínűség, illetve az egy találat során egy bazális, illetve kiválasztó sejt magjában elnyelt energia azonban jellemzően nő az elsőtől az utolsó légúti generációig. Ennek oka, hogy a légutakban lefelé haladva az azt alkotó csövek átmérője, illetve hossza valamint a nyákréteg vastagsága csökken, ami miatt a kibocsátott alfa-részecskéknek egyre kisebb utat kell megtenniük a célsejtig a légúti epitéliumon, illetve a légutakat kitöltő levegőn keresztül.

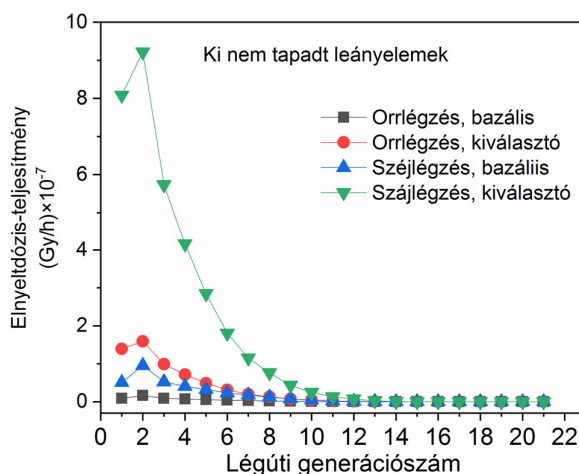
A légzési mód hatása a sejtmagokra vonatkozó elnyeltdózis-teljesítményekre

Fontos kérdés, hogy miképpen befolyásolja a légzési mód (orr vagy szájlégzés) az elnyeltdózis-teljesítményeket a légzőrendszer sugárérzékeny sejtjeiben. Ennek vizsgálatára számításokat végeztünk orr-, illetve szájlégző ülő egészséges felnőtt férfire. Mivel a felső légutak szűrőfunkciót is ellátnak, nagymértékben befolyásolhatják a légutak sugárterhelését.

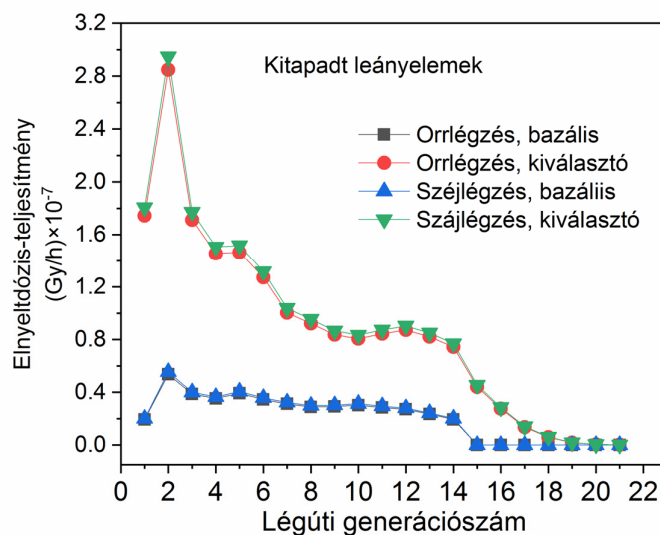
Az orr hatékony, míg a száj kevésbé hatékony szűrő az 1 nm-es mérettartományban.

Amíg orrlégzés esetén a belélegzett ki nem tapadt leányelemek kb. 90%-a már a felső légutakban kiül, addig szájlégzés esetén több, mint 58%-uk eléri a sugárérzékeny sejteket tartalmazó bronchiális régiót. Szájlégzés esetén ezért a légzőrendszerben található kiválasztó sejtek sugárterhelésének jelentős hányada származik a ki nem tapadt 218-as tömegszámú polónium atomok bomlásából (2. ábra). Orron át lélegezve az ezen izotóp bomlásából származó sugárterhelés csupán 20-30%-a a szájlégzés esetén tapasztalható dózisteljesítményekhez képest a nagy átmérőjű bronchusokban (légúti generáció 1-4).

A ki nem tapadt részecskékből származó dózisteljesítmények maximuma a második légúti generációban található. A légúti generációs szám növekedésével ezután gyorsan csökken a bronchiális légutak bazális és kiválasztó sejtjeinek sugárterhelése. Ez elsősorban azzal magyarázható, hogy a ki nem tapadt leányelemek igen nagy valószínűséggel ülepednek ki az első néhány bronchiális légútban (lásd az 1. ábrát).



2. ábra. A légzési mód hatása az elnyeltdózis-teljesítmények nagyságára ki nem tapadt radon leányelemek esetén



3. ábra. A légzési mód hatása az elnyeltdózis-teljesítmények nagyságára kitapadt radon leányelemek esetén

A kitapadt leányelemek bomlásából származó dózisteljesítmények maximuma, akár a ki nem tapadt leányelemek esetén, szintén a második légúti generációban található. A 2. és 3. ábrát összehasonlítva fontos azonban kiemelni, hogy a kitapadt részecskéknél (3. ábra) sokkal lassabb a sejtmagokra vonatkozó elnyeltdózis-teljesítmények csökkenése, mint a ki nem tapadt részecskéknél (2. ábra). Ez annak köszönhető, hogy ezen izotópok kiülepedési valószínűségének maximuma a 14. légúti generációban található (lásd az 1. ábrát). Más lesz tehát a dózisteljesítményeket befolyásoló paraméterek összhatása.

A kitapadt 200 nm-es átmérőjű leányelemek dóziseloszlását csupán kis mértékben befolyásolja az extrathorakális rendszer. Ezen izotópok kis valószínűséggel ülepednek ki a felső légutakban (orr-száj-garat-gége), valamint a bronchiális, illetve az acináris régióban is csekély a kiülepedés valószínűsége. Belégzés után számottevő hányadát lélegezzük ki ezért ezeknek az izotópoknak.

Mivel a kitapadt izotópok között nagyszámú 214-es tömegszámú ólom, illetve bizmut található, jelentős azon atomok száma, amelyek nem abban a légútban bomlanak el, ahol kiülepedtek. Nagymértékben befolyásolja tehát a nyáktisztulás a kitapadt radon leányelemek bomlásából származó dózisteljesítmények eloszlását. Ennek vizsgálatához nem megfelelőek a regionális tüdőmodellek, mint például a sugárvédelem által leggyakrabban alkalmazott Human Respiratory Tract Model [22].

A bemutatott eredmények alapján kijelenthető, hogy a légutak sugárterhelése erősen függ a légzési módtól. Szájleghzés esetén (elsősorban a ki nem tapadt 218-as tömegszámú polónium izotópok miatt) sokkal több energia nyelődik el a légzőrendszer sugárérzékeny bazális, illetve kiválasztó sejteinek magjaiban, mint orrlégzés esetén. Olyan helyeken, ahol nagy radon aktivitáskoncentráció mérhető, nem javasolt tehát szájon át lélegezni.

Erősen inhomogének továbbá a szimulált dózisteljesítmények a bronchiális légúti generációk mentén. A szimulációk szerint a nagy átmérőjű bronchiális légutak (légúti generáció 1-4.) azok, ahol a sejtmagokra vonatkoztatott elnyeltdózis-teljesítmények a legnagyobbak mindkét légzési mód esetén. Az irodalomban található tüdőpatológiai adatok [23, 24] igazolják, hogy a légzőrendszeri daganatok jelentős része éppen ott alakul ki, ahol modellszámításaink alapján legnagyobbak az elnyeltdózis-teljesítmények.

Az elvégzett szimulációk eredményei alapján kijelenthető továbbá, hogy jelentős különbség adódik a két modellezett sejttípus (bazális, kiválasztó) sugárterhelése között.

A bazális sejtek magjában elnyelt energia mennyisége mind kitapadt, mind ki nem tapadt leányelemek esetén kisebb a kiválasztó sejtek magjaiban elnyelt energiamennyiségnél. Ez a két sejttípus eltérő mélységeloszlásával magyarázható. A kiválasztó sejtek megtalálhatóak a légutaknak a kiüledett alfa-bomló izotópokhoz közel eső részén is. A bazális sejtek ezzel szemben jellemzően mélyen fekszenek, így a kibocsátott alfa-részecskék jelentős része előbb fékeződik le teljesen, minthogy elérné ezeket a sejteket.

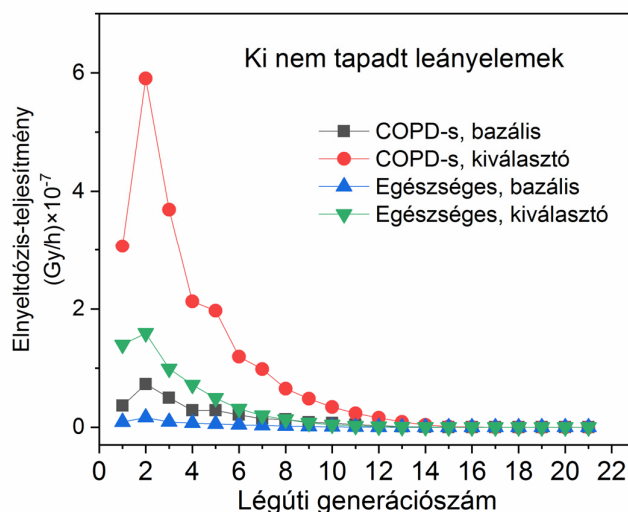
Az egészségi állapot hatása az elnyeltdózis-teljesítményekre

A légzési mód hatásán túl lényeges megvizsgálni, hogy hogyan befolyásolja az egészségi állapot (egészséges vagy légzőrendszeri megbetegedésben szenvedő) a légzőrendszer sugárérzékeny sejtjeinek esetében a sejtmagokra vonatkoztatott elnyeltdózis-teljesítményeket. Ennek vizsgálatára számításokat végeztünk mind egészséges mind krónikus obstruktív légzőrendszeri megbetegedésben (COPD) szenvedő felnőttek.

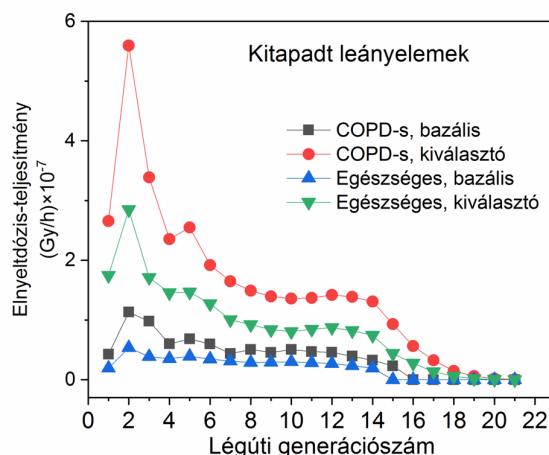
Az adott légútban kiüledett 218-as és 214-es tömegszámú polónium izotópok száma a kiüledett részecskefrakció nagyságán túl függ a belélegzett levegő mennyiségétől is. Ez a szimulált III. súlyossági osztály esetén $1,15 \text{ m}^3$ COPD-s esetben és $0,54 \text{ m}^3$ amennyiben ülő, egészséges alanyt vizsgálunk.

Bár az elnyeltdózis-teljesítmények lefutása hasonló, a sugárterhelés mértéke különböző beteg és egészséges légzőrendszerben (4-5. ábra)

Mivel a beteg, asztmás, illetve emfizémás légutak szűkebbek, beteg légzőrendszer esetén az egészségeshez viszonyítva megnő a kiüledett radonleányelemek száma, a találati valószínűség, továbbá az átlagosan leadott energiamennyiség is. Ez tovább erősíti az egységnyi idő alatti nagyobb belélegzett levegőmennyiség hatását. Ki nem tapadt leányelemek esetén a második légúti generációban körülbelül háromszor akkora az elnyeltdózis-teljesítmény COPD-s, mint egészséges esetben.



4. ábra. Az egészségi állapot hatása az elnyeltdózis-teljesítmények nagyságára ki nem tapadt radonleányelemek esetén



5. ábra. Az egészségi állapot hatása az elnyeltdózis-teljesítmények nagyságára kitapadt radonleányelemek esetén

Kitapadt leányelemek esetén, bár a különbség kisebb, mégis COPD-s esetben körülbelül kétszer nagyobb a sugárérzékeny sejtek magjában szimulált elnyeltdózis-teljesítmény, mint az egészséges alanyok esetében.

Jelentős mértékben eltér tehát az egészséges és a légzőrendszeri megbetegedésben szenvedő egyének légútjaiban található bazális és kiválasztó sejtek sugárterhelése. Eredményeink alapján kijelenthető, hogy ugyanazt a levegőt belélegezve beteg egyének esetén nagyobb lehet a potenciálisan rákhoz vezető elváltozások száma a légzőrendszer bronchiális régiójában, mint egészséges társaik esetében.

ÖSSZEFOGLALÁS

A légzőrendszer radonleányelemek alfa-bomlásából származó sugárterhelése ma még nem határozható meg kísérleti úton (a lokális biológiai hatást leírni képes) légúti generáció szintű felbontással.

A sugárvédelem e területén nélkülözhetetlenek tehát az egész légzőrendszeri tüdődozimetriai modellek.

A sejtmagokra vonatkoztatott elnyeltdózis-teljesítmények a belélegzett levegőben mérhető radonleányelem aktivitáskoncentráción, illetve részecskeméret-eloszláson túl erősen függenek a vizsgált egyén légzési módjától (orr- vagy szájlégzés), illetve egészségi állapotától (egészséges, asztmás, COPD-s) is.

A felső légutak (orr vagy száj, garat, gége) szűrő szerepe lényeges a légzőrendszer sugárterhelése szempontjából. Az orrlégzés a szájlégzéshez képest jelentős mértékben csökkenti a légzőrendszer sugárérzékeny bazális, illetve kiválasztó sejtjei esetében tapasztalható dózisteljesítményeket.

Beteg légutak esetén egészséges légzőrendszerhez képest jelentősen nagyobb továbbá a bronchiális légutak sugárterhelése.

Ezen eredmények jól demonstrálják, hogy a radonleányelemek bomlásából származó sugárterhelés meghatározása összetett feladat a légzőrendszerben, melyet számos -az egyéni adottságoktól függő- paraméter befolyásolhat.

Az elnyeltdózis-teljesítmények, ezáltal a biológiai hatás pontos becsléséhez személyre szabott radonleányelem-dozimetriára van tehát szükség.

E cél eléréséhez egy egyedülállóan finom felbontású és rendkívül flexibilis eszköz a Sztochasztikus Tüdőmodell új, Radact változata, melynek segítségével megvalósítható az egyénre szabott radonleányelem tüdődozimetria.

IRODALOM

- [1] BEIR VI Report. Health effects of exposure to radon. National Academy Press, Washington, DC. (1999)
- [2] UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. Sources and effects of ionizing radiation, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. (2000)
- [3] Haninger T, Size distributions of radon progeny and their influence on lung dose, Radon and Thoron in the Human Environment. Proceedings of the 7th Tohwa University International Symposium, World Scientific Singapore, New Jersey, London, Hong Kong. (1997)
- [4] Balásházy I, Hofmann W, Quantification of local deposition patterns of inhaled radon decay products in human bronchial airway bifurcations. Health Phys. 78, 2: pp.147-158. (2000)
- [5] Farkas Á, Balásházy I, Szöcs K, Characterization of regional and local deposition of inhaled aerosol drugs in the respiratory system by computational fluid and particle dynamics methods. Journal of Aerosol Medicine 19: pp. 329-343. (2006)
- [6] Farkas Á, Hofmann W, Szöke I, Balásházy I, Effect of site-specific bronchial radon progeny deposition on the spatial and temporal distributions of cellular responses. Rad.Env.Bioph. Volume 50, Issue 2: pp. 281–297 (2011)
- [7] Koblinger L, Hofmann, W, Analysis of human lungmorphometric data for stochastic aerosol deposition calculations. Phys. Med. Biol. 30: pp. 541–556. (1985)
- [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: pp. 661-674. (1990)
- [9] Hofmann W, Koblinger L, Monte Carlo modeling of aerosol deposition in human lungs. Part II: Deposition fractions and their sensitivity to parameter variations. J. Aerosol Sci. 21: 5, pp. 675-688. (1990)
- [10] Hofmann, W, Koblinger, L, Monte Carlo modeling of aerosol deposition in human lungs. Part III: Comparison with experimental data. Journal of Aerosol Science 23, 1: pp. 51- 63. (1992)
- [11] Raabe O G, Yeh H C, Schum G N, Phalen R N , Lovelace Foundation Report LF-53. (1980)
- [12] Haefeli-Bleuer, B, Weibel E.R, Morphometry of the human pulmonary acinus. Anatomical Records 220: pp. 401-414. (1988)
- [13] Salma I, Füri P, Németh Z, Lung burden and deposition distribution of inhaled atmospheric urban ultrafine particles as the first step in their health risk assessment. Atmos Environ 104: pp. 39–49. (2015)
- [14] Füri P, Hofmann W, Jókay Á, Balásházy I, Moustafa M, Czitrovsky B, Kudela G, Farkas, Á, Comparison of airway deposition distributions of particles in healthy and diseased workers in an Egyptian industrial site, Inhal.Toxic, 29(4): pp. 1-13 (2017)
- [15] Farkas Á, Jókay Á, Füri P, Balásházy I, Müller V, Odler B, Horváth A, Computer modelling as a tool in characterization and optimization of aerosol drug delivery. Aerosol Air Qual Res 15: pp. 2466-2474. (2015)

- [16] Farkas Á, Jókay Á, Balásházy I, Füri P, Müller V, Tomisa G, Horváth A, Numerical simulation of emitted particle characteristics and airway deposition of Simbicort® Turbuhaler® dry powder fixed combination aerosol drug. *European Journal Of Pharmaceutical Sciences* 93: pp. 371-379. (2016)
- [17] Cheng YS, Aerosol deposition in the extrathoracic region. *Aer Sci and Tech* 37: pp. 659-671.33. (2003)
- [18] International Commission on Radiological Protection (ICRP) Publication 65. Protection against radon-222 at home and at work. Pergamon Press (1993)
- [19] Chopra S.K, Measurement of tracheal mucociliary transport velocity in human smokers versus nonsmokers, *Am. Rev. Respir. Dis.*, 119, Suppl. 205.(1979)
- [20] Sturm R, Hofmann W, Stochastic modelling predictions for the clearance of insoluble particles from the tracheobronchial tree of the human lung. *Bulletin of Mathematical Biology* 69: pp. 395-415. (2007)
- [21] Mercer R. R, Russell M.L, Crapo, J.D, Radon dosimetry based on the depth distribution of nuclei in human and rat lungs. *Health Phys* 61: pp. 117–130. (1991)
- [22] ICRP Publication 66, Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection, *Annals of the ICRP* 24, Pergamon Press, Oxford, UK. (1994)
- [23] Veeze P, Rationale and methods of early detection in lung cancer. Assen, The Netherlands: Van Gorcum, (1968)
- [24] Garland LH, Beier RL, Coulson W, Heald JH, Stein RL, The apparent sites of origin of carcinomas of the lung. *Radiology* 78: pp. 1–11. (1962)
- [25] Füri P, Farkas Á, Madas B.G. et al. *Radiat Environ Biophys* (2019). <https://doi.org/10.1007/s00411-019-00814-0>

Készült a SOMOS alapítvány támogatásával

A SUGÁRVÉDELEM MOSTOHAGYERMEKEI: A NEM-IONIZÁLÓ SUGÁRZÁSOK

Finta Viktória

ELTE-TTK, Környezettudományi Centrum, 1117 Budapest, Pázmány P. s. 1/C

*fintaviki@caesar.elte.hu

A kézirat beérkezett: 2019.09.19.

Közlésre elfogadva: 2019.11.26.

The stepchildren of the radiation protection: the non-ionizing radiations – The experts of radiation protection usually focus much less on non-ionizing radiations most probably because there is no obvious evidence of the harmful health effects connected to them like in the case of ionizing radiation. Even though the quantumenergy of these radiations is below the ionizing threshold, it would be important to know about all alarming facts. The aim of this paper is to describe these radiations in detail and to draw more attention to this particular field of radiation protection based on our research's findings.

Keywords: non-ionizing radiations, electromagnetic waves, radiofrequency, extremely low frequency, possibly human carcinogen

Kivonat – Sugárvédelmi szakmai körökben kevés hangsúlyt kapnak a nem-ionizáló sugárzások. Ennek oka többek között az, hogy eddig nem találtak olyan nyilvánvaló egészségkárosító hatást, mint az ionizáló sugárzásoknál. Habár ezen sugárzások kvantumenergiája nem éri el az ionizáló szintet, azonban hasznos tisztában lenni azokkal a tényekkel, amik mégis némi aggodalomra adhatnak okot. A cikk célja röviden bemutatni ezt a területet és az eddigi kutatási eredmények alapján felhívni a figyelmet a sugárvédelem ilyen vonatkozásaira.

Kulcsszavak – nem-ionizáló sugárzások, elektromágneses hullámok, rádiófrekvencia, extrém alacsony frekvencia, lehetséges emberi rákkeltő

BEVEZETÉS

Nem-ionizáló sugárzásoknak a 3 PHz alatti frekvenciájú elektromágneses (EM) sugárzásokat (hullámokat, tereket) nevezzük. Ide tartoznak az optikai sugárzások, a rádióhullámok, valamint az alacsonyfrekvenciás EM terek. A tömeges hétköznapi használat és a mesterséges források nagy aránya miatt a WHO kiemelten kezeli a rádiófrekvenciás és mikrohullámú tartományt (RF-MH: 300 kHz–300 GHz), valamint az extrém alacsony frekvenciájú tereket (ELF: 3 – 300 Hz) [1]. Az elsőbe tartoznak többek között a TV- és rádióadók, a mobiltelefon készülékek és bázisállomások, az egyéb vezeték nélküli eszközök és a mikrohullámú sütő is. Az ELF sávban pedig a mindennapi életben legjelentősebb az 50/60Hz-es EM tér, ami gyakorlatilag minden elektromossággal működő készülékünk körül létrejön (számos háztartási gépünk meglehetősen nagy mágneses indukciót generál), illetve kiemelendő források még a nagyfeszültségű távvezetékek és a transzformátorállomások.

Ezek a sugárzások bár nem ionizálnak, de elektromos-, mágneses-, és hőhatásuk jelentőséggel bírhat biológiai szempontból is, különösen, mert a természetes háttér pl. a rádiófrekvenciás a tartományban gyakorlatilag nulla [2]. Ráadásul például a mobiltelefon technológia esetében a nagy érintett népesség miatt már egy kis egészségügyi kockázat is népegészségügyi következményekkel járhat.

Éppen ezért állatkísérletek alapján már jogszabályban rögzítettek egészségügyi lakossági és munkahelyi határértékeket emberre nézve a 0–300 GHz közötti tartományra [3a-b]. Ezen felül

epidemiológiai tanulmányokra alapozva az IARC (Nemzetközi Rákkutató Ügynökség) mind a RF-MH sugárzásokat, mind az ELF tereket besorolta a lehetséges emberi rákkeltő (2B) kategóriába [4].

SUGÁRVÉDELEM

Az ionizáló sugárzások elleni védelem alapelvei az indokoltság, az optimálás (ALARA) és a dóziskorlátozás. A védekezés fizikai megvalósításának három pillére pedig az idő, a távolság és az árnyékolás. A következőkben ezeket a nem-ionizáló sugárzások összefüggésében vizsgáljuk meg.

Alapvető különbség van az ionizáló és nem-ionizáló sugárzások között a fizikai tulajdonságaikban, és ez nem csak az ionizálási képességben nyilvánul meg. A hullámhossz növekedésével egyre kevésbé tekinthetők sugárzásnak, a kölcsönhatásokban nem közvetlenül a leadott energia játszik szerepet, a fizikai expozíció és biológiai dózis összefüggése is bonyolultabb. A biológiai és káros egészségi hatás közötti összefüggés pedig még kevésbé egyértelmű, tehát nem is állítható fel az ionizáló sugárzásoknál jellemző dózis-hatás görbe. Ezen kívül nem bizonyított az sem, hogy bármely kis expozíciónak lehet egészségügyi következménye. Ezért a WHO bár az elővigyázatosság elvét támogatja, de az ICNIRP ajánlásai alapján a bizonyított egészségkárosító hatások elleni védelem elvét alkalmazza (nem a bármilyen mértékű biológiai hatások elleni védelmet) ebben a tartományban [2].

Az indokoltság elve és az ALARA-elv az elővigyázatos megközelítéshez tartozik, amely azt hangsúlyozza, hogy a sugárzási szinteket a technológiailag elérhető legalacsonyabb szinten kell tartani, és ettől csak gazdaságilag indokolt esetben és kellő tudományos alátámasztottság mellett lehet eltérni. Azonban ezek alkalmazására az ionizáló sugárzásokkal ellentétben a nem-ionizáló tartományban nincs elég tudományosan igazolt ok. A dóziskorlátozás már az egészség védelmének körébe sorolható, ami azon alapul, hogy a tudományosan igazolt hatások alapján egészségügyi határértékeket állapítanak meg. A lakossági, illetve munkahelyi határértékekre vonatkozó magyar jogi szabályozás a nemzetközi ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, ICNIRP), illetve az EU Irányelveivel összhangban született meg [3a-b, 5].

„DOZIMETRIA”

A hatásmechanizmusban egyébként a két kiemelt frekvenciatartomány különbözik egymástól. A RF-MH frekvenciasávban az egészségi hatások elsősorban a sugárzás hőhatásával hozhatók összefüggésbe. Így ezt a szövetben fajlagosan elnyelt teljesítményhez (Specific Absorption Rate – SAR) kötik, míg az expozíció jellemzésére a levegőben mért elektromos térerősséget, illetve a teljesítménysűrűséget használjuk. Az ELF tartományban az EM tér által keltett testáramokhoz kapcsolható az egészségi hatás, ezért itt a biológiai dózisjellegű fogalom az áramsűrűség, az expozíciót pedig leggyakrabban a levegőben mérhető mágneses indukcióval jellemezzük. Ugyanakkor az új ICNIRP ajánlásban az 1 Hz–100 kHz tartományban már a szövetekben indukált elektromos térerősség a dózis ún. alapkorlátja, de a hazai rendeletben még az előbbi szerepel [6a-b].

1. táblázat. A jellemző fizikai és biológiai mennyiségek összefoglalása

Megnevezés	Tartomány	A fogalom		
		neve	jele	mértékegysége
EXPOZÍCIÓ	RF-MH	Elektromos térerősség	E	V/m
		Teljesítménysűrűség	S	W/m ²
	ELF	Mágneses indukció	B	T
DÓZIS	RF-MH	Fajlagosan elnyelt teljesítmény	SAR	W/kg
	ELF	Áramsűrűség (indukált elektromos térerősség)	j (E)	A/m ² (V/m)

A levegőben mérhető teljesítménysűrűségből nem számolható ki egyszerű összefüggéssel az SAR, mert a rádiófrekvenciás hullámok elnyelődése a frekvencia mellett függ az anyag elektromos és mágneses tulajdonságaitól. Ezt egyébként nagyban befolyásolja a szövet víztartalma, és a mérések alapján például ugyanaz a testrészt más elnyelődést mutathat kortól és nemtől függően is. Ezért az SAR-t a levegőben mérhető expozícióból számítógépes szimulációval lehet meghatározni, de készültek erre direkt mérési módszerek is [7, 8, 9, 10].

Az in vitro és in vivo kísérletek alapján, az emberre nézve meghatároztak ún. alapkörlátokat az SAR, illetve indukált áramsűrűség, indukált elektromos térerősség értékekre. Ezek alapját a RF-MH tartományban a hőhatás, az ELF tereknél pedig a testáramok, illetve a szövetekben indukált elektromos térerősség képezte, mint olyan biofizikai kölcsönhatás, ami bizonyos kitettség felett egészségi következményekkel járhat. Emellett a levegőben mérhető, expozíciót jellemző mennyiségekre frekvenciafüggő vonatkoztatási határértékeket, szinteket rögzítettek [3a-b].

Mivel az EM expozíció térben és időben rendkívül változékony, ráadásul nagymértékben függhet az egyéni elektromos, illetve mobil készülékek használatától is, ezért erre a célra hordozható expozimétereket is kifejlesztettek mindkét fent említett frekvenciatartományban. A mobiltelefonok robbanásszerű elterjedése miatt a 2000-es években számos felmérés indult az egyént érő valós RF-MH expozíció meghatározására. A szerző közreműködésével az ELTE és az OSSKI (jelenleg NNK) között 2007-ben kezdődött együttműködés keretében több ilyen felmérés is készült az expoziméterekkel.

Az ELF tartományban az EMDEX PAL (Enertech) mérőeszköz a 40–1000 Hz frekvenciasávban fél másodpercenként méri a mágneses indukció értékét, majd egy szoftver segítségével ezt kiolvashatjuk és ábrázolhatjuk az idő függvényében [11].



1. ábra. EMDEX PAL (saját fotó)

A RF-MH sugárzás esetében az EME Spy 121 (Satimo) műszer a 88–2500 MHz frekvenciatartományon belül 12 sávban (FM, TV-VHF, TV-UHF, TETRA, GSM

uplink/downlink, DCS uplink/downlink, DECT, UMTS uplink/downlink, WLAN) változtatható mérési idővel méri az elektromos térerősséget az idő függvényében, szintén szoftveres kiolvasással és ábrázolással [12]. (Mindkét műszerből készültek azóta továbbfejlesztett verziók, melyeket az Enertech, illetve a Microwave Vision Group forgalmaz.)



2. ábra. EME Spy 121 (saját fotó)

A mérések tanúsága szerint egy átlagembert érő expozíció nagyságrendekkel alatta marad a jogszabályban jelenleg meghatározott egészségügyi határértékeknek [13, 14].

EM SUGÁRZÁSOK ÉS EGÉSZSÉG

Számos kutatás vizsgálta mind az ELF terek, mind a RF-MH sugárzások biológiai és egészségi hatásait. A kutatások egy része kísérletes (in vitro, in vivo), másik része epidemiológiai tanulmányokból áll. Az egészségügyi határértékek meghatározásánál főleg állatkísérletekben megfigyelt hatásokat vettek alapul, melyek az ELF esetén általában idegi és izom ingerlékenységet, a RF-MH esetén pedig viselkedési zavarokat jelentettek. A legfontosabb kutatási területek a tumorgenezis, genotoxicitás, benne a DNS károsodások kutatása, azonban egyelőre nincsenek olyan jellegű eredmények, mint az ionizáló sugárzásoknál. Ezen felül a nagy mennyiségű ellentmondásos kutatás között az ELF esetében a melatonin-termelődésre, a RF-MH esetében a vér-agy-gáttra való hátrányos hatás látszott igazolódni. Ezeket a főleg állatokban észlelt elváltozásokat azonban emberben igazolni, illetve egészségi hatással összefüggésbe hozni eddig nem sikerült [15, 16].

Létező jelenség az elektromágneses túlérzékenység (hiperszenzitivitás), amikor egyes személyek állításuk szerint érzik az EM sugárzásokat, és azok különböző negatív testi tüneteket okoznak náluk. Egy átfogó elemzés szerint, mely kettős vak kísérleteket is tartalmazott, ennek oka feltehetően az ún. nocebo, amely a placebo ellentéte, azaz vélt negatív hatástól való félelem hatására kialakuló valós negatív tünetek megjelenése [17].

Természetesen az örök nagy kérdés, amely minden ágens esetén felmerül és a közérdeklődésre talán a leginkább számot tart: van-e az emberi szervezetben daganatkeltő/-növelő hatása az EM tereknek. Erre nézve a kísérletek nem hoznak egyértelmű eredményt, nagyobb biztonsággal csak hosszú idő alatt nagy népességen elvégzett részletes epidemiológiai tanulmányok sorozatának elemzésével kaphatunk választ. Az eddigi (gyenge) bizonyítékok alapján a WHO-IARC besorolta a „lehetséges emberi rákkeltő” (2B) kategóriába 2002-ben az ELF mágneses tereket a gyermekkori leukémia epidemiológiai vizsgálatai alapján, illetve 2011-ben pedig a RF EM tereket a mobiltelefon használat során glioma és akusztikus neurinoma epidemiológiai vizsgálatai alapján [4].

Az IARC besorolásokat tekintve egyébként a 2B besorolás azt jelenti, hogy emberben, illetve állatban történő rákkeltésre vonatkozóan elégtelen, illetve korlátozott bizonyítékok állnak rendelkezésre. Amennyiben a bizonyítékok indokoltá teszik, úgy átsorolják egy erősebb kategóriába, a „2A – valószínű emberi rákkeltő” vagy akár az „1 – emberi rákkeltő” típusba.

Az ionizáló sugárzások és – 2018 óta – az UV-sugárzás is az 1-es, emberi rákkeltő kategóriába tartoznak. Olyan is előfordul, hogy ellentmondásos tanulmányok hatására egy ágens kikerül a besorolásból, ekkor „3 – emberi rákkeltés szempontjából nem besorolható”-vá válik, ahogyan 2018-ban a kávéfogyasztással is történt. Itt érdekességgént megemlítendő, hogy az EM terekkel azonos a megítélése, tehát az IARC lehetséges emberi rákkeltőnek minősítette az aloe verát és a ginkgo bilobát is (2016-ban) [4].

ÖNKÉNTES SUGÁRVÉDELEM

A fentiekből látható, hogy a nem-ionizáló EM sugárzások egészségünkre gyakorolt hatásainak kutatása az ionizálókhoz képest gyerekcipőben jár. Habár több mint 60 éve kutatják, nem találtak eddig meggyőző bizonyítékot a határértékek alatti vagy nem-termális hatások igazolására. Számos szabvány (CENELEC, IEEE), ajánlás és direktíva (ICNIRP, EU) foglalkozik a témával, mégis rengeteg a nyitott kérdés. Összetett a problémakör, és az ionizáló sugárzásoknál alkalmazott módszertan csak korlátozottan használható. Különösen a RF-MH tartományra igaz, hogy egész egyszerűen nem telt még el annyi idő a tömeges használattal, amely időskálán egyértelmű trendek lennének megállapíthatóak.

A lakosság részéről kettős a hozzáállás: egyfelől a sugárzásokkal mint érzékszerveinkkel nem észlelhető misztikus démonokkal szembeni – gyakran – indokolatlan félelem, melyre sokszor a média és bizonyos érdekcsoportok még rá is erősítenek (pl. „elektroszmog”-mítosz) [18]. Másfelől természetes, hogy a civilizált életünk része a gépesített otthon, az okostelefon, és az egyéb eszközök, melyeknél gyakran bele sem gondolunk, hogy egy-egy ilyen kényelmi funkció mekkora többlet-expozíciót okozhat. A mindennapokban legnagyobb expozícióval járó személyes használati tárgyaink a RF-MH tartományban pl. a mobiltelefon, helymeghatározó rendszerek, WiFi-router, mikrohullámú sütő; az ELF tartományban pl. a hajszárító, villanyborotva, konyhai robotgép [19].

Az ionizáló sugárzások elleni védelemben alkalmazott elővigyázatossági alapelvek éppen egy olyan arany középutat jelölnek ki, amin talán a nem-ionizáló sugárzásoknál is érdemes járni a mindennapokban – szabályozás hiányában önkéntesen.

Az első az *indokoltság elve*, amit érdemes megvizsgálni saját életünkben. Habár a környezetünkben mások és a társadalom által használt sugárforrásokra (adótornyok, bázisállomások, távvezetékek stb.) nincs hatásunk, de a saját szokásainkat felülvizsgálhatjuk. Megismerve és mérlegelve a környezetünkben lévő eszközök sugárzási tulajdonságait, továbbá az eddigi kutatási eredmények alapján a lehetséges egészségi kockázatokat, mindenki egyénileg eldöntheti, hogy milyen készülékeket és hogyan használ a hétköznapijában. Pl. indokolt-e okostelefont használnom (talán igen), indokolt-e WiFi-routert használnom vezetékes internet helyett (lehet, hogy nem), indokolt-e hajszárítót használnom (lehet, hogy nem) stb.

A következő lépés az *ALARA-elv* alkalmazása lenne, azaz: ha egy EM sugárzást kibocsátó eszköz használatát a saját életemben indokoltnak tartom, akkor is törekedni kell az észszerűen elérhető legalacsonyabb szinten tartani az abból származó expozíciót. Ezt az ionizáló sugárzásokhoz hasonlóan ebben a tartományban is a sugárforrástól való távolság növelésével, a forrás közelében eltöltött idő csökkentésével és esetleges árnyékolással lehet a gyakorlatban megvalósítani. Ugyanakkor fontos látni, hogy vannak hasonlóságok és vannak eltérések ezek alkalmazhatóságában.

Az ELF mágneses indukció a *távolsággal* általában arányosan csökken, a RF-MH teljesítménysűrűség a távolság négyzetével csökken. Ilyen módon tehát a távoli források, még ha nagyobb a sugárzási teljesítményük (bázisállomás), illetve feszültségük (távvezeték), az egyén helyén kisebb pillanatnyi expozíciót szolgáltatnak, mint a saját használatú közeli források (pl. mobiltelefon vagy hajszárító).

Az időfaktor azért kérdéses, mert a kísérleti tapasztalatok alapján ezek a sugárzások nem raktározódnak a szervezetben és biológiailag sem kumulálódnak a hatások. Például nincs arra bizonyíték, hogy egy kétszer hosszabb telefonbeszélgetés kétszer nagyobb (vagy akár csak egyszerűen nagyobb) kockázattal járna. Mindazonáltal a szerző véleménye szerint érdemes az expozíció idejét is optimalni, már csak gazdasági (energiafelhasználás) szempontból is. Erre egészen egyszerű módszerek is vannak, például az okostelefonokat éjszakára repülő vagy „ne zavarjanak” üzemmódba állíthatjuk.

A legkritikusabb téma pedig az árnyékolás. Mindkét tartományban működőképes megoldás lehetne a megfelelő méretű Faraday-kalitka [20], csak hogy a gyakorlatban egyiknél sem igazán működik. Az ELF áthatol a fémes Faraday-kalitkán, legfeljebb ferromágneses megoldás jöhet szóba. Ami azonban kiemelendő, hogy a két tartomány között alapvető különbséget kell tenni az árnyékolás alkalmazásánál. Míg az ELF terek jellemzően „melléktermékként” alakulnak ki a hálózati váltakozó áram környezetében, addig a környezetbe kerülő RF-MH sugárzások javarészt a technológia részeként, vivőkként funkcionálnak. Ha egy transzformátort leárnyékolunk, azzal a működését nem akadályozzuk, míg egy mobiltelefon esetében ez azt jelenti, hogy nem tud hívást, illetve adatot fogadni és küldeni, tehát a működésének a lényegétől fosztjuk meg. Ráadásul, és itt egy létező veszélyre is szeretném felhívni a figyelmet, ha nem teljes leárnyékolásról van szó, akkor a helyzet a visszájára fordul. Kereskedelmi forgalomban kaphatók olyan eszközök (matricák), amelyek – leírásuk szerint – a mobiltelefonra rakva (ragasztva) csökkentik annak sugárzását. Ha tisztában vagyunk a mobiltelefon működésével, akkor könnyen beláthatjuk, hogy amennyiben egy ilyet alkalmazunk, azzal rontjuk a mobiltelefonunk kommunikációjának minőségét, aminek következtében megnő az általa kibocsátott sugárzás szintje. Ilyen matricákat több alkalommal is vizsgáltunk az ELTE-TTK-n és a fenti állítást mérési adatokkal is igazoltuk. Itt megint az eszközök tulajdonságainak, működésének és kockázatainak megismerésének fontosságát kell kiemelni.

ÖSSZEGZÉS

Szakmai körökben is vannak olyan nézetek, melyek szerint a nem-ionizáló sugárzásoknak bizonyosan nincsen semmilyen egészségkárosító hatása, és nem várható semmilyen meglepetés a jövőben ezzel kapcsolatban, ezért fölösleges is a nem-ionizáló sugárzás elleni védelemmel érdemben foglalkozni. Mások óvatosságra intenek, és aggodalmukat fejezik ki a fejlődés üteme és az expozíció drasztikus és ellenőrizetlen megnövekedése miatt. Egyes vélemények szerint egy világméretű emberkísérlet zajlik, és az igazság néhány generációnyi idő múlva fog kiderülni. A történelem már megmutatta néhányszor, hogy semmilyen új találmány vagy felfedezés kezelését és vizsgálatát nem szabad félvállról venni.

Amikor az 5G és az okosvárosok bevezetésének küszöbén állunk, tudatosítanunk kell, hogy egy technológiai forradalom részesei vagyunk, ezért fontos megismernünk a minket körülvevő EM sugárforrásokat és azok valós kockázatait. Bár a WHO szakmailag egyelőre nem tartja indokoltnak az ALARA elvét alkalmazni, észszerű kereteken belül tehetünk azért, hogy a mindennapi életünkben csökkentsük a kockázatokat úgy, hogy az nem megy a kényelem rovására.

IRODALOM

- [1] www.who.int Letöltés időpontja: 2019. 11. 22.
- [2] Thuróczy Gy (2002). A rádiófrekvenciás sugárzások egészségügyi kérdései. Magyar Tudomány 2002/08.

- [3a] 63/2004. (VII. 26.) ESzCsM rendelet a 0 Hz–300 GHz közötti frekvenciatartományú elektromos, mágneses és elektromágneses terek lakosságra vonatkozó egészségügyi határértékeiről: <https://net.jogtar.hu/jogszabaly?docid=a0400063.esc> (2019. 11. 22.)
- [3b] 33/2016. (XI. 29.) EMMI rendelete a fizikai tényezők (elektromágneses terek) hatásának kitett munkavállalókra vonatkozó minimális egészségi és biztonsági követelményekről: <https://net.jogtar.hu/jogszabaly?docid=a1600033.emm> (2019. 11. 22.)
- [4] www.iarc.fr Letöltés időpontja: 2019. 11. 22.
- [5] ICNIRP (1998). Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields (Up To 300 GHz). Health Physics 74: 494-521
- [6a] McKinlay AF, Repacholi MH (ed) (1999). Exposure Metrics and Dosimetry for EMF Epidemiology, NRPB, Radiation Protection Dosimetry 83: No. 1-2
- [6b] <https://www.icnirp.org/cms/upload/publications/ICNIRPLFgdl.pdf> Letöltés időpontja: 2019. 11. 22.
- [7] Lin JC (ed) (1989). Biological Effects of EM Fields. Plenum Press
- [8] Joseph W, Frei P, Rössli M, Vermeeren G, Bolte J, Thuróczy G, Gajsek P, Trcek T, Mohler E, Juhász P, Finta V, Martens L (2012). Between-Country Comparison of Whole-Body SAR From Personal Exposure Data in Urban Areas. Bioelectromagnetics 33(8): 682-94
- [9] Christ A, Kainz W, Hahn EG, Honegger K, Zefferer M, Neufeld E, Rascher W, Janka R, Bautz W, Chen J, Kiefer B, Schmitt P, Hollenbach HP, Shen J, Oberle M, Szczerba D, Kam A, Guag JW, Kuster N (2010). The Virtual Family-development of surface-based anatomical models of two adults and two children for dosimetric simulations. Phys Med Biol 55(2): 23-38.
- [10] <https://www.maschek.de/pdf/ESM-120-uk.pdf> Letöltés időpontja: 2019. 11. 22.
- [11] http://www.enertech.net/catalog/specs/pal_specs.html Letöltés időpontja: 2019. 11. 22.
- [12] http://siwoninc.com/00_pdf/satimo/EMESpy121.pdf Letöltés időpontja: 2019. 11. 22.
- [13] Erőss A (2010). Komplex elektromágneses környezetünk vizsgálata (szakdolgozat). ELTE
- [14] Bánréviné Finta V (2012). Személyi expozíció mérése az elektromágneses spektrum rádiófrekvenciás és mikrohullámú tartományában (doktori értekezés). ELTE
- [15] Thuróczy Gy (1996). Elektromágneses terek biológiai hatásai I: Mikrohullámú és rádiófrekvenciás sugárzások. Magyar Távközlés 7: 50
- [16] Thuróczy Gy (1996). Elektromágneses terek biológiai hatásai II: Alacsonyfrekvenciás elektromos és mágneses terek. Magyar Távközlés 7: 21
- [17] Rubin GJ, Nieto-Hernandez R, Wessely S (2010). Idiopathic Environmental Intolerance Attributed to Electromagnetic Fields (Formerly 'Electromagnetic Hypersensitivity'): Provocation Studies. Bioelectromagnetics 31: 1-11
- [18] <http://radiesztezia.blogspot.com/2011/01/mit-okoz-az-elektoszmog-betegsegek-es.html> Letöltés időpontja: 2019. 11. 22.
- [19] Kokol J (2016). Fizika a környezetünkben – Háztartási gépek vizsgálata (szakdolgozat). ELTE
- [20] Tichy G (2005). Hogyan árnyékolható le a mobiltelefon? Fizikai Szemle 2005/9: 323

Készült a SOMOS Alapítvány támogatásával.