

A KFKI TELEPHELY KÖRNYEZETISUGÁRZÁS-MONITOROZÓ RENDSZEREINEK ÖSSZEHASONLÍTÓ VIZSGÁLATA

Jakab Dorottya*, Endrődi Gáborné, Deme Sándor, Pázmándi Tamás és Tósaki László

Energiatudományi Kutatóközpont, Budapest

*jakab.dora@ek-cer.hu

A kézirat beérkezett: 2021. 06. 02.

Közlésre elfogadva: 2021.07.17.

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE ENVIRONMENTAL RADIATION MONITORING SYSTEMS USED IN THE KFKI CAMPUS

In environmental radiation monitoring both active and passive dosimetry systems are used. While the former provides instantaneous (averaged over a short period of time) dose rates, the latter measures integrated dose over a given time interval. In addition to the differences due to the measurement characteristics, further differences may arise from the calibration procedures and the quantity of data provided (e.g. absorbed dose rate or ambient dose equivalent rate), which makes it difficult to interpret and directly compare the measured data. Dosimetry systems used for environmental radiation monitoring are not able to separate the contribution of ambient gamma radiation, secondary cosmic radiation and intrinsic background components. This may be particularly relevant when the purpose of the measurement is to estimate the effective dose from artificial gamma radiation, which requires the subtraction of the measured contribution of natural components from the measured signal. In the paper, we present the results of the comparative analysis of the environmental radiation monitoring systems used in the KFKI campus, and an approximate method will also be presented for quantifying the components of the environmental radiation field.

Keywords – environmental radiation monitoring, ambient dose equivalent rate, cosmic radiation, GM tube, ionisation chamber, thermoluminescence dosimetry

A sugárvédelmi környezetellenőrzésben egyaránt alkalmaznak aktív, folyamatos üzemű dózisteljesítmény-mérő és passzív dózismérő rendszereket. Míg előbbiek a pillanatnyi (rövid időre átlagolt) dózisteljesítményt adják meg, utóbbiak adott időintervallum alatt integrált dózist mérnek. A méréstechnikai jellemzőkből fakadó eltérések mellett további különbségek adódhatnak a kalibrációs eljárásokból és abból, hogy a szolgáltatott adat milyen mennyiségben (pl. levegőben elnyelt dózisteljesítmény vagy környezeti dózisegyenérték-teljesítmény) kerül megadásra, amelyek megnehezítik a mérési adatok értelmezését és direkt összehasonlítását. A sugárvédelmi környezetellenőrzési céllal használt dózisteljesítmény- és dózismérő-eszközök nem képesek a környezeti gamma-sugárzást, a másodlagos kozmikus sugárzást komponensek és a saját, inherens háttér hozzájárulásának elkülönítésére. Ennek különösen akkor lehet jelentősége, ha a mérés célja a mesterséges eredetű gamma-sugárzás effektív dózisának becslése, amelyhez a mért jelzésből a természetes eredetű komponensek járulékának levonása szükséges. A cikkben ismertetjük a KFKI Telephelyen üzemelő környezetisugárzás-monitorozó rendszerek összehasonlító vizsgálatának eredményeit, és bemutatunk egy közelítő módszert a környezeti sugárzástér komponenseinek számszerűsítésére.

Kulcsszavak – sugárvédelmi környezetellenőrzés, környezeti dózisegyenérték-teljesítmény, kozmikus sugárzás, GM-cső, ionizációs kamra, termolumineszcens dozimetria

BEVEZETÉS

Sugárvédelmi környezetisugárzás-monitorozás

A sugárvédelmi környezetellenőrzés kardinális részét képezik a környezeti sugárzási viszonyokról tájékoztatást nyújtó dózisteljesítmény-mérések. A dózisteljesítmény-mérés a kiemelt létesítmények környezetellenőrzésének is az egyik legfontosabb eleme, hiszen a létesítményre és környezetére vonatkozó sugárvédelmi kritériumok teljesülésének mérésekkel történő igazolását teszi lehetővé, továbbá adatokat szolgáltat a sugárveszélyes tevékenységek következtében a lakosságot érő sugárterhelés meghatározásához.

A sugárvédelemben üzemi terület- vagy környezetellenőrzési céllal használatos dózisteljesítmény- és dózismérő-eszközök között méréstechnikai jellemzőik alapján két fő csoportot, az aktív és passzív mérőeszközök típusát különíthetjük el.

Az aktív mérőrendszerek alapvető célja a sugárzási szintek folyamatos üzemű monitorozása, az abban bekövetkező jelentősebb szintváltozások valós idejű detektálása. A normál üzemtől eltérő állapotok gyors jelzése révén kiemelt szereppel bírnak az optimális óvintézkedések meghozatala tekintetében. Működtetésük azonban rendszeres karbantartást igényel, továbbá a megfelelő területi lefedettség biztosítása nagyszámú detektor kihelyezését teszi szükségessé, amely az aktív rendszerek esetében meglehetősen költséges, mivel a mérőeszközök tápellátásról és a folyamatos üzemből rögzített adatok továbbításáról is gondoskodni kell. Az aktív sugárvédelmi célú dózismérők detektora lehet GM-cső, ionizációs kamra, proporcionális számláló, illetve gamma-spektrum felvételére is alkalmas félvezető és szcintillációs detektorok; kialakításuk tekintetében lehetnek hordozható vagy telepített mérőeszközök.

A passzív mérőeszközök adott időintervallum alatt integrált dózist mérnek, így csak az erre az időtartamra vonatkozó átlagos dózisteljesítmény becslésére alkalmasak. Előnyük azonban, hogy kisméretűek, olcsók, terepi működésükhöz nem igényelnek helyszíni elektronikát vagy áramellátást, ennél fogva környezetellenőrzési célokra széles körben vannak használatban. A gyakorlatban rendszerint a lumineszcencia (termo- vagy fotolumineszcencia, optikailag stimulált lumineszcencia) elvén működő szilárdtest detektorokat alkalmaznak.

A környezetisugárzás-monitorozás a KFKI telephelyi sugárvédelmi környezetellenőrzésben is kettős rendszerű, az aktív dózisteljesítmény-mérő hálózat által szolgáltatott mérési adatok mellett – azok kiegészítésére – passzív dózismérőket használunk. Az aktív (online kapcsolatú) hálózatot 16 darab, fixen telepített GM-csőves távmérő detektor¹ alkotja, amelyek telephelyi elhelyezkedésükkel összhangban némileg eltérő funkcióval rendelkeznek. A mérőhálózat egyaránt szolgál

- a természetes eredetű környezeti sugárzás szintjének monitorozására (a lokális forrásoktól távolabb elhelyezkedő szondák a természetes szintemelkedések és a globális hatások detektálására),
- a lokális légköri kibocsátások ellenőrzésére (a területen lévő potenciális kibocsátási pontok környezetében elhelyezkedő szondák),
- a gépjármű- és személyforgalom ellenőrzésére (a Telephely főbejáratánál és portaépületében elhelyezett gyorsreagálású szondák, elsősorban az izotópszállítás ellenőrzésére).

A passzív dózismérések révén az adott mérőponton a dózisteljesítmény-mérő szondák üzemképtelensége esetén is rendelkezésre áll mérési adat a környezeti sugárzás dóziséjáról, amelyből meghatározható az expozíciós időre vonatkozó átlagos dózisteljesítmény. A könnyen kihelyezhető passzív doziméterek segítségével ugyanakkor a telephely olyan,

¹ Biztonsági céllal még egy (17. számú), a Központi Izotópraktár (KIR) belső terében elhelyezett, nem a környezetben kialakult gamma-dózisteljesítmény ellenőrzését szolgáló szonda is kiépítésre került.

ellenőrzési funkció tekintetében kiemelt területeinek monitorozása is lehetővé válik, ahol az aktív mérőhálózat szondájának telepítése nem volt kivitelezhető.

A sugárvédelmi dózismérők – így a KFKI Telephelyen alkalmazott mérőrendszerek is – levegőben közölt dózis, elnyelt dózis, vagy dózisegyenérték mennyiségekben, illetve ezek időegységre számított teljesítményében szolgáltathatnak adatokat. A Kerma (Kinetic Energy Released per unit Mass) közölt dózis, K , a sugárzási tér jellemzésére használt mennyiségek egyike. Értéke a besugárzott anyag térfogatelemében található közvetetten ionizáló részecskék (gamma- és neutronsugárzás) által keltett, töltéssel bíró ionizáló részecskék kezdeti összegzett kinetikus energiájának és a térfogatelem tömegének hányadosa; mértékegysége gray ($\text{Gy} = \text{J/kg}$) [1]. Az elnyelt dózis, D , a sugárvédelem alapvető fizikai dózis mennyisége. Értéke minden közvetlenül és közvetetten ionizáló sugárzásra vonatkozóan egyenlő a besugárzott anyag térfogatelemében leadott energiának és a térfogatelem tömegének hányadosával; mértékegysége gray ($\text{Gy} = \text{J/kg}$) [1]. A levegőben közölt dózis és az elnyelt dózis mérhető mennyiségek, értékük a közvetetten ionizáló sugárzások esetében, a töltött részecskék egyensúlyának fennállásánál egyenlő, amely feltétel a környezeti sugárzási térnél jó közelítéssel megvalósul. A sugárvédelmi szabályozásban használt egyenérték- és effektív dózis alappmennyiségek közvetlenül nem mérhetők, ezért a gyakorlatban ezek becslésére mérhető, ún. operatív dózisegyenérték mennyiségeket vezettek be. A dózisegyenérték, H , az elnyelt dózis és a sugárzás minőségi tényezőjének szorzataként áll elő. A környezeti sugárterhelést ellenőrző mérések célja annak az effektív dózisegyenértéknek a meghatározása, amelyet az ember kapna a mérőeszköz helyén. Ennek közelítő meghatározására szolgáló, mérhető operatív mennyiség a környezeti dózisegyenérték, $H^*(d)$, amely az irányított és kiterjesztett sugárzási térbe helyezett ICRU gömbfantomban² a beeső sugárzás felőli oldalon d mélységben mérhető dózisegyenérték; mértékegysége sievert ($\text{Sv} = \text{J/kg}$) [1]. A d mélység konvencionális értéke áthatoló sugárzások esetén 10 mm. Az azonos sugárzási térre számított effektív dózis és a gyakorlatban használt mérhető környezeti dózisegyenérték rendszerint jó egyezést mutat, de az eltérések mértéke a sugárvédelmi megfontolásokkal összhangban konzervatív, vagyis ekkor a gyakorlati használatra elfogadott mérhető dózisegyenérték mennyiség meghaladja a vele azonos sugárzási térben számított, sugárvédelmi szabályozásban használt effektív dózist [1].

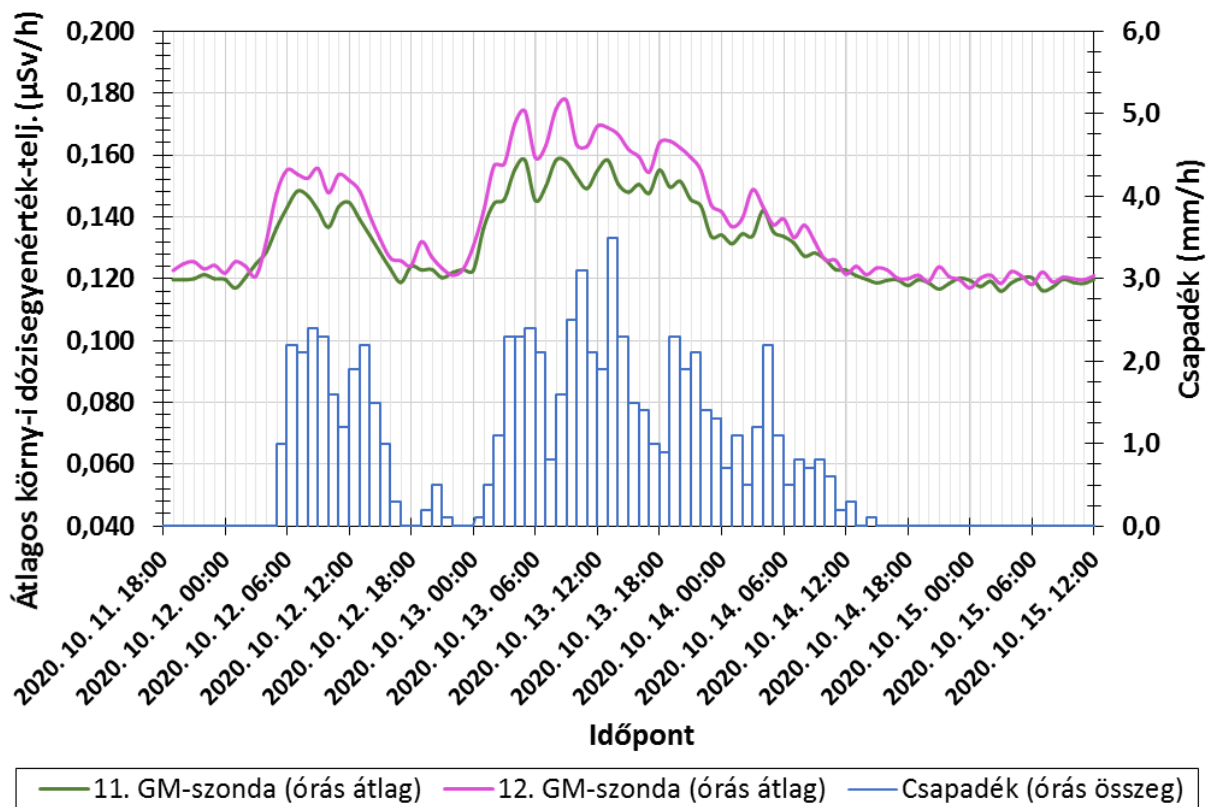
A környezeti sugárzási tér jellemzői

A környezeti elemekben lévő radionuklidok aktivitáskoncentrációja mintavételezésen alapuló mérésekkel meghatározható, az alkalmazott érzékeny mérés technikáknak köszönhetően az egészen alacsony aktivitáskoncentrációk is kimutathatók. A radionuklidok aktivitása összefüggésbe hozható a környezetben kialakuló expozíciós szintekkel, amely pl. a levegőben közölt dózisteljesítmény direkt mérésével jellemezhető és akár valós időben monitorozható.

A környezeti ionizációs sugárzási tér természetes eredetű összetevői a terasztriális (földkérgi) sugárzás és a kozmikus sugárzás. A terasztriális eredetű sugárzás elsődleges forrása a ^{40}K -tól, valamint az ^{238}U sor ^{214}Pb és ^{214}Bi tagjainak bomlásából származó, továbbá a ^{232}Th sorból a ^{208}Tl bomlása során felszabaduló gamma-sugárzás. A kozmikus sugárzás összetétele meglehetősen komplex, a kozmikus sugárzás talajszinten domináns másodlagos kozmikus

² Az ICRU gömbfantom egy 30 cm átmérőjű, az emberi lágy testszövetvel ekvivalens anyagú gömb, amelynek sűrűsége 1 g/cm^3 , tömegszázalékban kifejezett összetétele: 76,2% oxigén, 11,1% szén, 10,1% hidrogén és 2,6% nitrogén [1].

sugárzási komponense müon-, elektron-, pozitron-, neutron- és fonsugárzásból áll.³ A kozmikus sugárzási komponens elsősorban a földrajzi szélességtől és a tengerszint feletti magasságtól függ, míg a teresztriális sugárzás forrásonkénti összetevőit (⁴⁰K, ²³⁸U, ²³²Th és bomlástermékeik) a földtani környezet, a talaj összetétele határozza meg. A talajból exhaláló ²²²Rn (forrása a kőzetekben és a rajtuk kialakult talajokban lévő ²²⁶Ra anyaelem) légköri koncentrációjának átlagértéke a talaj közelében 10 Bq/m³, amely ~0,003 µSv/h-ás járulékot⁴ ad a környezeti dózisegyenérték-teljesítményhez. A radon rövid felezési idejű gamma-sugárzó bomlástermékeinek talajnedvesség- és hőmérséklet-változás hatására bekövetkező légköri koncentrációváltozása a környezeti dózisteljesítmény értékében azonban napszakos és szezonális ingadozást is eredményez. A radon bomlástermékek csapadék általi kimosódása a légkörből ugyanakkor a talajszinten jelentős, akár két-háromszoros szintemelkedést is okozhat [7]. A KFKI Telephelyen például 2020-ban 2,3-szeres volt a csapadék okozta maximális szintemelkedés a csapadékmentes időszakok évi átlagos környezeti dózisteljesítményéhez viszonyítva. Az 1. ábrán néhány telephelyi GM-szonda mérési adatainak példáján keresztül mutatjuk be a csapadék dóziszinteket befolyásoló hatását.



1. ábra: A környezeti dózisegyenérték-teljesítmény csapadék hatására történő megváltozásának illusztrálása KFKI telephelyi mérési adatokon keresztül

³ Megjegyezzük, hogy a másodlagos kozmikus sugárzás komponenseinek megoszlására a szakirodalom ([2][3][4][5]) különböző adatokat ad meg, rendszerint attól függően, hogy milyen tengerszintfeletti magasságra vonatkozóan közli azokat. A komponensek relatív hozzájárulása ugyanis a magassággal változik: a talajszinten domináns müonok relatív hozzájárulása a magasság emelkedésével csökken, míg az elektronoké, pozitronoké, neutronoké és fotonoké nő. Például [2] szerint a másodlagos kozmikus sugárzási komponens ~50%-ban müon-, ~25%-ban elektron- és pozitron-, ~20%-ban neutron- és ~5%-ban fonsugárzásból áll, míg [3] a müonok járulékat tengerszinti magasságban 67%-ra teszi.

⁴ [6] alapján, a ²²²Rn egyensúlyi egyenérték koncentrációjára vonatkozó 0,05 (nSv/h)/(Bq/m³) konverziós tényezővel és 0,5-ös egyensúlyi tényezővel számolva.

A természetes eredetű légköri gamma-sugárzás további forrásainak (kozmozgén radionuklidok, mint a ^7Be és ^{22}Na) környezeti gamma-dózisteljesítmény járuléka elhanyagolhatóan kicsi (környezeti dózisegyenérték-teljesítménye lényegesen kisebb $0,001 \mu\text{Sv/h}$ -nál [6]). Az 1945–1980 között végzett légköri atomfegyver-kísérleteket követő globális fallout (kihullás) mesterséges eredetű radioaktív izotópok megjelenését eredményezte a talajszenen. Az ilyen eredetű külső dózisterhelés meghatározó forrása a ^{137}Cs volt, ennek járuléka a Csernobili Atomerőmű 1986-ban bekövetkezett balesetét követő kibocsátás során a környezetbe került radioaktív szennyeződéshez hasonlóan csak kivételesen nagy érzékenyséű mérések útján kimutatható.

A környezeti sugárzási tér áthatoló sugárzásokból származó összetevőinek KFKI Telephelyen várható környezeti dózisegyenérték-teljesítményét a fenti tényezők és jellemzők figyelembevételével határoztuk meg. A másodlagos kozmikus sugárzás töltéssel rendelkező komponenseinek (müon-, elektron- és pozitron-sugárzás) várható környezeti dózisegyenérték-teljesítmény értékét a KFKI Telephely 400–420 m-es tengerszint feletti magasságában [8] alapján $0,034 \mu\text{Sv/h}$ -ának határoztuk meg. A másodlagos kozmikus sugárzás neutronsugárzási komponense a telephely 47° északi szélességénél $\sim 0,008 \mu\text{Sv/h}$, fotonsugárzási komponense $0,002 \mu\text{Sv/h}$ -nál kisebb értékre tehető.

A telephely alapköze mészke, ezt a közettípust az átlagosnál kisebb radioaktivitás jellemzi. A földfelszíni külső dózist azonban elsősorban a felszín közeli talajok radioaktivitása határozza meg, a 30 cm-nél mélyebben fekvő kőzetek kevésbé járulnak hozzá. A telephely talajösszetétele lokálisan különböző, pl. agyagos és homokos talajtípusok is előfordulnak, eltérő ^{40}K , ^{238}U és ^{232}Th tartalommal, amely – mivel a természetes radioaktív izotópok keltette külső környezeti dózisteljesítmény a szabadban arányos a talaj radionuklid koncentrációjával [1] – különböző gamma-sugárzási expozíciót hoz létre. A telephelyen végzett korábbi talajmérések alapján azt találtuk, hogy a telephelyi talajok aktivitáskoncentrációi a hazai talajok ^{40}K ($79 - 570 \text{ Bq/kg}$), ^{238}U ($12 - 66 \text{ Bq/kg}$) és ^{232}Th ($12 - 45 \text{ Bq/kg}$) [9] tartalmának jellemző tartományába esnek. A magyarországi talajok átlagos radionuklid koncentrációja: ^{40}K : 370 Bq/kg , ^{238}U : 29 Bq/kg , ^{232}Th : 28 Bq/kg [9]. A teresztrialis gamma-sugárzási komponensre nézve az aktivitáskoncentráció-tartományok szélsőértékeiből $0,020 - 0,100 \mu\text{Sv/h}$, míg az átlagos radionuklid koncentrációkból $0,056 \mu\text{Sv/h}$ környezeti dózisegyenérték-teljesítmény származtatható⁵.

A sugárvédelmi környezetellenőrző mérésekre használt dózisteljesítmény-mérőket olyan módon tervezik és kalibrálják, hogy a mért értékeik jó közelítéssel megegyezzenek a valós dózisteljesítménnyel a (telephelyi vagy azon kívüli) nukleáris balesetek során kibocsátott radionuklidok gamma-energiáira, amelyek jellemzően $100 - 1000 \text{ keV}$ tartományba esnek [6]. Ennek megfelelően a mérőeszközök kalibrációjához referencia fotonsugárzásként ^{137}Cs radionuklidot alkalmaznak. Amennyiben az indikálandó telephelyi kibocsátások energiaeloszlása ettől jelentősen eltér, más energiájú kalibráló forrás alkalmazása lehet szükséges. A mesterséges eredetű gamma-sugárzás környezeti dózisegyenértékének meghatározásához a mérőeszközök jelzéséből le kell vonni az azzal egy időben mért természetes eredetű gamma-sugárzás járulékát. A sugárvédelmi dózisteljesítmény- és dózismérő-eszközök a fotonsugárzás mellett azonban a közvetlenül ionizáló sugárzásokat, mint az elektron-, pozitron- és müon-sugárzást egyaránt detektálják, így nem képesek a gamma-sugárzási és másodlagos kozmikus sugárzási komponensek hozzájárulásának elkülönítésére. A környezeti sugárzási tér összetevőinek elválasztásához fotondetektorok és a gamma-sugárzásra érzéketlen részecske-detektorok egyidejű használata lenne szükséges. A természetes eredetű környezeti háttér spektrális eloszlása továbbá meglehetősen komplex: a

⁵ [6]-ban is hivatkozott, ^{40}K -re, ^{238}U bomlási sorra és ^{232}Th bomlási sorra vonatkozó $0,0512$, $0,564$ és $0,749 \text{ (nSv/h)/(Bq/kg)}$ konverziós tényezők alapján számítva.

terresztriális eredetű gamma-sugárzás energiatartománya néhány keV-os értéktől 2,6 MeV-ig terjed (amely maximum a ^{208}Tl gamma-energiája), a másodlagos kozmikus sugárzás töltéssel rendelkező részecskéinek energiatartománya azonban több nagyságrendet ölel fel, néhány keV-tól a néhány száz GeV-os tartományig terjedhet. A szabványos, referencia foton-sugárzási térben kalibrált dózisteljesítmény-mérő rendszerek megbízhatóan alkalmazhatók a környezeti gamma-sugárzás mérésére, mivel annak a mérés tekintetében számottevő energiatartományában a mérőrendszerek energiaválasza jó közelítéssel konstans. A gamma-sugárzásra vonatkozóan kalibrált mérőeszközök teljes mért értéke azonban rendszerint felülbecsült lesz a másodlagos kozmikus sugárzás töltéssel rendelkező komponenseire mutatott érzékenységük és egységnyinél nagyobb válaszuk révén. Ebből következik, hogy a mérőrendszerek másodlagos kozmikus sugárzásra adott válaszát meg kell határozni annak érdekében, hogy a másodlagos kozmikus sugárzás töltéssel rendelkező összetevőjének teljes mért értékből való levonásával megadható legyen a környezeti gamma-sugárzási komponens, majd annak figyelembevételével becsülhető legyen a mesterséges eredetű gamma-sugárzás környezeti dóziségyenértéke.

Külön tényezőként szerepel a detektoroknak a detektor anyagának radioaktivitásából eredő, ún. inherens háttéré. Ennek közvetlen meghatározása csak különlegesen alacsony háttérű, például földalatti laboratóriumban lehetséges, amelyben megfelelő ([7] szerint 200 m vízekvivalens) mélységnél a kozmikus sugárzási komponensek elhanyagolhatóan kis szintre csökkenthetők, továbbá ideális földtani környezetben és árnyékolással a terresztriális sugárzás is hatásosan redukálható [7]. Becslésére azonban mód van, ha egy alacsony sugárzási háttérű laboratóriumban ismerjük a sugárzási tér dózisteljesítményét és meghatározzuk mérőeszközünk jelzését, amelyben az inherens komponens többletként jelentkezik. Ez a módszer csak az elnyelt dózist mérő eszközöknél, így a gamma-sugárzással kalibrált ionizációs kamrás mérőeszközöknél használható. Vizsgálatainkban a GM-csőes mérőeszközöknél az inherenshátter-komponenst együtt kezeltük a másodlagos kozmikus sugárzás okozta jelzéssel.

A kutatás célkitűzése

A KFKI Telephelyen rutinszerűen üzemeltetett környezetisugárzás-monitorozó hálózat az azonos mérési pontokra kihelyezett aktív és passzív dozimetriai mérőrendszerek révén párhuzamos mérési adatokat szolgáltat, ami – az adatok megfelelő konverzióját követően – direkt összehasonlítást tesz lehetővé. A Telephely aktív és passzív környezetisugárzás-mérő rendszereinek összehasonlító vizsgálatát az adatok megbízhatóságának ellenőrzése céljából egy független mérőeszközzel végzett méréssorozattal is kiegészítettük. A méréssorozat és jelen tanulmányban összefoglalt eredményei a környezetben kialakult sugárzási viszonyok megbízható monitorozását segíti elő.

Ki kell emelni, hogy a mérőrendszerek a környezeti sugárzási tér gamma-sugárzási komponensét és a másodlagos kozmikus sugárzás töltéssel rendelkező összetevőjét (műon-, elektron- és pozitron-sugárzás) detektálják, tehát az összehasonlítás ezekre az összetevőkre terjedt ki. A detektorok jelzéséhez hozzájárul továbbá a detektorok saját, inherens háttéré is. Célunk volt, hogy a rutin környezetellenőrzésben használt folyamatos üzemű rendszer mért adatának komponensei közelítőleg számszerűsíthetők, ezáltal pedig egymástól elválaszthatók legyenek. A munka során meg kívántuk határozni a GM-csőes rendszer kalibrációs állandóját környezeti dóziségyenértékben a környezeti gamma-sugárzásra vonatkozóan, ehhez szükség volt a GM-csőes szondák (a továbbiakban GM-szondák) másodlagos kozmikus sugárzásra mutatott érzékenységének megállapítására. Ki kell hangsúlyozni, hogy a GM-szondákra vonatkozóan pontszerű sugárforrással, például ^{137}Cs -tel, referencia irányból történő besugárzással meghatározott kalibrálási érték nem alkalmazható a környezeti sugárzási térre

annak összetett energia- és szögeloszlása miatt. Emiatt végeztük el a GM-szondák jelzésének in-situ meghatározását referencia mérőeszközzel való összehasonlítás révén.

A KFKI TELEPHELY KÖRNYEZETISUGÁRZÁS-MÉRŐ RENDSZEREI

Folyamatos üzemű dózisteljesítmény-táv mérő rendszer

A KFKI Telephelyen a környezeti sugárzás valósidejű monitorozására online kapcsolható rendszer van kiépítve. A hálózat 16 távmérő szondából épül fel, amelyek telephelyi elhelyezkedését az 2. ábra mutatja be. A függőleges kialakítású, henger alakú szondához két függőleges tengelyű, egymástól eltérő érzékenyséű GM-csövet tartalmaz. Mindkét GM-cső Centronic gyártmányú, a szonda nagyérzékenyséű GM-csőve ZP1220 típusú, a kisérzékenyséű GM-cső ZP1301 típusú. A nagyérzékenyséű GM-cső érzékenysége a gyári adatok alapján 7×10^{10} imp/Gy, a kisérzékenyséű GM-cső érzékenysége mintegy 500-szor kisebb [10]. A gyártó által közölt műszaki adatok alapján a nagyérzékenyséű cső 3 mGy/h alatti méréstartományban, a kisérzékenyséű 0,10 mGy/h–10 Gy/h méréstartományban (levegőben közölt dózisteljesítmény mennyiségben értve) üzemeltethető. A következőkben megadott mérési adatok csak a nagyérzékenyséű GM-csőre vonatkoznak.

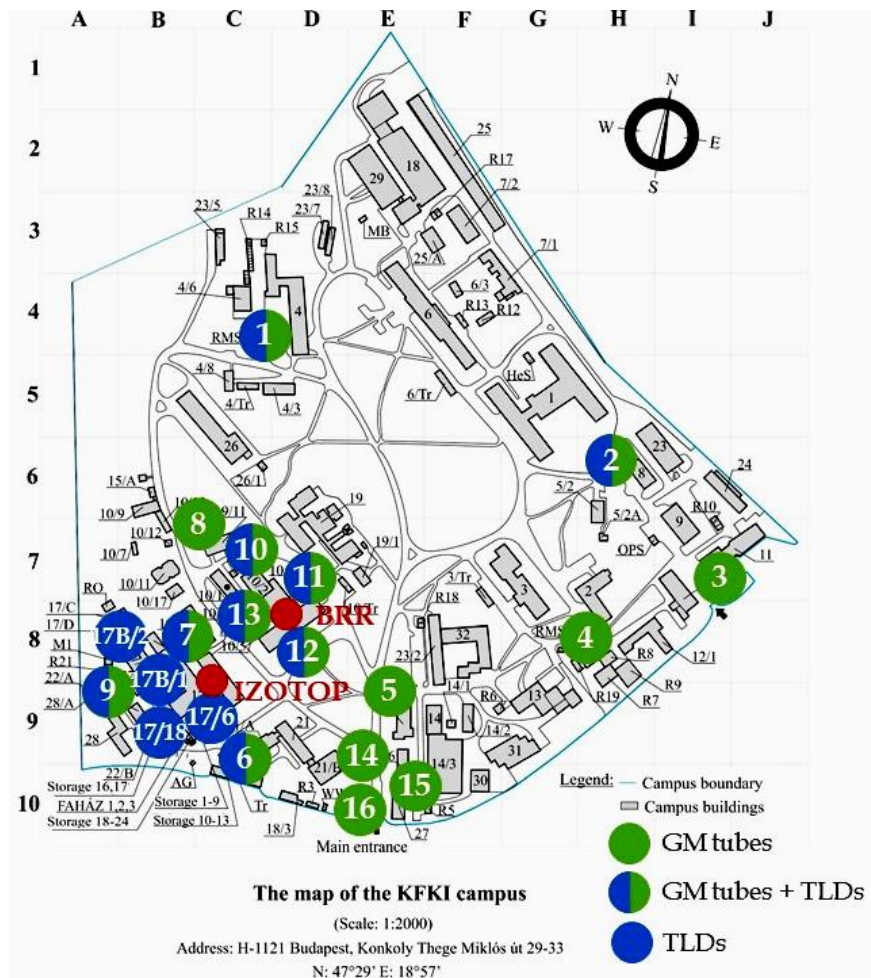
Passzív dozimetriai mérőrendszer

A telephelyi környezetellenőrzés részeként passzív dózismérés a Telephely 13 pontján történik (2. ábra):

- 9 mérőponton a passzív doziméterek az aktív környezetisugárzás-monitorozó detektorok (GM-szondák) közelében helyezkednek el, lehetőséget biztosítva párhuzamos aktív gamma-dózisteljesítmény mérések és passzív dózismérések végrehajtására,
- 4 mérőponton csak passzív dozimetriai méréseket végzünk a gamma-sugárzás dózisének monitorozására azokon a sugárvédelmi tekintetben kritikus pontokon, ahol az aktív mérőhálózatnak nincs telepített GM-szondája.

A mérőpontokra kihelyezett passzív dózismérők rutinszerű begyűjtése és utólagos, laboratóriumi kiolvasása havi–kéthavi gyakorisággal történik.

Passzív dozimetriai célokra termolumineszcens (TL) elven működő szilárdtest dozimétereket, a Pille és a PorTL dozimetriai rendszerekben használt dózismérőket alkalmazunk. A Pille doziméter búra kialakítású, TL anyaga $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$, mérési tartománya 3 μGy –10 mGy (levegőben közölt dózis mennyiségben). A PorTL doziméter TL anyaga $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$, amely tablettá formájában van elhelyezve egy fényzáró tokban. Ennek mérési tartománya 10 μSv –100 mSv (környezeti dózisegyenértékben).



2. ábra: A környezetisugárzás-mérő rendszerek mérőpontjainak KFKI Telephelyen való elhelyezkedése [11]

Referencia mérőeszköz

Az aktív és passzív dozimetriai mérőrendszerek összehasonlító vizsgálatát egy független, kalibrált referencia mérőeszközzel végzett mérősorozattal is kiegészítettük. A mérőeszköz egy Reuter-Stokes gyártmányú, RSS-112 típusú nagynyomású ionizációs kamra volt, amely 1 mSv/h környezeti dózisegyenérték-teljesítmény méréshatárig üzemeltethető. Az NNK Sugárbiológiai és Sugáregészségügyi Főosztályának (korábbi OSSKI) tulajdonát képező mérőrendszer (az RSS-112 típusú ionizációs kamra és a kiolvasó egység) 2020. februári kalibrálási bizonyítvánnyal [12] rendelkezik, így jó alapot képez az egyes mérőrendszerekkel mért adatok megbízhatóságának ellenőrzéséhez.

AZ ÖSSZEHASONLÍTÓ MÉRÉSEK VÉGREHAJTÁSA

Mérési körülmények

A mérőrendszerek összehasonlító vizsgálatának alapját az azonos mérési pontokon végzett párhuzamos mérések adták. Az aktív gamma-dózisteljesítmény mérések és a passzív dózismérések összevetésekor, ennek megfelelően, azon 9 mérőállomás (1–2., 6–7., 9–13. számú GM-szondák helyén) adatait vettük figyelembe, ahol a rutin monitorozás során – az azonos helyre kihelyezett mérőeszközök révén – párhuzamos mérések zajlanak. Az RSS-112 típusú ionizációs kamrával – hordozható eszköz lévén – a GM-szondák közvetlen környezetében tudtunk párhuzamos méréseket végrehajtani (lásd 3. ábra). Ezeket a kiegészítő méréseket az 1–13. számú GM-szondák mellett végeztük el, vagyis azokon a mérőállomásokon, amelyeken a folyamatos üzemű dózisteljesítmény-táv mérő rendszer szondái a környezeti sugárzási szintekben bekövetkező változások nyomon követését szolgálják. A gépjármű- és személyforgalom ellenőrzésére szolgáló, gyorsreagálású (14–16. számú) GM-szondáknál az ionizációs kamrával tehát nem végeztünk méréseket. Az RSS-112 típusú ionizációs kamrával mérési pontonként jellemzően 3–4 egymást követő, 10 perces mérést hajtottunk végre. A méréseket száraz időjárásban hajtottuk végre, ezzel kizárva a csapadék dózisszinteket befolyásoló hatását.



3. ábra: Az RSS-112 típusú ionizációs kamrával (balra) és a GM-szondával (jobbra) végzett párhuzamos méréseknél alkalmazott mérési elrendezés

A mérőrendszerek eltérő talaj feletti magasságban való elhelyezkedése mindössze néhány százalékos különbséget eredményez, így annak hatását elhanyagolhatónak vettük.

A mérési eredmények kiértékelése

Annak érdekében, hogy az aktív, GM-csöves sugárzásmérő is $dH^*(10)/dt$ környezeti dóziségyenérték-teljesítmény mennyiségben, $\mu\text{Sv/h}$ egységben szolgáltatson adatot, a mérőrendszer üzembe helyezés előtt szoftveresen lett beállítva úgy, hogy az időegységenkénti impulzusszám feldolgozása során ezen mennyiséget számítsa ki és jelenítse meg. A

GM-szondák jelei digitális, földkábeles átvitelrel jutnak a központi adatgyűjtőbe, amelyről az adatgyűjtés percenkénti lekérdezéssel történik. A program a percenkénti gyakorisággal lekérdezett adatokat, valamint az ezekből 10 perces időtartamra képzett átlagértékeket is eltárolja. Az eredmények összehasonlításakor a folyamatos üzemben működő GM-szondáknak az RSS-112 típusú ionizációs kamrával végzett párhuzamos mérések időtartamába eső, 10 perces átlagos környezeti dózisegyenérték-teljesítmény értékeit használtuk fel.

Az RSS-112 típusú ionizációs kamra az adott időtartam alatti dózist méri, majd osztja el a mérési időtartammal (10 perc), így képezve átlagos dózisteljesítmény értéket, amelyet környezeti dózisegyenérték-teljesítmény mennyiségben, $\mu\text{Sv/h}$ egységben szolgáltat. Mértékadó mérésenként a mérőeszköz bekapcsolását követő első 10 perces intervallum lejártát követően mért adatokat vettük figyelembe. Az összefüggő mérési ciklusok adataiból így GM-szondáknak 2–3, egymást követő 10 perces intervallum mért értékei álltak rendelkezésre. Az RSS-112 típusú ionizációs kamra válasza a kalibrálási bizonyítvány értelmében a kalibrációhoz használt ^{137}Cs sugárzási térben egységnyi ($1,00 \pm 0,05$), azonban a környezeti háttérsugárzásra 8%-os felülmérést mutat ($0,075 \mu\text{Sv/h}$ referencia dózisegyenérték-teljesítményénél relatív válasza $1,08 \pm 0,13$) [12]. Mivel a detektor dózisválasza a teljes méréstartományban lineáris [13], a környezeti háttér sugárminőségen meghatározott felülmérést a természetes háttérsugárzás dózisteljesítményének nagyságrendjében konstansnak vettük. A felülmérés kompenzációját az utólagos méréskiértékelés során hajtottuk végre. Az ionizációs kamra ~5 literes gömbtérfogatóban 20 bar nyomású ultratiszta argon gáztöltés van, amely állandó gáztömeget teremt. A mérőtérfogatóban lévő gáz mennyiségét nem befolyásolja a hőmérséklet, a légnyomás vagy a páratartalom, ennél fogva – szemben a szabadlevegős (más néven nyitott) ionkamrákkal – nem szükséges a környezeti levegő sűrűségére vonatkozó hőmérséklet- és légnyomás-korrektúra alkalmazása. Az ionizációs kamra szögfüggése – gömbszimmetrikus kialakításának köszönhetően – elhanyagolható, energiaválasza széles tartományban ($0,07\text{–}10 \text{ MeV}$) egységnyi [13].

A TL dozimétereket (TLD) a mérések végrehajtása előtt ^{137}Cs sugárzási térben kalibráltuk úgy, hogy mindkét passzív mérőeszköz környezeti dózisegyenértékben szolgáltatson adatot. A levegőben közölt dózisból egy energiafüggő konverziós faktor segítségével származtatható a környezeti dózisegyenérték mennyiség, a monoenergiás foton-sugárzás ~660 keV-os energiaszintjére jellemző konverziós faktor értéke $1,2 \text{ Sv/Gy}$ [5]. Mivel a passzív doziméterek érzékenysége a referencia sugárminőségen (^{137}Cs radionuklid sugárzási tere), referencia besugárzási irányra vonatkozóan került meghatározásra, szükséges volt az üzemeltetési körülményekre, tehát a valós környezeti feltételekre vonatkozó érzékenység vizsgálata is. A TL anyag karakterisztikáit (dózisválasz, linearitás, energiafüggés és energiaválasz viszonyulása a környezeti spektrális háttéreloszláshoz, irányfüggés, fading hatás) méréssorozat keretében számszerűsítettük [11]. A kiolvasott értéket (már környezeti dózisegyenérték mennyiségben) az így meghatározott korrekciós faktorokkal korrigáltuk a valós környezeti körülmények minél pontosabb figyelembevételére érdekében. Az ilyen módon korrigált környezeti dózisegyenértékből származtattuk az expozíciós időre vonatkoztatott átlagos környezeti dózisegyenérték-teljesítményt. Az összehasonlító vizsgálathoz a passzív dózismérések azon besugárzási időtartamait vettük alapul, amelyekbe a GM-szondákkal és RSS-112 típusú ionizációs kamrával végzett párhuzamos mérések estek. A vizsgálat során e szerint figyelembe vett terepi mérési ciklusok átlagos expozíciós ideje 1176 óra volt. A passzív mérőeszközökkel végzett mérések esetében a GM-szondák jelzésének integrálási periódusa megegyezett a passzív detektorok kihelyezési idejével. A kiolvasó laboratórium közelsége miatt a transzport időtartama és dózisa elhanyagolható volt.

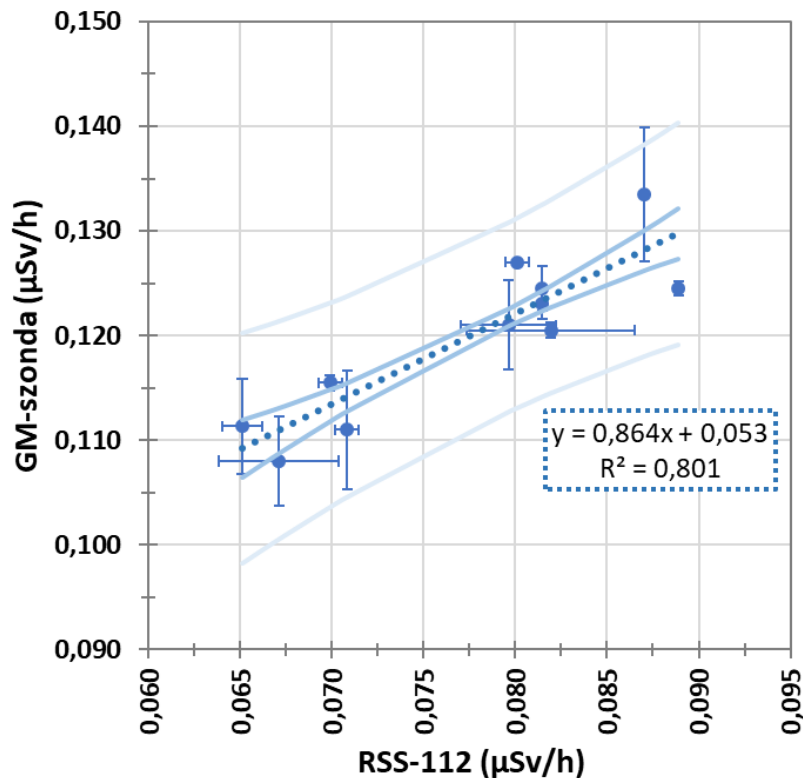
EREDMÉNYEK ÉS KÖVETKEZTETÉSEK

A környezetisugárzás-monitorozó rendszerek összehasonlító vizsgálata

A GM-szondák és az RSS-112 típusú ionizációs kamra esetében az egymást követően mért környezeti dózisegyenérték-teljesítmény értékeiből átlagot (számtani közép) képeztünk, az összehasonlításkor ezeket vettük alapul. Mind a GM-szondák, mind az ionizációs kamra esetében a figyelembe vett mérési ciklusok egymást követő 10 perces mérési adatai jó egyezést mutattak, 2,1% és 4,1% átlagos relatív szórással. Egyedül a 3. és 5. számú GM-szondák mérőhelyén, ionizációs kamrával mért adatok szórása haladta meg a 10%-ot. Ezen adatsorokból a kiszórónak ítélt 1-1 mérési adatot elhagytuk, az RSS-112 típusú ionizációs kamra egymást követő mérési adatainak átlagos relatív szórása ezáltal 2,0% alá csökkent.

A GM-szondák és az RSS-112 típusú ionizációs kamra összevetésébe azokat a mérőhelyeket vontuk be, amelyek közelében nincs telephelyi mesterséges sugárforrás, így ott természetes eredetű sugárzás monitorozása zajlik (1–6., 8., 10–13. számú GM-szondák). A 7. és 9. számú GM-szondák olyan helyiségek közelében találhatóak, amelyekben sugárforrásokat tárolnak, így ezeken a mérőpontokon rendszerint a háttérsugárzás szintjét szignifikánsan meghaladó dózisteljesítmények mérhetők. Ezen szondák esetében a természetes környezeti sugárzási tér – a tipikusan alulról érkező teresztriális és a felülről érkező kozmikus sugárzás – mellett a helyiségekből érkező mesterséges eredetű gamma-sugárzás oldalirányú beesése is várható. A GM-csővek relatív válasza – fizikai kialakításuk révén – függ a sugárzás irányítottságától, a hossz tengely mentén nagyobb aktív keresztmetszetük következtében az oldalirányból, a szonda effektív felületére merőlegesen beeső sugárzásra nagyobb értéket adnak.

A GM-szondák által mért és az RSS-112 típusú ionizációs kamra környezeti háttér sugárminőségen meghatározott felülmérésével korrigált, referencia értéknek tekintett adatok összehasonlítását mutatja be a 4. ábra. Az aktív mérőrendszerek eredményei alapján megállapítható, hogy **a természetes eredetű háttérsugárzás esetén a GM-szondák átlagos érzékenysége 15%-on belül megegyezik az ionizációs kamráéval, azonban szisztematikusan (átlagosan 0,042 $\mu\text{Sv/h}$ -val) felülmérnek az ionizációs kamrához képest**, amely többletértékhez a GM-szonda inherens háttere is járulékot ad. Fontos azonban kiemelni, hogy az ionizációs kamrák (és a TLD-k) a detektor érzékeny térfogatában elnyelt energiát, azaz a dózist mérik, míg a GM-csővek az ionizációs sugárzás és a detektor kölcsönhatásakor keletkező szekunder részecskék számát mérik, ami csak az adott sugárzásminőségre és energiára vonatkozóan lesz arányos a dózissal. Az aktív mérőrendszerek jelzései közti összefüggést jellemző lineáris regressziós modell alapján korrigálhatók a GM-szonda adatai, amellyel a megfigyelt értékek értelmezési tartományában jó közelítéssel (5%-on belüli pontossággal) megkaphatjuk a valós környezeti dózisegyenérték-teljesítmény mérhető környezeti sugárzási komponenseinek értékét.



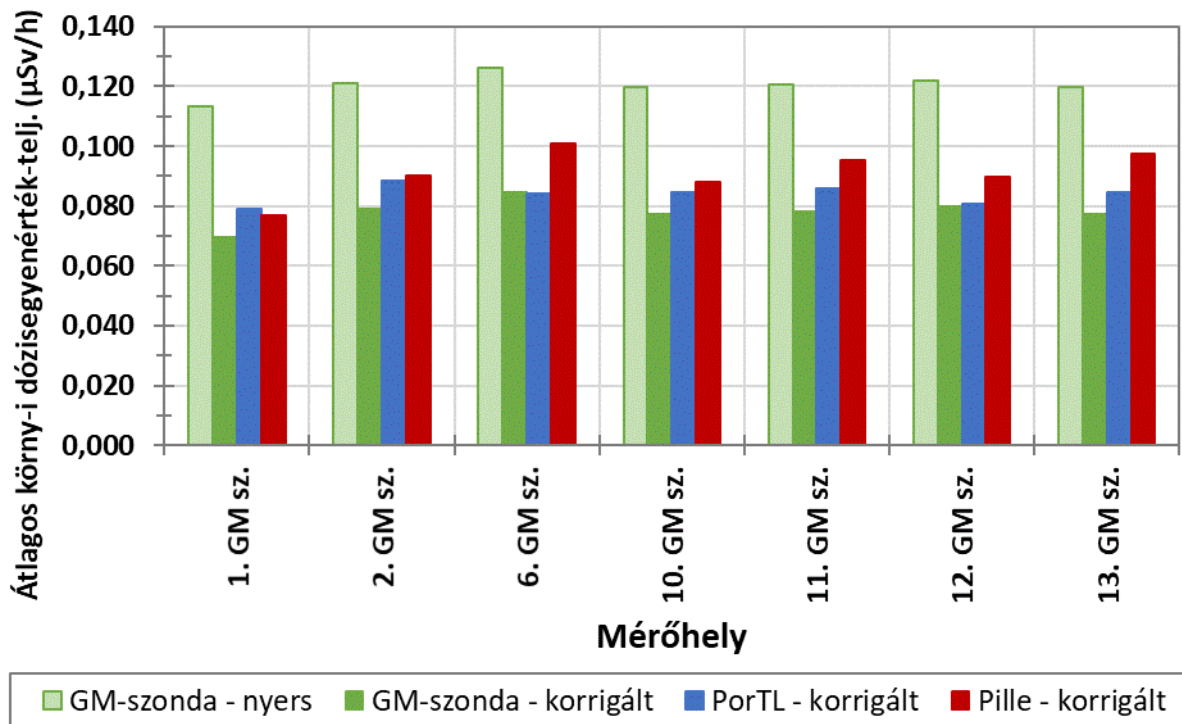
4. ábra: A GM-szondák jelzése az RSS-112 típusú ionizációs kamra (referencia mérőeszköz) jelzésének függvényében

Az ábrán az egybefüggő mérési ciklusok adatainak szórását is megjelenítettük, függőlegesen a GM-szondák méréseinek, vízszintes irányban az RSS-112 típusú ionizációs kamra méréseinek adott átlagértékéhez tartozó szórása látható. Mivel a szórás itt elsősorban az átlagolásba bevont mérések számától függ és nem a dózisegyenérték-teljesítmény függvényében változik, az ezekkel történő súlyozástól eltekintettünk, és a legkisebb négyzetek módszerén alapuló lineáris regressziós modellt alkalmaztunk. Pontozott vonallal a lineáris regressziós egyenes van megjelenítve (amelynek korrekcióhoz felhasznált egyenlete szerepel a diagramon), folytonos kék vonallal az átlag (várható érték) becslésére vonatkozó, míg folytonos világoskék vonallal a pontbecslésre vonatkozó megbízhatósági intervallumok láthatók, 95%-os megbízhatósági valószínűség mellett.

A GM-szondák értékeit a passzív dózismérések adataival is összevetettük, ehhez meghatároztuk a GM-szondáknak a passzív dózismérések több mint egy hónapos expozíciós időtartamára vonatkoztatott átlagos dózisegyenérték-teljesítményeit. Az 5. ábrán látható, hogy a GM-szondák nyers adatai alapján számított átlagos dózisegyenérték-teljesítmények szignifikánsan meghaladják a passzív mérőrendszerek adatait, a PorTL esetében -30%, a Pille esetében -24% átlagos relatív különbséget tapasztaltunk a GM-szondák adataira vonatkoztatva. A GM-szondák adatainak lineáris regressziós modell alapján végzett korrekciójával a különbség mértéke lecsökkent, a PorTL esetében 9,3%, a Pille esetében 18% átlagos relatív különbségeket⁶ kaptunk. Az összehasonlításnál a TLD rendszerek korigált értékeit jelenítettük meg és vettük figyelembe, mivel a TL anyag karakterisztikák hatásának és az ezekből fakadó szisztematikus hibák kiküszöbölésére végzett korrekcióval a passzív dozimetriai mérések pontosságának növelése érhető el. A Pille mérések nyers és korigált adatai között jelentősebb eltérést figyeltünk meg, mint a PorTL-nél, amely a korrekcióban

⁶ Mivel a GM-szondák korigált adataihoz viszonyított eltérés pozitív és negatív előjelű is volt, a relatív különbségek négyzetes közepét határoztuk meg, mint átlagos relatív különbség, némileg felülbecsülve a relatív különbségek számtani középértékét vagy az abszolút értékben vett relatív különbségek átlagát.

figyelembe vett hatásokra (dózisválasz, energiafüggés, irányfüggés, fading) mutatott nagyobb érzékenységgel magyarázható.



5. ábra: A GM-szondák expozíciós időtartamra vonatkozó nyers és a lineáris regressziós modell alapján korrigált átlagos környezeti dózisegyenérték-teljesítményei, valamint a PorTL és Pille TLD rendszerek értékeinek (TL anyag karakterisztikák figyelembevételével korrigált adatok) összevetése az egyes mérőhelyeken

A passzív dózismérések figyelembe vett terepi expozíciós periódusaiban a GM-szondák 10 perces nyers adatainak átlagos relatív szórása 4,9% volt. A környezeti sugárzási szintekben bekövetkező változások monitorozására szolgáló mérőhelyeken a folyamatos üzemű GM-szondás mérőrendszer valós időben mért adatainak értékében tehát mindössze kismértékű időbeli változékonyság volt megfigyelhető. A GM-szondákkal az ionizációs kamrával végzett összemérés ~30 perces időtartamában mért értékek ugyanakkor 5,5%-on belül, átlagosan 2,9%-os relatív különbséggel⁷ megegyeztek az adott mérőhelyen az expozíciós intervallumokra meghatározott átlagértékekkel, **a rövididejű mérések tehát jó egyezést mutattak a hosszabb mérési periódusokra vonatkoztatott átlagos szintekkel.**

A GM-szondák jelzése kozmikus sugárzásra és az inherens háttérre

A mérőrendszerek a környezeti sugárzási tér gamma-sugárzási komponensét és a másodlagos kozmikus sugárzás töltéssel rendelkező összetevőjét egyidejűleg detektálják, amelyhez az inherens, sugárzási tértől független háttér is járulékot ad. A további számításoknál feltételeztük, hogy GM-szondák inherens háttére elhanyagolható, ezért az azzal együtt kezelt, kozmikus sugárzásra vonatkozó érzékenysége felülbecsült lehet. A legtöbb mérőrendszer ugyanakkor egységnyinél eleve nagyobb választ ad a kozmikus sugárzásra. Ha ez az

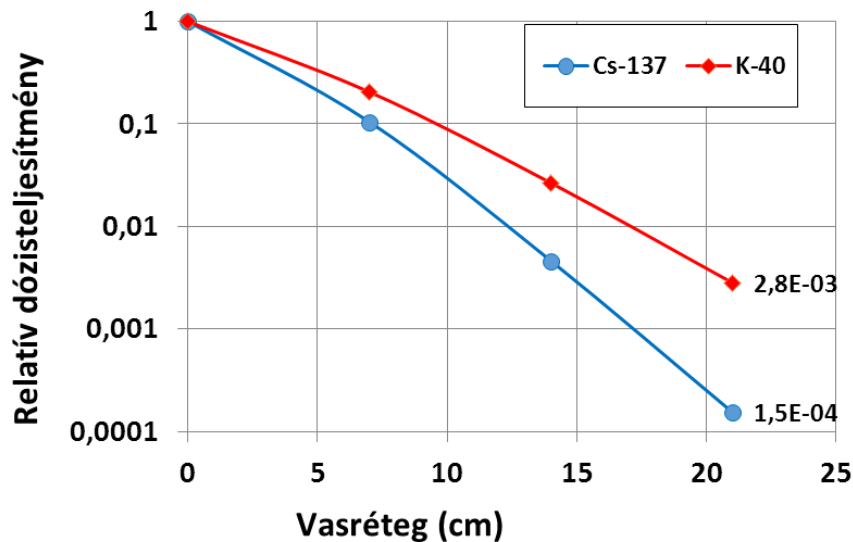
⁷ Mivel a GM-szondák rövididejű méréseinek hosszabb mérési periódusokra vonatkoztatott átlagos szintekhez viszonyított eltérése pozitív és negatív előjelű is volt, a relatív különbségek négyzetes közepét határoztuk meg, mint átlagos relatív különbség, némileg felülbecsülve a relatív különbségek számtani középértékét vagy az abszolút értékben vett relatív különbségek átlagát.

érzékenység szignifikáns, a mért értékek nem fogják tükrözni a környezeti sugárzás dózisegyenérték-teljesítmény értékét. A mérőrendszerek másodlagos kozmikus sugárzásra adott válaszána meghatározásához a teresztriális gamma-sugárzási komponens nagymértékű csökkentésére van szükség.

Tiszta kozmikus sugárzási tér jó közelítéssel realizálható édesvízű tavak vagy tengerek felszínén, megfelelő vízmélység és szárazföldtől vett távolság esetében. Az EURAMET Preparedness projektjének 2017/2018-es, passzív környezeti dózismérőkre irányuló összemérésén, a PTB tófelszíni referencia mérőállomásán – a kellően nagy vízmélységnek (2,5–3,5 m) és parttól vett távolságnak (~100 m) köszönhetően – közelítőleg tisztán másodlagos kozmikus sugárzási térben végzett besugárzás útján volt lehetőségünk a Pille mérőrendszer kozmikus sugárzásra adott, referencia értékre vonatkoztatott relatív válaszána meghatározására [14]. A 85 m-es tengerszint feletti magasságon fekvő referenciaállomáson végzett mérésorozat alapján a másodlagos kozmikus sugárzási komponensre adott válasz átlagértéke $1,08 \pm 0,07$ volt, szemben a természetes környezeti (kombinált teresztriális és kozmikus) sugárzási térben kapott $1,02 \pm 0,10$ értékű átlagos válasszal, amely a passzív dózismérések esetében kifejezetten jó egyezésnek minősül.

Az ionizációs kamrák és a GM-csövek szintén felülmérik a természetes környezeti sugárzás kozmikus összetevőjét. Az ionizációs kamrák másodlagos kozmikus sugárzásra adott felülbecslése jellemzően kisebb [5], az EURADOS egy nemzetközi összemérése [15] alkalmával az RSS-112 típusú ionizációs kamra jelzése tisztán kozmikus sugárzási térben (szintén a PTB tófelszíni referencia mérőállomásán mérve) 1,26-szorosa volt a referencia értéknek, míg a GM-csöves mérőeszközöknek a másodlagos kozmikus sugárzás töltéssel rendelkező komponensére adott, referenciaértékhez viszonyított válasza típustól függően 1,37–1,50 között változott. Az összemérésben vizsgált GM-csöves mérőrendszerek kozmikus térben mutatott felülmérése az RSS-112 típusú ionizációs kamrához viszonyítva így 1,09–1,21-szeresnek adódott. Mivel a mérőrendszerek kalibrációja foton referencia sugártérben történik, a müonok, valamint elektronok és pozitronok által dominált másodlagos kozmikus sugárzásra (vagyis a töltött részecskék kölcsönhatására) mutatott szignifikáns érzékenység a környezeti sugárzás dózisegyenérték-teljesítmény értékének jelentős felülmérését eredményezi.

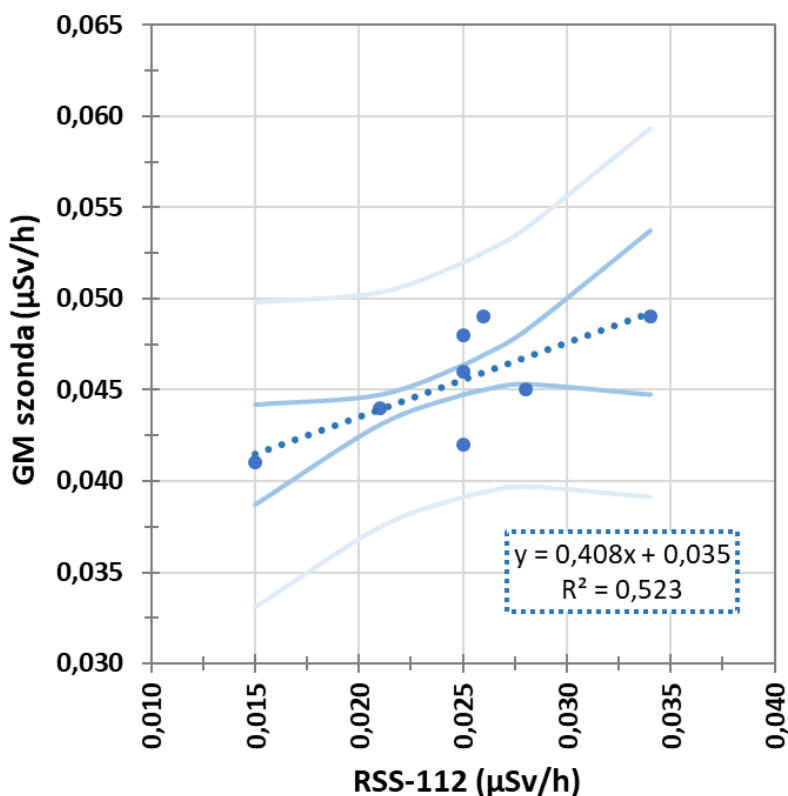
Annak érdekében, hogy közvetlenül is megvizsgáljuk a KFKI telephelyi környezetellenőrzésben használt GM-szonda kozmikus sugárzásra mutatott érzékenységét, egy vas burkolattal árnyékolt alacsony háttérű kamra (egésztetszámláló) belsejében is végeztünk kiegészítő méréseket, mind az RSS-112 típusú ionizációs kamrával, mind a GM-szondával. MicroShield programmal meghatároztuk a vas árnyékoló képességét a rétegvastagság függvényében, a ^{137}Cs és ^{40}K izotópokra vonatkozó számítás eredményét a 6. ábra mutatja be. Az egésztetszámláló árnyékolása körülbelül 21 cm-es vasrétegnek felel meg, amely árnyékolás hatására a ^{137}Cs és a ^{40}K sugárzásának gyengülése a kamra dózisteljesítményének több mint két nagyságrendi csökkenését eredményezi. Tekintettel arra, hogy az egésztetszámláló helyiségében a dózisegyenérték-teljesítmény $0,1 \mu\text{Sv/h}$ -nál kisebb, az árnyékolás hatására az egésztetszámlálóban a környezeti gamma-sugárzás dózisegyenérték-teljesítménye nem éri el a $0,001 \mu\text{Sv/h}$ -t. Az alacsony háttérű kamrában az árnyékolás segítségével tehát hatásosan kiküszöbölhető a környezeti gamma-sugárzás okozta háttér, a kozmikus összetevő járuléka azonban csak kismértékben csökken. Ilyen módon az egésztetszámlálóban végzett mérésekkel a mérőeszközök kozmikus eredetű komponensekre mutatott érzékenysége és azok egymáshoz való viszonyulása jó közelítéssel vizsgálható.



6. ábra: A ^{137}Cs és a ^{40}K sugárzásának gyengülése a vasárnyékolás vastagságának függvényében

Az egészsztesztzámlálóban a mértékadónak tekintett 8×10 perces, egybefüggő intervallum során mért átlagos dózisegyenérték-teljesítmény az RSS-112 típusú ionizációs kamrával $0,025 \mu\text{Sv/h}$, a függőleges irányítottágú GM-szondával pedig $0,046 \mu\text{Sv/h}$ volt, az adatok 22%-os és 6,7%-os relatív szórása mellett (lásd 7. ábra). **A GM-szonda közelítőleg kozmikus térben mutatott 1,9-szeres felülmérése az ionizációs kamrához viszonyítva meghaladja az irodalmi adatok alapján várt felülmérést.** Mivel az egészsztesztzámlálóban jellemző környezet a saját háttérre nincs hatással, a vártnál nagyobb felülmérés oka feltételezhetően a GM-szonda inherens háttérének járuléka. Ha elfogadjuk a mérőrendszerek kozmikus sugárzás töltéssel rendelkező komponensére adott válaszában szakirodalomban közölt értékét, az egészsztesztzámlálóban mérhető, közelítőleg kozmikus eredetű sugárzás dózisteljesítménye $0,020 \mu\text{Sv/h}$ az RSS-112 típusú ionizációs kamra mérése alapján, míg a GM-szondánál ez az érték $0,030\text{--}0,033 \mu\text{Sv/h}$ -ának adódik.

A GM-szonda jelzését a függőleges irányú elhelyezés mellett vízszintes orientációban is meghatároztuk. A fektetett pozícióban mért dózisegyenérték-teljesítmények átlagosan 16,5%-kal voltak nagyobbak az álló pozícióban mért értékeknél, amely összhangban van a kozmikus sugárzás függőleges irányítottága és a szonda fizikai kialakításából (hossztengely mentén nagyobb aktív keresztmetszet) fakadó anizotróp irányfüggése alapján várható eredményekkel.



7. ábra: Az egészsztestszámlálóban a GM-szondával (függőleges orientációban) és az RSS-112 típusú ionizációs kamrával mért adatok összevetése

Pontozott vonallal a lineáris regressziós egyenes van megjelenítve (amelynek egyenlete szerepel a diagramon), folytonos kék vonallal az átlag (várható érték) becslésére vonatkozó, míg folytonos világoskék vonallal a pontbecslésre vonatkozó megbízhatósági intervallumok láthatók, 95%-os megbízhatósági valószínűség mellett.

A GM-szonda adatainak lineáris regressziós modell alapján történő korrekciójával jó közelítéssel megkaphatjuk a valós környezeti dózisegyenérték-teljesítmény mérhető környezeti sugárzási komponenseinek értékét. A gamma-sugárzás környezeti dózisegyenérték-teljesítményének meghatározásához ebből az értékből le kell vonni a kozmikus sugárzás töltéssel rendelkező komponensét is, amelynek jellemző dózisegyenérték-teljesítménye a KFKI Telephelyen 0,034 μSv/h. (Azzal a kiegészítéssel, hogy a kozmikus sugárzás pillanatnyi értékét a naptevékenységek és a légnyomás is befolyásolja. [2]) Ha a referencia fotonugárzási térben végzett kalibrációnak köszönhetően a mérőrendszernek a környezeti (az antropogén eredetű mellett a természetes) gamma-sugárzásra adott relatív válasza egységnyinek tekinthető⁸, a gamma-sugárzás környezeti dózisegyenérték-teljesítményének meghatározásának ekvivalens módja, ha a mérőeszköz jelzéséből levonjuk a másodlagos kozmikus sugárzás töltéssel rendelkező komponensének a mérőrendszer arra adott válaszával súlyozott környezeti dózisegyenérték-teljesítményét.

⁸ A mérőeszköz ¹³⁷Cs sugárzási térben végzett kalibrációjánál a gamma-sugárzás mért környezeti dózisegyenérték-teljesítménye jó közelítéssel meg fog egyezni a valós értékkel, amennyiben a mérés tekintetében számottevő energiatartományban a mérőeszköz energiaválasza konstans. Jelentősebb energiafüggésnél azonban a terasztriális sugárzás nagyenergiás gamma-vonalai (a ⁴⁰K 1461 keV-os, a ²¹⁴Bi 1765 keV-os és a ²⁰⁸Tl 2615 keV-os vonala) a környezeti gamma-sugárzás fölé-/alábecslését eredményezik. Ezt kiküszöbölendő a kalibrációhoz ²²⁶Ra forrás (a ²²²Rn-vel és bomlástermékeivel szekuláris egyensúlyban) is alkalmazható, amellyel 47–2448 keV-os energiatartományú foton spektrum biztosítható, 1130 keV-os átlagos energiával [15].

A vizsgálatoknál figyelembe vett GM-szondákra az 1. táblázat adja meg a mért és a fentiek szerint számított adatokat környezeti dózisegyenérték-teljesítmény értékben. Látható, hogy a gamma-sugárzási komponens értékei megfeleltethetők a környezetben lévő, természetes eredetű gamma-sugárzó radionuklidok aktivitáskoncentrációjából származtatott környezeti dózisegyenérték-teljesítményeknek (lásd A környezeti sugárzási tér jellemzői c. fejezetben).

1. táblázat. A környezeti dózisegyenérték-teljesítményben mért és számított eredmények a természetes sugárzás monitorozására szolgáló GM-szondák mérőhelyein

A GM-szonda sorszáma	Mért környezeti dózisegyenérték-teljesítmény* ($\mu\text{Sv/h}$)		GM-szondára számított környezeti dózisegyenérték-teljesítmény ($\mu\text{Sv/h}$)	
	RSS-112 ionizációs kamra**	GM-szonda	Környezeti sugárzás***	Gamma-sugárzás****
1	0,065	0,111	0,068	0,034
2	0,082	0,121	0,078	0,044
3	0,087	0,134	0,093	0,059
4	0,067	0,108	0,064	0,030
5	0,081	0,123	0,081	0,047
6	0,081	0,125	0,083	0,049
8	0,071	0,111	0,067	0,033
10	0,089	0,125	0,083	0,049
11	0,080	0,127	0,086	0,052
12	0,070	0,116	0,072	0,038
13	0,080	0,121	0,079	0,045
Átlag	0,078	0,120	0,078	0,044
Szórás	0,008	0,008	0,009	0,009

*Egymást követő 10 perces mérési intervallumok átlagos értékei

**Az RSS-112 típusú ionizációs kamra jelzése a környezeti háttérsugárzásra mutatott 1,08-as felülmérésének figyelembevételével korrigálva

***A GM-szonda jelzése a lineáris regressziós modell alapján korrigálva

****A GM-szonda korrigált jelzéséből (a valós környezeti dózisegyenérték-teljesítmény mérhető környezeti sugárzási komponenseinek közelítése) a kozmikus sugárzás töltéssel rendelkező komponensének környezeti dózisegyenérték-teljesítményét (0,034 $\mu\text{Sv/h}$) levonva

ÖSSZEFOGLALÁS

A cikkben ismertettük a KFKI Telephelyen üzemelő környezetsugárzás-monitorozó rendszerek összehasonlító vizsgálatának eredményeit. Bemutattuk, hogy megfelelő korrekciók elvégzését követően az aktív és passzív dozimetriai mérések pontosságának növelése érhető el. A sugárvédelmi környezetellenőrzési céllal használt dózisteljesítmény- és dózismérő-eszközök egyaránt mérik a környezeti sugárzási tér gamma-sugárzási komponensét és a másodlagos kozmikus sugárzás töltéssel rendelkező összetevőjét, amelyek hozzájárulásának elkülönítéséhez szükséges az egyes komponensek számszerűsítése. Erre vonatkozóan egy közelítő módszert mutattunk be. Ez kiváltképp akkor bír gyakorlati jelentőséggel, ha a mérés célja a mesterséges eredetű gamma-sugárzás effektív dózisének becslése, amelyhez a mért jelzésből a természetes eredetű komponensek járulékának levonására is szükség van, az inherens háttér figyelembevétele mellett.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Fehér I., Deme S. (szerk.), 2010. Sugárvédelem. ELTE Eötvös Kiadó, Budapest. ISBN 978-963-284-080-2
- [2] F. Wissmann, 2006. Variations Observed in Environmental Radiation at Ground Level. *Radiation Protection Dosimetry*, Vol. 118, No. 1, pp. 3–10. <https://doi.org/10.1093/rpd/nci317>
- [3] A. Bouville, W.M. Lowder, 1988. Human population exposure to cosmic radiation. *Radiation Protection Dosimetry*, Vol. 24 No. 1, pp. 293–299. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.rpd.a080290>
- [4] National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP), 1976. Environmental Radiation Measurements Report No. 50, NCRP, Washington. ISBN: 0-913392-32-4
- [5] Thompson, I.M.G. et al. (szerk.), 1999. Technical Recommendations on Measurements of External Environmental Gamma Radiation Doses. Radiation Protection series 106. European Commission, Luxembourg. ISBN 92-828-7811-2
- [6] P. Bossew, G. Cinelli, M. Hernández-Ceballos, N. Cernohlawek, V. Gruber, B. Dehandschutter, F. Menneson, M. Bleher, U. Stöhlker, I. Hellmann, F. Weiler, T. Tollefsen, P.V. Tognoli, M. de Cort, 2017. Estimating the terrestrial gamma dose rate by decomposition of the ambient dose equivalent rate. *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol. 166 (2), pp. 296-308, <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2016.02.013>
- [7] H. Dombrowski, M. Bleher, M. De Cort, R. Dabrowski, S. Neumaier, U. Stöhlker, 2017. Recommendations to harmonize European early warning dosimetry network systems. *Journal of Instrumentation*, Vol. 12, P12024. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/12/12/P12024>
- [8] F. Wissmann, A. Rupp, U. Stöhlker, 2007. Characterization of dose rate instruments for environmental radiation monitoring. *Kerntechnik*, Vol. 72, No. 4, pp. 193-198. <https://doi.org/10.3139/124.100341>
- [9] 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, United Nations, New York. ISBN 92-1-142238-8
- [10] Endródi Gáborné, 2019. EK Környezetvédelmi Szolgálat 2019. évi jelentése. KVSZ-2019-387-01-01-00
- [11] D. Jakab, I. Apáthy, A. Csőke, S. Deme, Gné. Endródi, L. Tósaki, T. Pázmándi, 2019. Comparative analysis of active and passive dosimetry systems used in environmental gamma radiation monitoring. ENVIRA 2019 Proceedings (ed. I. Světlík et al.), Prague, Czech Republic, 2019.09.08-09.13. Czech Technical University in Prague, Prague, pp. 42-45. <https://doi.org/10.14311/ENVIRA.2019>
- [12] Budapest Főváros Kormányhivatala, Metrológiai és Műszaki Felügyeleti Főosztály, 2020. Kalibrálási bizonyítvány, DOZ-0007/2020
- [13] Reuter-Stokes, 1995. RSS-112 Operating Manual
- [14] H. Dombrowski, 2019. Preparedness intercomparison of passive H*(10) area photon dosimeters in 2017/2018 (IC2017prep). *Journal of Instrumentation*, Vol. 14, P10008. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/14/10/P10008>
- [15] H. Dombrowski, S. Neumaier, I. M. G. Thompson, F. Wissmann, 2009. EURADOS intercomparison 2006 to harmonise European early warning dosimetry systems. *Radiation Protection Dosimetry*, Vol. 135 (1), pp. 1–20, <https://doi.org/10.1093/rpd/ncp090>