

**PRACTICE IN RADIATION PROTECTION  
WORKPLACES BY USING VIRTUAL  
RADIOACTIVE SOURCE AND  
CONTAMINATION**

**SUGÁRVÉDELMI MUNKAFOLYAMATOK  
GYAKORLÁSA VIRTUÁLIS SUGÁRFORRÁS  
ÉS SZENNYEZETTSÉG  
LÉTREHOZÁSÁVAL**

BODOR Károly<sup>1</sup> – CSALÓTZKY Zsolt<sup>2</sup> – VÖLGYESI Péter<sup>3</sup> – ZAGYVAI Péter<sup>4</sup>

**Abstract**

The article presents the possibilities of working in virtual high-dose rate fields developed in the Nuclear Security Department (HUN-REN EK SBL) of the HUN-REN Centre for Energy Research. In high dose rate fields, practicing the search for a lost, orphan radioactive source, as well as the measurement of surface contamination and risky searches for the source of radiation, are also not permitted according to the ALARA principle, and are therefore only possible in inactive conditions. The virtual source system developed by SBL makes it possible to imitate "measured" values very close to reality, but without radiation protection consequences.

**Keywords**

Virtual radioactive source, Training site, FOSTER, Radiation protection, MEST

**Absztrakt**

A cikk bemutatja a HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont Sugárbiztonsági Laboratóriumában (EK SBL) kifejlesztett virtuális nagy dózisteljesítményű terekben történő munkavégzés gyakorlásának a lehetőségeit. Nagy dózisteljesítményű terekben az elveszett radioaktív sugárforrás keresési gyakorlatozás, valamint a felületi szennyezettség mérése és annak gyakorlása korlátozott és kockázatos a sugárforrás keresési felderítések során, szintén nem engedélyezett az ALARA elv értelmében, ezért ez csak inaktív körülmények között lehetséges. Az SBL által kifejlesztett virtuális forrás rendszer lehetővé teszi, hogy a valósághoz nagyon közeli „mért” értékek imitálásával lehessen gyakorolni, de sugárvédelmi következmények nélkül.

**Kulcsszavak**

Virtuális sugárforrás, Tanpálya, FOSTER, Sugárvédelem, MEST

<sup>1</sup> bodor.karoly@ek.hun-ren.hu | ORCID: 0000-0002-1612-8207 | Radiation protection expert, HUN-REN Centre for Energy Research | Sugárvédelmi szakértő, HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont

<sup>2</sup> csalotzky.zsolt@ek.hun-ren.hu | ORCID: 0000-0002-4564-6759 | Computer scientist, HUN-REN Centre for Energy Research Informatikus, HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont

<sup>3</sup> volgyesi.peter@ek.hun-ren.hu | ORCID: 0000-0001-6607-7383 | Head of Nuclear Security Department, HUN-REN Centre for Energy Research | Sugárbiztonsági Laboratórium vezető, HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont

<sup>4</sup> zagyvai.peter@ek.hun-ren.hu | ORCID: 0000-0002-8121-8452 | Radiation protection advisor, HUN-REN Centre for Energy Research | Sugárvédelmi tanácsadó, HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont

## BEVEZETŐ

A nagy aktivitású, árnyékolatlan radioaktív sugárforrások, illetve nagy dózistér létrehozására alkalmas ionizáló sugárzást létrehozó berendezések közvetlen környezetében tilos a gyakorlatozás. Az ALARA-elv értelmében nagy aktivitású, árnyékolatlan sugárforrással és ezáltal nagy dózisteljesítményű terekben tilos a munkavégzés, illetve a gyakorlatozás közvetlen közelről, mivel így a tevékenységek indokolatlanul nagy dózisterheléssel járhatnak. Az ALARA-elv értelmében a sugárvédelmi tevékenység során a különösen veszélyes, nagy kockázattal járó feladatokat inaktív, de a lehető legreálisabb körülmények között kell begyakorolni. Így a tényleges munkavégzésnél előforduló hibázási lehetőség minimalizálható, ugyanez vonatkozik a radioaktív szennyezett felületek dekontaminálásának gyakorlására.

A HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont (HUN-REN EK) Sugárbiztonsági Laboratóriumához (SBL) tartozó tanpályákon csak kis aktivitású, a 190/2011-es fizikai védelmi rendelet szerinti maximum 4.-5. kategóriájú sugárforrások alkalmazhatóak [1]. Azaz jelenleg nincs lehetőség nagy dózisteljesítményű terekben történő sugárvédelmi munkavégzésre, elveszett radioaktív forrás felkutatásának begyakorlására. Az SBL a két véglet (inaktív körülmények – valódi nagy dózisteljesítményű tér) közötti rést kívánja áthidalni az ún. virtuális radioaktív sugárforrás használatával. A rendszer virtuálisan egy igazi radioaktív sugárforráshoz teljesen hasonlóan viselkedik (pl. a dózisteljesítmény fordítottan arányos a távolság négyzetével), azonban nem bocsát ki valós ionizáló sugárzást. Ugyanakkor a virtuális forráshoz kifejlesztett “dózisteljesítmény mérő” mutathat például egy nagy aktivitású, árnyékolatlan forrásokra jellemző dózis-dózisteljesítmény értékeket. Így a gyakorlatok abszolút valóságúnak tűnnek, és az elveszett sugárforrás felderítést gyakorlóknak a virtuálisan “mért” dózis-dózisteljesítmény értékek alapján szemléltetni lehet az egyes munkafolyamatok veszélyességeit.

Elveszett radioaktív sugárforrás keresésénél, illetve talált radioaktív sugárforrás esetén az adott sugárforrás már kikerült a hatósági felügyelet alól, illetve nem is volt hatósági felügyelet alatt. Ez alapján a forrás fizikai állapota (sérült tokozat, forrás stb.) ismeretlen (megsérült-e a forrás?), ezért a konzervatív szemléletet alkalmazva, olyan nyitott sugárforrásként kell kezelni, ami potenciálisan elszennyezheti, kontaminálhatja a környezetét. Egy sugárforrás keresési gyakorlatnál a virtuális sugárforrással való gyakorlás hasznos és egyben biztonságos eszköz. Ugyanakkor a környezeti szennyezés kizárása érdekében a forrás keresésénél, illetve annak megtalálását követően is szükséges felületi szennyezettség méréseket végezni. Szükséges azt is vizsgálni, hogy nem vált-e esetleg valóban nyílttá a radioaktív forrás pl. egy erős fizikai behatás végett. A virtuális felületi szennyezettséget imitáló eszköz az ún. virtuális radioaktív sugárforrás rendszer részét képezi. A rendszer segítségével radioaktív sugárforrás dózisteljesítmény méréseket lehet valóságúen imitálni. Ennek a rendszernek a képességeit terjesztettük ki és fejlesztettük tovább és így a rendszer képessé vált a virtuális felületi szennyezettséget imitálni. Emellett a virtuális mérőeszközön futó program képessé vált a felületi szennyezettség értékeket is megjeleníteni, [Bq/cm<sup>2</sup>] egységben. Így lehetővé válik a virtuális radioaktív sugárforrás rendszer segítségével egy elveszett radioaktív sugárforrás keresés során felmerülő mérési igények teljes körű biztonságos de valóságú szimulálása. A rendszer bárhol használható, vagyis nem kellene hozzá sugárvédelmi engedélyk, ami megkönnyíti a radioaktív sugárforrás felderítési bemutatók szervezését, illetve a széles körű felhasználást, gyakorlatozást.

Az alfa és béta sugárzás áthatolóképessége a gamma sugárzáshoz képest elenyésző (pár mm, illetve cm), emiatt az alfa és béta sugárzás csak közvetlen közelről detektálható (1. ábra).



1. ábra: Radioaktív sugárzások áthatoló képessége, [2]

Ezen tényezők miatt igen veszélyes nyílt alfa és béta sugárforrásokkal dolgozni. Amennyiben a radioaktív sugárforrás felderítési gyakorlat szervezői mégis ilyen műveletet hajtanak végre, akkor általában rövid felezési idejű radioaktív anyagot használnak, pl.  $^{131}\text{I}$ -et (2. ábra).



2. ábra:  $^{131}\text{I}$ -el elszennyezett helikopter felületi szennyezettség mérése hadgyakorlat során, [saját szerkesztés]

Az SBL-hez tartozó tanpályákon a kis aktivitású zárt és nyitott sugárforrásokkal való gyakorlatozás engedélyezett (ezek a 190/2011. rendelet szerinti 4.-5. kategóriájú sugárforrások), de elszennyezett felületek létrehozása tilos [1]. Azaz jelenleg nincs lehetőség radioaktív anyaggal elszennyezett tárgyakon való mérések gyakorlására. Ilyen célra tehát

csak zárt, felületi szennyezettség mérőhöz kialakított etalon kalibráló források használhatóak. Emiatt a gyakorlat során például egy dekontaminálási (radioaktív szennyezettség eltávolítása) eljárást nem lehet folyamatos visszamérésekkel nyomon követni, valamint dörzsmintavétel kiértékelésére sincs lehetőség, pl. zártságvizsgálat elvégzése esetén.

A virtuális felületi szennyezettséggel, illetve szennyezettség mérővel az elveszett radioaktív sugárforrás keresési gyakorlatozás során a fent említett scenáriók megvalósíthatóak.

## A VIRTUÁLIS RADIOAKTÍV SUGÁRFORRÁS

Ahogy az korábban említésre került a nagy aktivitású sugárforrással tilos a gyakorlatozás, ugyanakkor irányelv, hogy inaktív körülmények között szükséges az ehhez hasonló terekben való tapasztalat szerzés. A virtuális radioaktív sugárforrás ezen két végpont közötti részen helyezhető el, mivel képes imitálni egy valódi radioaktív forrás sugárzási tulajdonságait.

A fentiek alapján egy ideális virtuális radioaktív sugárforrásnak a következő feltételeknek kell megfelelnie:

- Külső megjelenését tekintve a virtuális sugárforrásnak hasonlónak kell lennie a nagy fajlagos aktivitású sugárforráshoz.
- Az „árnyékolt”, virtuális sugárforrásnak az árnyékolással rendelkező nagy aktivitású valós sugárforrásokhoz hasonlóan a háttérhez képest emelkedett dózisteljesítményű teret kell létrehoznia.
- A virtuális készülék izotópozonosító módban végzett méréseinek valós izotópokat kell jeleznie.
- A virtuális dózisteljesítménymérő audiovizuális egységgel is rendelkezik, mely a különféle működési módokat és a dózisteljesítmény szintemelkedését jelzi.
- A virtuális dózisteljesítmény készüléken a kijelzett érték a valós dózisteljesítmény mérő készülékhez hasonlóan változzon, azaz a távolság négyzetével fordítottan arányosan.
- A nagy aktivitású sugárforrások általában kis méretűek, vagyis pár méterről pontszerűnek tekinthetők, ezért a virtuális forrásnak is hasonló „pontszerű” tulajdonságokkal kell rendelkeznie.
- A virtuális forrásnak és a virtuális dózisteljesítmény mérőnek ugyanúgy kell jeleznie a természetes háttérrel, illetve az emelkedettebb dózisteljesítményt mérnie, mint a valós dózisteljesítmény mérőknek.
- Amennyiben árnyékolást alkalmaznak, akkor az árnyékolás mögött a dózisteljesítménynek csökkennie kell, azaz a virtuális rendszernek ezt az állapotot is megfelelően kell kezelnie.
- A valós dózisteljesítménymérő készülék mozgatásával a dózisteljesítmény változik, a virtuális rendszernek a mozgás általi dózisteljesítmény változásokat is követnie kell méghozzá a valós készülékek működéséhez hasonlóan.

Az általunk elkészített, nagy aktivitású valódi radioaktív sugárforrás imitálására alkalmas virtuális forrás a fent felsorolt kritériumoknak megfelelően lett kifejlesztve. A rendszer két főbb részre tagolható. Az egyik maga a virtuális rendszer, a másik az imitálásra

alkalmas megjelenés. A virtuális rendszer egy adó-vevő egységből áll és a sugárforrás mozgásának imitációja a gyakorlatban is alkalmazott jelzésekből (radioaktív sugárforrás jelzés, besugárzó készülék, árnyékolás, manipulátor stb.) tevődik össze.

### A virtuális rendszer bemutatása, a virtuális forrás a felhasználó-gyakorlatozó szemzőgéből

A szcenárió értelmében a virtuális rendszer felhasználója a helyszínen egy belső árnyékolással rendelkező, radioaktív sugárforrást tartalmazó imitált besugárzó készüléket lát. Az imitált sugárforrás LED lámpái alap esetben zölden világítanak. Az imitált besugárzó készülékbe egy kis aktivitású valódi sugárforrást is elhelyeznek, melynek mérhető dózisteljesítménye 1 m-ről 3,5  $\mu\text{Sv/h}$ . Emellé kerül a virtuális sugárforrás, melybe a valós, kis aktivitású sugárforrás adatait programoztuk fel (izotóp, aktivitás). Az imitált besugárzó készülék a következő szabványos jelzésekkel van felcímkézve:

- Sugárveszélyt jelzőtábla,
- Műbizonylat szám,
- Napi aktivitás érték,
- Transzport Index,
- Izotóp megnevezés,
- ADR szerinti UN szám, helyes megnevezéssel,
- Címzett adatai,
- Emellett látható a készülék fantázia neve: pl. ELZA,
- Az imitált besugárzó készülékhez épített érintő paneles Android alapú számítógép,
- A készülékhez a sugárforrás műbizonylatai mellékeltek, melynek adatai szerepelnek az EK-ban/SBL-ben használt RADIUM sugárforrás nyilvántartó programban.

A felhasználó az árnyékolással ellátott imitált besugárzó berendezés vizsgálatakor a készüléktől 1 méterre valós és virtuális dózisteljesítmény mérő készülékkel mérhető legnagyobb dózisteljesítményt elosztva tízzel megkapja az ún. Transzport Indexet. Ennek értékének egyeznie kell a felcímkézett, 0,35-ös értékkel, azaz 1 m-ről a készülék 3,5  $\mu\text{Sv/h}$ -t ad, ami a 0,1  $\mu\text{Sv/h}$  természetes háttérértékhez képest magasabb. A 3., 4. és 5. ábrákon látható, hogy a valós és virtuális dózisteljesítmény mérő készülék közel azonos értékeket jelez.



3. ábra: Az izotóp azonosító készülék (bal), a hitelesített dózisteljesítmény mérő (középső), illetve a virtuális dózisteljesítmény mérő (jobb) természetes háttér mérése, [saját szerkesztés]



4. ábra: Dózisteljesítmény mérés a hitelesített dózisteljesítmény mérő készülékkel (bal) és az izotópozonosító készülékkel (jobb), a távolság pontosan 1 m az imitált besugárzó készüléktől, [saját szerkesztés]



5. ábra: Dózisteljesítmény mérés a virtuális dózisteljesítmény mérő készülékkel (bal) és az izotópozonosító készülékkel (jobb), 1 m távolságban az imitált besugárzó berendezéstől, [saját szerkesztés]

Amennyiben valós izotópazonosító készüléket használtuk a készülék  $^{137}\text{Cs}$  forrást identifikál, ami szintén egyezik a 6. ábrán látható címkézéssel és a bárca adataival.



6. ábra: Az izotóp azonosító készülék az imitált besugárzó berendezésen lévő felirattal megegyezően  $^{137}\text{Cs}$ -et érzékel (felső ábra), az alsó ábrán az imitált besugárzó berendezés címkézése látható (izotóp, aktivitás, Transzport Index), [saját szerkesztés]

A műbizonylat adatai alapján az eredeti gyártás ideji aktivitásból számolt napi aktivitás szintén egyezés mutat a készüléken felírt adattal, ami a cikkben leírt kísérleti esetben 30,1 TBq volt.

A természetes háttér vizsgálatok a virtuális és valós dózisteljesítmény mérővel jó egyezést kapunk (megjegyzés: tehát a felhasználó nem feltétlenül tudja, hogy ez nem igazi készülék), valamint pl. 1 méteres távolságból mindkét készülékkel hasonlóan emelkedett értékeket lehet mérni, (itt 3,5  $\mu\text{Sv/h}$ ). Amennyiben egymás mellé tesszük a két detektort, és mozgatjuk a sugárforrás környezetében, akkor mindkét detektor nagyjából időben követve egymást hasonló értékeket mér.

Eddig a pontig az előbb felsorolt tulajdonságok alapján a virtuális forrást és a virtuális dózisteljesítmény mérő tulajdonképpen a valós sugárforrástól, valós dózisteljesítmény mérőtől nem lehet megkülönböztetni. Még egy felkészültebb és gyakorlottabb felhasználó is teljes mértékben azt gondolhatja, hogy ez egy valódi 30,1 TBq aktivitású,  $^{137}\text{Cs}$  sugárforrás, mely árnyékolás mögött helyezkedik el az imitált készülékben.

### A virtuális sugárforrás-detektor rendszerrel végzett scenárió bemutatása:

A virtuális rendszer valóságosabb kipróbálására egy scenáriót dolgoztunk ki, mely során a nagy aktivitású sugárforrás kikerül az árnyékolás mögül. Korábban említésre került, hogy többféle folyamat vezethet oda, hogy a nagy aktivitású radioaktív sugárforrás kikerül az árnyékolásból, illetve nem lehet visszavezérelni az árnyékolás mögé. Jelen esetben egy kicsit a jövőbe mutató scenáriót alkottunk meg, melyben a sugárforrást vezérlő szoftver hibásodik meg pl. egy külső számítógépes vírus hatására. Emiatt a rendszer elveszti a kontrollt és hibásan kivezéri a sugárforrást, túlterheli a kivezérő mechanikát és eltöri a kivezérő mechanika egyik fogaskerekét, így a készülék nem képes a sugárforrást az árnyékolás mögé visszavezérelni. A valóságban egy kiber támadás történt Iránban egy nukleáris létesítmény ellen a 2010-es években ld. STUXNET [3]. A nem túl távoli jövőben a szoftveres

vezérlés és a mesterséges intelligencia nagyobb arányú elterjedése várható, vagyis a jelenlegi felsőkategóriás autókön és internetes botokon kívül idővel valószínűleg megjelennek a sugárveszélyes alkalmazásoknál is. A scenárió ezt a nem túl távoli jövőben bekövetkező eshetőséget vizsgálja. A scenárió során kiber támadás ér egy kritikus rendszert. Természetesen számos más scenárió is alkotható a kivezérlés okának, illetve az árnyékolás megszűnésének imitációjára.

Ha a virtuális nagy aktivitású radioaktív sugárforrás kivezérlésre kerül és árnyékolatlanná válik, ekkor a készülék lámpái zöldről sárgára, majd pirosra váltanak és ehhez az állapothoz egy veszélyt jelző hanghatás is párosul. Ezzel párhuzamosan a virtuális dózisteljesítmény mérőn a kijelzett („mért”) dózisteljesítmény ugrásszerűen  $3,5 \mu\text{Sv/h}$ -ról  $2452,99 \text{ mSv/h}$ -ra (1 milliószoros ugrás) emelkedik. Ugyanekkor a valós dózisteljesítmény mérő készülékek továbbra is a természetes háttér értéket mutatják, (7. ábra).



7. ábra: Az imitált besugárzó berendezésből kivezérelt virtuális radioaktív forrás, látható, hogy a valós dózisteljesítmény mérők (jobb és baloldali készülék) értékei nem emelkednek, de a virtuális dózisteljesítmény mérő (középső készülék) értéke több nagyságrendet ugrik, [saját szerkesztés]

A 2/2022 (IV.29.) fő sugárvédelmi rendelet [4] értelmében vészhelyzet esetén a maximálisan kapható dózis  $250 \text{ mSv}$ . A használt virtuális árnyékolatlan forrástól  $1 \text{ m}$ -re ez a dózis érték a valóságban  $6,5$  perc alatt érhető el. Tehát a felhasználó azt látja, hogy a valódi dózisteljesítmény mérő készüléken a mért természetes háttér érték nem változik, míg a virtuális készüléknél hirtelen akár több nagyságrendet is ugrik a dózisteljesítmény „mért” értéke. Ezt a virtuális dózisteljesítmény mérő audio vizuálisan is jelzi.

A valóságban egyrészt elképzelhető, hogy az egyik készülék nem tud akkora dózisteljesítmény teret mérni, vagy épp meghibásodott, ezért egy ilyen helyzetben nincs idő gondolkodni. A konzervatív szemléletet követve a virtuális készülék által mért óriási értékeket



látva a helyszínt el kell hagyni. Lehetőleg minél távolabb kell menni, de úgy, hogy a sugárforrást tartó készüléket még lehessen látni, hogy figyelmeztetni lehessen az esetlegesen arra járó személyeket. A területet le kell zárni lehetőleg azokon a pontokon, ahol a dózisteljesítmény természetes háttérközeli értékre esik vissza. Jelen szcenárió szerint ez egy 870 m sugarú kör lenne, azaz ez kb. 2,4 km<sup>2</sup> kör alakú területnek felelne meg. A számításokat az interneten elérhető Radpro Calculator-ral [5] gyorsan el lehet végezni (8. ábra).

Amint a fentiekből látható, az elméleti tartózkodási idő maximum 6,5 perc. Azonban a forrás 870 m-ről történő megközelítése és eltávolodása közti idő alatti dózisznövekményt is figyelembe véve a hibaelhárításra kevesebb, mint 6 perc állna rendelkezésre. Emiatt a szcenáriónak megfelelően elegendő idő legyen a beavatkozásra a felhasználónak árnyékolást kell használni. A szcenárióban rendelkezésre áll műtrágya, mely sűrűségét tekintve hasonló a normál betonhoz, ugyanakkor a műtrágya szemcsés szerkezetű, így mozgás közben nem keletkeznek kis rések, amin a sugárzás egy része átjöhethet. Emiatt praktikusabb, mint a beton tömbök használata. Egy kis kocsi felrakodva kb. 50 cm vastag árnyékolás érhető el, így 1 m távolságból a dózisteljesítmény lecsökken 4497  $\mu\text{Sv/h}$ -ra. A számítások szerint. Ekkor maximum 55,6 óráig lehetne a sugárforrás mellett tartózkodni a 250 mSv eléréséig. Ügyelni kell, hogy az árnyékolás tömör legyen, átfedjen és az árnyékolás mögül nem szabad előbújni (9. ábra).

The screenshot shows the Rad Pro Calculator interface for a Gamma Emitter Point Source Dose-Rate calculation. The main title is "Rad Pro Calculator". Below the title is a navigation menu with options: Home Page, Online Calculators, Freeware, Rad Pro Information, Documents, and Help. A note states: "For those needing portability, Rad Pro for Desktop works with Windows 8.1/10 tablets. Will not work with Surface tablets running Windows RT." The main calculation area is titled "Gamma Emitter Point Source Dose-Rate <--to--> Activity and Shielding Calculations (In Air)".

The interface is divided into several sections:

- Select Calculation:** Radio buttons for "Activity and Dose-Rate" (selected) and "Shield Thickness". A checked checkbox for "Add Shielding".
- Enter or Select Isotope:** A dropdown menu showing "Cs-137".
- Select Dose-Rate Units:** A dropdown menu showing "uSv/hr".
- Select Activity Units:** A dropdown menu showing "MBq".
- Select Distance Units:** A dropdown menu showing "Centimeters".
- Select Coefficient:** Radio buttons for "Attenuation (mu)" (selected) and "Energy Absorption (muen)".
- Select Activity Calculation:** Radio buttons for "Activity to Dose-Rate" (selected) and "Dose-Rate to Activity".
- Enter Activity:** A text input field containing "30100000" with "MBq" units.
- Enter Distance:** A text input field containing "100" with "cm" units.
- Shielding Entries:**
  - Select Shield Material:** A dropdown menu showing "Concrete".
  - Select Thickness Units:** A dropdown menu showing "Centimeters".
  - Enter Shield Thickness:** A text input field containing "50" with "cm" units.
  - A checked checkbox for "Use Buildup Factor (recommended)".
  - A link: "Click to Learn About Buildup Factors".

At the bottom, there is a "Calculate" button. To its right, the results are displayed: "30100000 MBq of Cs-137 at 100 Centimeters" and "4497.44874249073 uSv/hr". Below this, it says "Calculated Dose-Rate".

8. ábra: Árnyékolás számolás a Rad Pro calculator-ral [5]

Valós esetben a művelet végrehajtásához manipulátorokat és periszkópot kell használni. Azaz a virtuális forrással végig biztonságos körülmények között lehet valós körülményeket szimulálni, illetve „mérni” a virtuális értékeket. A rendszer segítségével ki lehet próbálni, hogyan kell, lehet árnyékolás mögött hatékonyan dolgozni extrém nagy dózisteljesítményű terekben. A virtuális detektor az alkarra is rögzíthető, és ekkor mindkét kéz szabadá válik (10. ábra).



9. ábra: Az imitált besugárzó berendezésből kivérelt virtuális forrás, virtuális dózisteljesítmény mérése, 50 cm vastag műtrágya mögött, [saját szerkesztés]



10. ábra: A virtuális dózisteljesítménymérő alkarra szerelve, így mindkét kéz szabad marad, ami megkönnyíti az árnyékolás mögötti beavatkozást, [saját szerkesztés]

### A virtuális sugárforrás-detektor rendszer működése, felprogramozása:

A virtuális sugárforrás rendszere mikrohullámokat használ és távolság meghatározás elvén működő készülékeken alapul (adó-vevő). Az adó maga a virtuális forrás, a vevő pedig a virtuális dózisteljesítmény mérő készülék. Az adó és vevő az egymáshoz képesti viszonyított távolságot folyamatosan méri és az adatokat a számítógépre továbbítja. Ennek segítségével az általunk fejlesztett program kiszámítja egy kiválasztott nuklid dózisteljesítményét a távolság függvényében az alábbi egyenlet alapján:

$$\dot{D} = k_r \cdot A / r^2 \quad (1)$$

ahol:

- $\dot{D}$  [ $\mu\text{Sv/h}$ ]: aktuális dózisteljesítmény „r” távolságban – program által kiszámított érték,
- $A$  [TBq]: a virtuális radioaktív sugárforrás aktuális napi aktivitása – felhasználó által megadott érték,

- $r$  [m]: a forrás és a detektor közötti távolság – mért érték,
- $k_\gamma$  [ $\mu\text{Sv}/\text{h}\cdot\text{m}^2/\text{TBq}$ ]: dózis állandó, vagy dózis konverziós tényező, izotóp függő - felhasználó által megadott érték [6].

Tehát az operátor adja meg az aktivitást és az izotóp típusát, így az „A” és a „ $k_\gamma$ ” ismert, a távolság pedig a virtuális rendszer által mért adat. Az általunk fejlesztett algoritmus a fenti egyenletet használva, folyamatosan újra és újra számolja az aktuális dózisteljesítményt valós időben, a mért távolságok alapján.

Amennyiben nincs sugárforrás beprogramozva, akkor a rendszer automatikusan a természetes háttér értéket mutatja, azaz  $0,1 \mu\text{Sv}/\text{h}$  körüli értékeket.

Az 1 m-ről mérhető  $3,5 \mu\text{Sv}/\text{h}$  dózisteljesítmény a számolások szerint  $46,3 \text{ MBq}$  aktivitású  $^{137}\text{Cs}$  forrásnak felel meg (ekkor valódi forrás volt elhelyezve az imitált besugárzó készülékben). Azaz az operátor a természetes háttér értéket követően a virtuális sugárforrás rendszerben beállítja a  $^{137}\text{Cs}$  aktivitást  $A_1 = 46,3 \text{ MBq}$ -re, így a virtuális detektor kijelzője pont akkor dózisteljesítményt fog mutatni, mintha egy  $46,3 \text{ MBq}$ -es  $^{137}\text{Cs}$  forrás lenne elhelyezve az imitált besugárzó készülékben. A valós detektor is pont ennyit mér, valamint a valós izotópozonosító készülék is  $^{137}\text{Cs}$ -et jelez. Ez azért van, mint említettük, mert egy valódi  $46,3 \text{ MBq}$  napi aktivitású  $^{137}\text{Cs}$  forrás is el volt elhelyezve az imitált besugárzó készülékben. A  $46,3 \text{ MBq}$ -es forrás imitálja az árnyékolt  $30,1 \text{ TBq}$  forrás dózisteljesítmény terét az imitált besugárzó berendezéstől 1 m távolságban.

Amikor a virtuális radioaktív sugárforrás kivezérlésre kerül, akkor az operátor átállítja az aktivitást a műbizonylaton szereplő napi aktuális aktivitás értékre, azaz  $A_2 = 30,1 \text{ TBq}$ -re. Ekkor a valódi dózisteljesítmény mérő nem fog többletet jelezni, de a virtuális dózisteljesítmény mérő „mért” értéke a 7. ábra alapján  $2452 \text{ mSv}/\text{h}$ .

$50 \text{ cm}$  vastag műtrágya árnyékolást használva az 1 m-ről a virtuális rendszerrel mérhető dózisteljesítmény „mért” értéke  $4426 \mu\text{Sv}/\text{h}$  (9. ábra). Ez megfelel  $A_3 = 59\,095 \text{ MBq}$   $^{137}\text{Cs}$  forrásnak, azaz az operátor ekkor átállítja az aktivitás értékét  $A_3$ -ra.

Miután a kivezérlés hibáját a felhasználó megszünteti és a virtuális radioaktív forrás visszament a helyére az operátor újra megváltoztatja az aktivitást a kezdeti állapotra, azaz  $A_4 = A_1 = 46,3 \text{ MBq}$ . Így 1 m távolságból mind a valódi, mind a virtuális dózisteljesítmény mérő ugyanúgy  $3,5 \mu\text{Sv}/\text{h}$  értéket fog jelezni, ami megegyezik a használt valódi sugárforrás adataival.

Tehát a virtuális forrás rendszer operátorának annyi a dolga, hogy néhányszor a megfelelő időben megváltoztatja a virtuális sugárforrás aktivitás értékeit, valamint irányítja a készülék fényeit és hangjait. Az operátor a megfelelő időben ki, illetve visszavezérli a virtuális radioaktív forrást, mindezt teljes diszkrécióban megteheti, mivel egy másik szobában videokamerás megfigyeléssel követi nyomon a műveleti terület eseményeit (11. ábra). A megfelelő időzítéssel így elérhető, hogy a felhasználó abszolút valóságos szituációként élje meg az adott scenáriót. A videofelvétel kiértékelésével láthatóvá válnak a felhasználó hibázási pontjai, vagyis, hogy mikor, hol vétett hibát, esetleg mely intézkedéseket hozott meg későn, vagy nem teljesen megfelelően hajtott végre a feladatot. Ez pedig jelentősen hozzájárulhat a felhasználó tapasztalatának, gyakorlatának bővítéséhez.

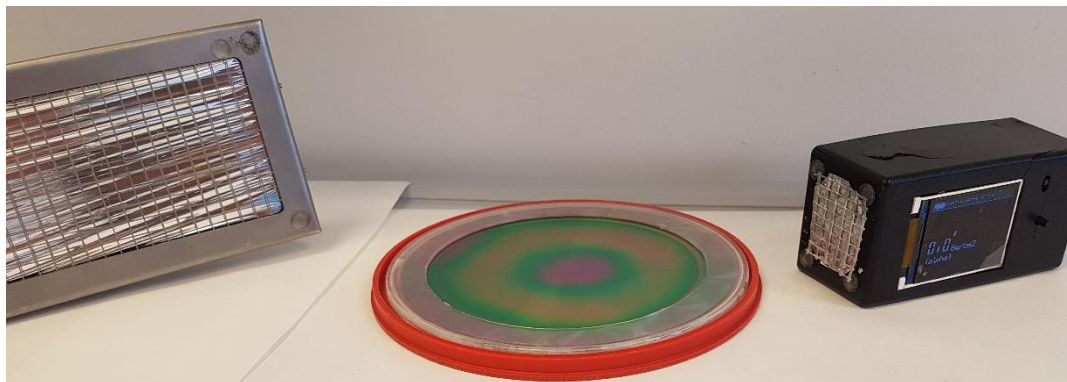


## A VIRTUÁLIS RADIOAKTÍV FELÜLETI SZENNYEZETTSÉG ÉS VIRTUÁLIS FELÜLETI SZENNYEZETTSÉG MÉRŐ

A virtuális gamma sugárzó forrással és a virtuális dózisteljesítmény mérővel valószínűleg demonstrálható egy gamma sugárzó radioaktív anyag dózisteljesítmény és felületi szennyezettség mérése. Az alfa sugárzók felületi szennyezettség mérési karakterisztikája ettől egészen eltérő. Utóbbi sugárzás csak közvetlen közlől mérhető, ugyanakkor a szennyezés szinte minden esetben kiterjedt.

A virtuális radioaktív szennyezettség mérőnek és virtuális radioaktív szennyezésnek az alábbi tulajdonságokkal kell rendelkeznie:

- A virtuális felületi szennyezettség mérőnek külső megjelenését tekintve hasonlítania kell az igazi felületi szennyezettség mérőhöz (13. ábra jobb-bal oldali készülék mérő ablaka).
- A mérési karakterisztikának valószínűleg kell lennie, azaz csak közvetlen közlől szabad a rendszernek bejeleznie.
- A virtuális szennyezés a valós szennyezéshez hasonlóan kiterjedt felületű, melynek szélén a felületi szennyezettség értéke minimális, míg a közepén maximális.
- A rendszernek mérnie kell a dekontaminálás hatását.



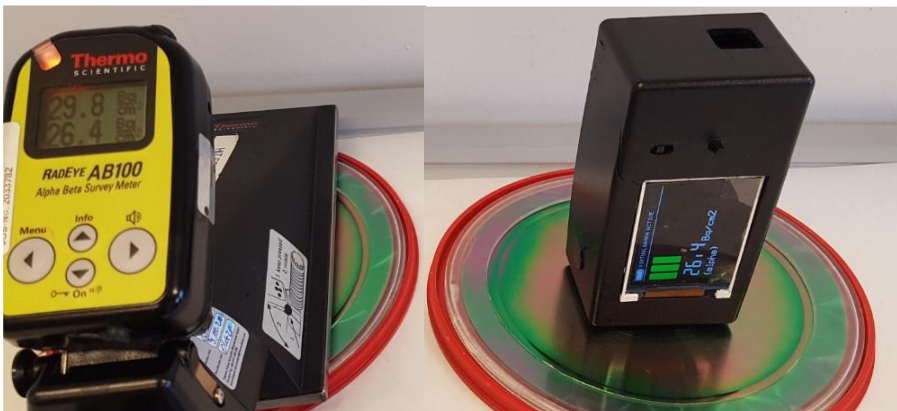
13. ábra: Thermo AB-100 valódi felületi szennyezettség mérő (bal), valamint a virtuális szennyezettség mérő mérőfeje (jobb), közlően látható az etalon  $^{239}\text{Pu}$  sugárforrás, [saját szerkesztés]

### Virtuális felületi szennyezettség és szennyezettség mérő bemutatása, a virtuális szennyezés a felhasználó-gyakorlatozó szemszögéből

A gyakorlatlan felhasználó a valós és virtuális felületi szennyezettség mérő között a készülék küllemét és működését tekintve elvileg nem tud különbséget tenni. A készülék a felületi szennyezettség értékeket [ $\text{Bq}/\text{cm}^2$ ]-ben jeleníti meg. A programozható felületen be lehet állítani a felületi szennyezettség maximális értékét, illetve a felületi szennyezettség kiterjedését. Továbbá a háttér értéket és a dekontaminálás utáni értékeket is definiálni lehet. Az operátor on-line figyelheti a virtuális szennyezettség mérő készülék által mért értékeket és a megfelelő pillanatban a különféle felületi szennyezettségi szintek között tud váltani. Tehát az adott folyamathoz a megfelelő érték beprogramozható pár másodperces átállási idővel. Az alábbi ábrákon (14.-15. ábra) ugyanazon etalon  $^{239}\text{Pu}$  forrás mérése során a valódi és a virtuális felületi szennyezettség mérő látható.



14. ábra: Thermo AB-100 valódi felületi szennyezettség mérő (alsó érték a kijelzőn) és a virtuális felületi szennyezettség mérő alfa háttér mérése (valós mérőeszköznél az alsó érték az alfa szennyezettség) ( $0,00 \text{ Bq/cm}^2$ ) a  $^{239}\text{Pu}$  etalon sugárforrások mellett, [saját szerkesztés]



15. ábra: A valósi (bal oldali ábra) vs. virtuális felületi szennyezettség mérő (jobb oldali ábra) „mért” alfa felületi szennyezettség értéke (valós mérőeszköznél az alsó érték) a második etalon forrás esetén, mindkét esetben  $26,4 \text{ Bq/cm}^2$ , [saját szerkesztés]

Amennyiben az alfa sugárzó  $^{239}\text{Pu}$  etalon sugárforrást letakarjuk, a valósi műszer is a háttér értéket mutatja (16. ábra):

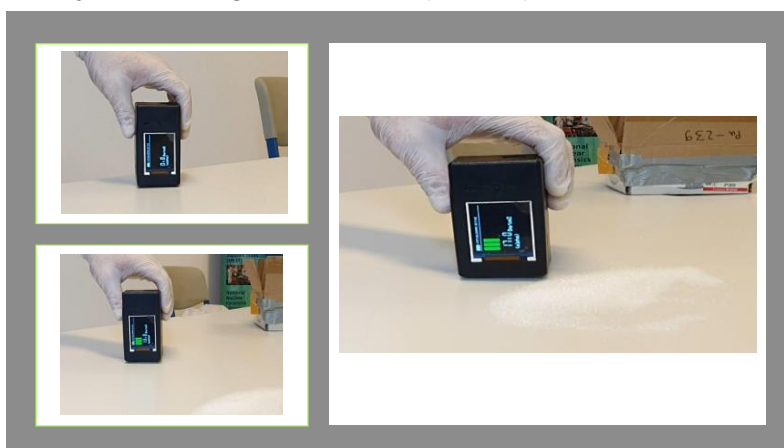


16. ábra: A valós (bal) vs. virtuális (jobb) felületi szennyezettség mérő „mért” alfa felületi szennyezettség értéke (valós mérőeszköznél az alsó kijelzett érték az alfa szennyezettség) a letakart etalon forrás esetén, mindkét esetben  $0,00 \text{ Bq/cm}^2$ , [saját szerkesztés]

## A VIRTUÁLIS FELÜLETI SZENNYEZETTSÉG MÉRŐ BEMUTATÁSA EGY SZCENÁRIÓN KERESZTÜL

A bemutatott szcenárióban egy radioaktív sugárzást mérő detektor bejelez az egyik sugárkapunál. Ezután a talált forrást a 490/2015. (XII. 30.) rendelet alapján vizsgálatra elszállítják egy laboratóriumba [7]. A gyanús csomag kicsomagolásakor egy ampulla az asztalra esik és eltörik, a benne lévő anyag kiszóródik az asztal felületére.

Első lépésként felületi szennyezettség mérővel háttér mérést kell végezni, majd az asztalt kell szisztematikusan végig mérni. Amennyiben észlelhető felületi szennyezettség, nagyságát és kiterjedését is meg kell határozni (17. ábra).



17. ábra: A virtuális felületi szennyezettség mérővel háttér „mérése” (bal oldali felső ábra), szennyezés keresése (bal oldali alsó ábra), kiterjedés meghatározása (jobb oldali ábra), [saját szerkesztés]

Amennyiben a mért értékek meghaladják a beavatkozási szintet, meg kell kezdeni a dekontaminálást. A dekontaminálás hatásfoka az alábbi egyenlet alapján számolható [4]:

$$E=100 \cdot (A_k/A_0) \quad (2)$$

ahol:

- E: a dekontamináció hatásfoka [%],
- $A_k$ : aktivitás koncentráció értéke a felület tisztítás után [ $Bq/cm^2$ ],
- $A_0$ : aktivitás koncentráció értéke a felület tisztítása előtt [ $Bq/cm^2$ ].

A dekontamináció hatásfoka a felület érdességétől, nedvszívó képességétől, a szennyező anyag fizikai-kémiai formájától, valamint a dekontamináló szertől és a dekontaminálás technikájától függ. A hatásfok a felület többszöri tisztítása esetén egyre csökken. A dekontaminálási fázisokat követően két állapot állhat fenn:

- A szennyezést sikerült zéró szintre csökkenteni.
- A felületről a maradék szennyezés az adott dekontamináló technológiával nem eltávolítható.

A 18. ábrán az egyes tisztítási folyamatokat követően a virtuális felületi szennyezettség érték csökkenését mutatjuk be. A felület dekontaminálásakor a nem fixált felületi szennyezettség jellemzően exponenciális jellegűen csökkenni kezd. A virtuális rendszert exponenciális felületi szennyezettség csökkenésre állítottuk be.



18. ábra: A „mért” virtuális felületi szennyezettség értékek csökkenése a dekontaminálási fázisokat követően, [saját szerkesztés]

A sorozatos dekontaminálást követően a szennyezettség értékre egyre lassabban kezd csökkenni, majd megáll. Ennél a pontnál az összes nem fixált szennyeződést sikerült eltávolítani. A fixált szennyezés az adott dekontaminálási technikával nem jön le a felületről, így annak értéke állandó. Ugyanakkor az alfa sugárzó anyag letakarásával elérhető a mért felületi szennyezettség zéró értéke, mivel az alfa sugárzás áthatólképessége minimális (1. ábra). A 19. ábrán látható a fixált „alfa szennyezés” letakarásának a hatása a virtuális rendszerrel „mérhető” felületi szennyezettség értékekre.

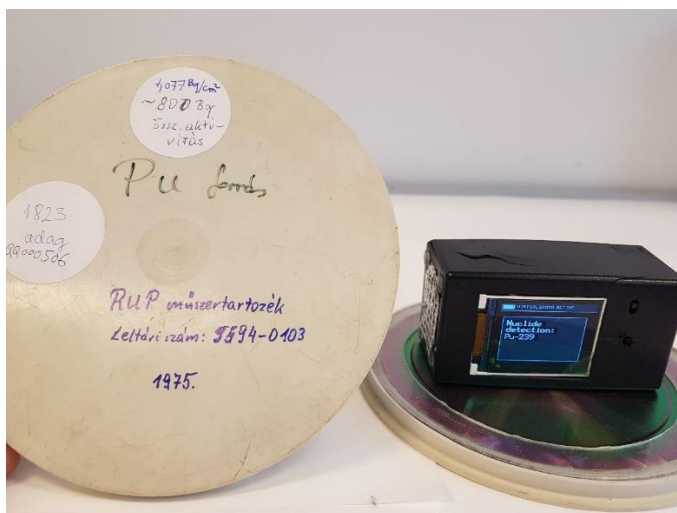




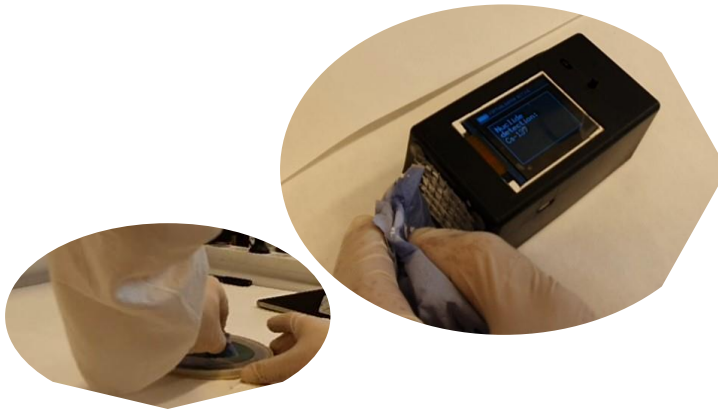
19. ábra: A virtuális fixált felületi alfa szennyezettség letakarása, [saját szerkesztés]

## A VIRTUÁLIS RENDSZER IZOTÓP AZONOSÍTÓ ÜZEMMÓDJA

Az elveszett radioaktív sugárforrás keresési gyakorlatoknál a felderítők a forrás lokalizálása után izotóp azonosító készüléket használnak, mely segítségével a megtalált forrás izotóp összetételét határozzák meg. Amennyiben a virtuális rendszerrel izotóp azonosító készüléket imitálunk, akkor a készülék kijelzőjén a scenárióban szereplő nuklid neve megjeleníthető, és a zártágvizsgálat alkalmával vett dörzsmintavételezésnél a dörzsminta „nuklid azonosítása” is elvégezhető (20.-21. ábra).



20. ábra: A virtuális izotóp azonosító üzemmódban a készülék a forráson lévő felirattal megegyezően  $^{239}\text{Pu}$ -et „érzékel”, [saját szerkesztés]



21. ábra: A virtuális izotóp azonosító üzemmódban a készülék a zártságvizsgálatkor vett dörzsminta nuklid „azonosítására” is alkalmas, [saját szerkesztés]

A scenárióban a  $^{239}\text{Pu}$  forrásról vett dörzsminta „nuklid azonosítása” alapján megállapítható, hogy a  $^{239}\text{Pu}$  forrás felülete  $^{137}\text{Cs}$ -el szennyezett. Ez alapján a  $^{239}\text{Pu}$  forrás zárt-nak tekinthető, mivel a dörzsminta nem mutatott ki  $^{239}\text{Pu}$ -et. Ugyanakkor a  $^{137}\text{Cs}$  jelenléte szerint valószínűsíthető, hogy a  $^{239}\text{Pu}$  forrás felülete  $^{137}\text{Cs}$ -el szennyeződött, mivel tárolóban a  $^{239}\text{Pu}$  forrás melletti  $^{137}\text{Cs}$  forrás valószínűleg nyílttá vált.

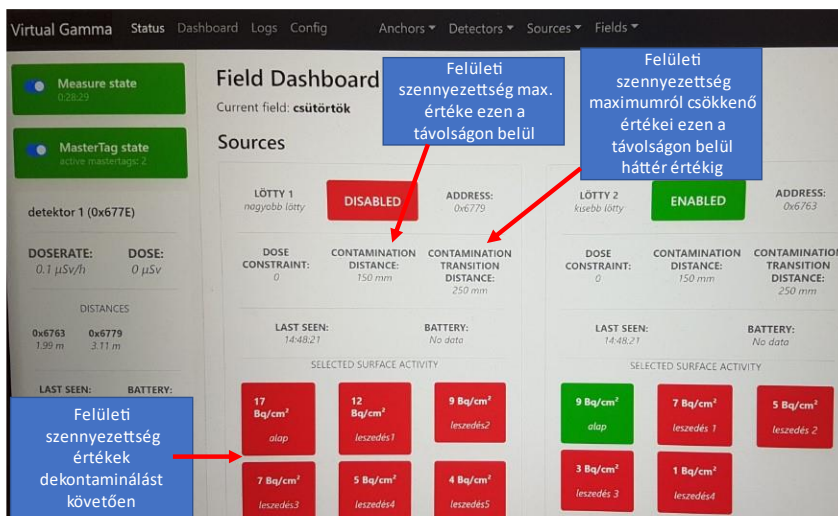
## A VIRTUÁLIS FELÜLETI SZENNYEZETTSÉG MÉRŐ FELÉPÍTÉSE, PROGRAMOZÁSA

A virtuális felületi szennyezettség egy elektronikus adó, míg a virtuális felületi szennyezettség mérő egy elektronikus vevő egység. Az adó-vevő valós időben érzékeli az egymástól való távolságot és ezen értékeket másodpercenként folyamatosan frissíti és elküldi a rendszerhez tartozó számítógép részére. A bejövő mért adatokat a számítógépen futó program fogadja és a felprogramozott rendszer által számított értékeket jeleníti meg a vevő (virtuális felületi szennyezettség mérő) kijelző egységén. Jelen esetben a mértékegységet [ $\text{Bq}/\text{cm}^2$ ]-ben adja meg. A program platformja interneten elérhető, így a rendszert akár mobiltelefonnal és egyéb okos eszközökkel is lehet programozni és irányítani. A virtuális felületi szennyezettség mérő üzemmódban három fő érték adható meg:

- (I.) Távolság, melyen belül a virtuális felületi szennyezettség mérő bejelez és maximum értéket mutat (pl. egy elcseppenő szennyezés centruma).
- (II.) A teljes szennyezés kiterjedését megadó kiterjedés paramétere.
- (III.) A harmadik érték maga a felületi szennyezettség értéke, melyet szeretnénk mérni, amennyiben a felületi szennyezettség mérő bizonyos távolságon belül kerül az adóhoz képest. Itt több értéket is meg lehet határozni: például kezdeti szennyezettség értéket, majd több csökkenő értéket is.

Egy valós szennyezés felületi szennyezettség koncentrációja általában nem egyenletes, a centrumtól távolodva csökken. Ezen funkció ezt is képes imitálni. Ha ezen a távolságon túl mérünk, akkor a készülék 0-t jelez, azaz itt már nincs szennyezettség. Így a virtuális felületi szennyezettség mérővel többszöri méréssel ki lehet mérni a felületi szennyezettség határát.

Az operátornak az egyes dekontaminálási fázisokat követően ezen előzetesen beprogramozott értékeket kell beállítania. Az átállás időigénye általában pár másodperc. Az operátor videokamera rendszeren keresztül követheti a beavatkozók aktuális munkáját és ezen információk alapján beállíthatja a scenárió adott idejéhez köthető felületi szennyezettség értékeket. Ha szükséges, a helyszínen is tartózkodhat, és a mérendő felületi szennyezettség értékeket az okos telefonon keresztül is valós időben állíthatja. A rendszer a pillanatnyi távolság alapján automatikusan kiszámítja a 0-maximum közötti felületi szennyezettség értékeket (22. ábra).



22. ábra: A virtuális felületi szennyezés és szennyezettség mérő programozása. [saját szerkesztés]

## ÖSSZEFOGLALÓ

Az SBL által kialakított tanpályákon maximum 4.-5. kategóriájú radioaktív sugárforrások alkalmazása engedélyezett. Árnyékolatlan, nagy aktivitású forrással és emiatt igen nagy dózisteljesítményű terekben nem szabad sugárforrás felderítési gyakorlatokat tartani. Ugyanakkor speciális esetekben (pl. baleset, szabotázs, működési hiba, talált forrás) előfordulhat, hogy egy nagy aktivitású sugárforrás kikerül az árnyékolás mögül és igen nagy dózisteret hoz létre. A beavatkozókat biztonságos környezetben ezen ritka, de veszélyes esetekre kell felkészíteni.

A kifejlesztett virtuális radioaktív forrás, virtuális dózisteljesítmény mérő rendszer segítségével igen nagy aktivitású és dózisterű radioaktív sugárforrásokat tudunk imitálni valósághűen. A virtuális rendszerrel a viszonylag ritkán előforduló, ugyanakkor igen veszélyes helyzeteket lehet begyakorolni, mely hozzájárul az ionizáló sugárzás elleni védelem magasabb szintű eléréséhez ezen speciális esetekben is. Ilyen rendkívüli eseményeknél nagyon rövid idő alatt lehet jelentős dózisterhelést elszenvedni, ezért fontos begyakorolni a megfelelő lépéseket és a gyors reagálást.

A felületi szennyezettség meghatározása számos szituációban szükséges lehet. Az alfa sugárzó izotópok felderítésének bonyolultságát a magyarázaton és bemutatáson kívül a valós tapasztalat megszerzésével lehet a legjobban érzékeltetni. A valós felületi szennyezettséggel történő gyakorlat végzése sugárszennyezés és inkorporáció (lenyelés, belégzés)

jelentős kockázatával járhat. A kezdő gyakorlatozók még nem rendelkeznek megfelelő rutinnal, ezért számukra a felületi szennyezettség mentesítése, vagyis a dekontamináció különösen kockázatos.

A virtuális rendszer abszolút biztonságos, bárhol alkalmazható és a felületi szennyezettség mérésének lehetőségével egy teljes sugárforrás felderítési scenárió mérés-technikai imitálása megvalósítható teljesen valóságúen, sugárvédelmi következmények nélkül. A virtuális rendszer az elsődleges reagáló, vagy elhárító szervek munkájában segítséget nyújthat a biztonságos felkészülésben. A virtuális rendszer segítségével kiképzett felderítők, a megszerzett rutin által, a későbbiekben nagyobb biztonsággal képesek kezelni egy valós esetet, ahol adott helyszínen radioaktív szennyezettség észlelhető.

### FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] 190/2011. (IX. 19.) Korm. rendelet az atomenergia alkalmazása körében a fizikai védelemről és a kapcsolódó engedélyezési, jelentési és ellenőrzési rendszerről <https://net.jogtar.hu/jogszabaly?docid=a1100190.kor> (2022.06.07.)
- [2] <https://rhk.hu/sugarvedelem> (2022.06.07.)
- [3] Prof. Dr. Rajnai Zoltán: Kritikus (Információs) Infrastruktúrák Összetétele, Biztonsági kérdései, előadás 2020.
- [4] 2/2022. (IV. 29.) OAH rendelet az ionizáló sugárzás elleni védelemről és a kapcsolódó engedélyezési, jelentési és ellenőrzési rendszerről, <https://net.jogtar.hu/jogszabaly?docid=A2200002.OAH&txtreferer=00000001.txt> (2022.07.11.)
- [5] <http://www.radprocalculator.com/Gamma.aspx> (2022.07.11.)
- [6] Bodor Károly, Dr. Völgyesi Péter, Dr. Kovács András: Segédlet készítése az Országos Nukleáris Védelmi Intézkedési Terv mellékleteihez, OAH-MMT pályázat, 2020.11.10.
- [7] 490/2015. (XII. 30.) Korm. rendelet a hiányzó, a talált, valamint a lefoglalt nukleáris és más radioaktív anyagokkal kapcsolatos bejelentésekről és intézkedésekről, továbbá a nukleáris és más radioaktív anyagokkal kapcsolatos egyéb bejelentést követő intézkedésekről, <https://net.jogtar.hu/jogszabaly?docid=a1500490.kor> (2022.06.07.)