

**DEVELOPMENT OF DRONES FOR  
RADIATION PROTECTION APPLICATIONS****SUGÁRVÉDELMI ALKALMAZÁSOKRA  
HASZNÁLHATÓ DRÓNOK FEJLESZTÉSE**

BODOR Károly<sup>1</sup> – VÖLGYESI Péter<sup>2</sup> – ZAGYVAI Péter<sup>3</sup> – GULYÁS Attila<sup>4</sup> –  
PÁL Károly<sup>5</sup> – MARSÍ Balázs<sup>6</sup> – RÁTKAI Ákos<sup>7</sup>

**Abstract**

The article introduces the prototype drone suitable for the exploration of radioactive radiation sources. This drone is under development in the Nuclear Security Department (HUN-REN CER SBL) of the HUN-REN Centre for Energy Research. The article will talk as well about further development directions. In recent years, the use of drone technology has become available. However, the search for radioactive materials requires a device that meets certain special conditions. The HUN-REN EK, in cooperation with DoubleRingWings (DRW) Ltd., has begun the development of a drone that meets special requirements. The article presents the steps of this development.

**Keywords**

Virtual radioactive source, Training site, Radiation protection, Work protection, Drone

**Absztrakt**

A cikk bemutatja a HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont Sugárbiztonsági Laboratóriumában (HUN-REN EK SBL) építés alatt álló, radioaktív sugárforrás felderítésére alkalmas prototípus drónját, valamint az ezzel kapcsolatos fejlesztéseket. Az elmúlt években elérhetővé vált a drón technika alkalmazása. Ugyanakkor a radioaktív anyagok felkutatásához olyan eszközre van szükség, mely bizonyos speciális feltételeknek megfelel. A HUN-REN EK a DoubleRingWings (DRW) kft. közreműködésével elkezdte egy speciális igényeknek megfelelő drón kifejlesztését. A cikk ezen fejlesztés lépéseit mutatja be.

**Kulcsszavak**

Virtuális sugárforrás, Tanpálya, Sugárvédelem, Munkavédelem, Drón

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

<sup>2</sup> volgyesi.peter@ek-cer.hu | ORCID: 0000-0001-6607-7383 | Head of Nuclear Security Department, Centre for Energy Research | Sugárbiztonsági Laboratórium vezető, Energiatudományi Kutatóközpont

<sup>3</sup> zagyvai.peter@ek-cer.hu | ORCID: 0000-0002-8121-8452 | Radiation protection advisor, Centre for Energy Research | Sugárvédelmi tanácsadó, Energiatudományi Kutatóközpont

<sup>4</sup> gulyas.attila@ek-cer.hu | ORCID: 0000-0002-1100-1880 | Developmental physicist, Centre for Energy Research | Fejlesztő fizikus, Energiatudományi Kutatóközpont

<sup>5</sup> karoly.pal@doublingwings.com | ORCID: 0000-0001-6674-6532 | Drone pilot-expert, Doublingwings | Drón pilótaszakértő, Doublingwings

<sup>6</sup> marsi.balazs@tek.gov.hu | ORCID: 0009-0000-4137-7355 | CBRN deputy leader of CBRN unit, Counter Terrorism Centre | CBRN egység helyettes vezető, Terrorrelhárítási Központ

<sup>7</sup> ratkai.akos@ek.hun-ren.hu | ORCID: 0009-0000-5368-7852 | Technical manager, Centre for Energy Research | Műszaki menedzser, Energiatudományi Kutatóközpont

## BEVEZETŐ

A 490/2015. (XII. 30). Kormány rendelet a hiányzó vagy talált radioaktív és nukleáris anyagokkal kapcsolatos intézkedéseket tárgyalja [1]. A nukleáris anyagok felderítésére, beazonosítására a rendelet a HUN-REN EK SBL-t jelölte ki, továbbá más szervezeteket is bevon az eljárásba (például: OAH: Országos Atomenergia Hivatal, Katasztrófavédelem, Rendőrség stb.) Az elmúlt években a HUN-REN EK a Készenléti Rendőrséggel kialakított egy eljárásrendet a bűnügyi helyszínen feltételezhető jelenlévő radioaktív anyag kezelésére [2], [3], [4]. Az elveszett radioaktív sugárforrás keresésénél az SBL, bűnügyi helyszín esetén pedig a rendőrséggel kiegészült ún. Mobile Expert Support Team (MEST) végzi a felderítést (lásd 1. ábra). A közös eljárásrendet a HUN-REN EK az INCLUDING Európai Unió projekt keretében is bemutatta a HUN-REN EK-ban létrehozott/épült tanpályán [5], [14] (lásd 2. ábra).

A radioaktív sugárforrás felderítésének kezdő lépése jelenleg a dózisteljesítmény mérése egy teleszkópikus rúdra elhelyezett GM szonda segítségével. Ezt a műveletet a MEST csapat egyik tagja végzi el (lásd 3. ábra). Már a bemutatók során felmerült az elsődleges felderítés robotokkal, pl. drónnal vagy UGV-vel (Unmanned Ground Vehicle) történő megvalósításának az igénye.



1. ábra: MEST radioaktív sugárforrás-felderítési bemutató a Nemzetközi Atomenergia Ügynökségnél (NAÜ), [3], (saját szerkesztés)



2. ábra: Felderítési bemutató az INCLUDING EU projekt résztvevői számára, (saját szerkesztés), [5]



3. ábra: Sugárforrás-felderítéshez használt dózisteljesítmény-mérő készülék (az említett rúdra elhelyezett GM szonda), [4]

### A NAPJAINKBAN ELÉRHETŐ DRÓN TECHNOLÓGIÁK ISMERTETÉSE

A dróntechnológia az elmúlt években jelentős fejlődésnek indult, például a drónok hasznos teherviselése (payload) megnőtt. Ezzel párhuzamosan a hasznos repülési idő is megnövekedett a nagy teljesítményű kompakt akkumulátorok megjelenésével. A drónos technológiák esetén egy igen speciális területnek számít a sugárforrás-felderítés, ezért a detektorokat gyártó cégeknél általában nem volt elérhető sugárforrás keresésére alkalmas drón. Ennek megfelelően egyes cégek is elkezdték ezen drón fejlesztését (pl. Gamma Zrt.). A HUN-REN EK és a DRW szakemberei részt vettek több drónnal történő sugárforrás-felderítési gyakorlaton, valamint a NAÜ által e témában szervezett konferencián.

A különféle sugárforrások drónnal történő felderítése a sugárvédelmi szempontok mellett munkavédelmi aspektusból is kiemelkedő jelentőséggel bír, hisz az eljárás révén akár nullára tudjuk mérsékelni a sugárzás okozta kockázati faktort. Sugaras munkahelyek esetében a munkáltatónak kötelező felmérnie a sugárzásból eredő kvalitatív és kvantitatív kockázati tényezőket, majd erre különféle kockázatmérséklő intézkedéseket tennie. Ilyen mérséklő intézkedés lehet a drónnal való sugárforrás felderítése is.

A drónokon a gyártók a detektorokat szinte kivétel nélkül a drónra szerelik. Ezek a detektorok többségében egy mozdulattal könnyen leszerelhetőek, és a drón elektronikájától függetlenül működnek (4. ábra).



4. ábra: Sugárforrás felderítő drónok, [6], [7]

A drónok mérete a 10-20 cm-től kezdve az igen komoly, akár kisebb autó méretig változhat. Ennek megfelelően áruk is igen változó, azonban általában a mérettel egyenes arányosság figyelhető meg.

A felderítés elvégzéséhez minimálisan egy dózisteljesítmény mérő készülékre, egy nagy felbontású kamerára és a rendszerhez csatlakoztatott jelküldő elektronikára van szükség. A fedélzeti műszerpark kiegészíthető izotópazonosító készülékkel, elektronikus személyi dózismérővel (EPD), levegő aktivitáskoncentráció-mérővel, LED világítással, lézeres távolságmérővel stb. Ilyen felszerelés mellett a drón képes lehet a megtalált forrás beazonosítására (azaz izotóp vizsgálatra). A dózisteljesítmény és távolság értékek alapján meghatározható a forrás aktivitása, valamint ezen értékből az alábbi egyenletek felhasználásával meghatározható a forrás kockázati indexe és fizikai védelmi kategóriája:

$$D = k_\gamma \cdot A / r^2 \quad (1)$$

ahol:

- D: a mért dózisteljesítmény [ $\mu\text{Sv/h}$ ]
- A: sugárforrás aktivitása a mérés időpontjában [MBq]
- r: a sugárforrás és detektor közötti távolság [cm]
- $k_\gamma$ : Adott izotópra jellemző dóziskonverziós tényező [ $\text{cm}^2 \cdot \mu\text{Sv/h/MBq}$ ]

Az aktivitás meghatározható a fenti egyenlet átrendezésével:

$$A = D \cdot r^2 / k_\gamma \quad (2)$$

A sugárforrás rizikó indexe:

$$R = A / D \quad (3)$$

ahol:

- R: a forrás kockázati indexe [dimenzió nélküli]
- A: sugárforrás aktivitása a mérés időpontjában [TBq]
- D: a sugárforrásra jellemző ún. veszélyességi tényező [TBq] (A „D” értékek megtalálhatóak a 3/2022. (IV. 29.) rendeletben [8].

A sugárforrás kategóriája és a szállításhoz, tároláshoz szükséges fizikai védelmi szint a meghatározott „R” értékkel és a fizikai védelmi rendelet felhasználásával megállapítható [9].

Láthatóan a drón komplexebb felszereltségével nő a felderítés során a sugárforrásra jellemző meghatározható paraméterek száma. Ugyanakkor a mérőeszközök növelik a drón terhelését, emiatt a drón kapacitását is meg kell növelni, ami további súlygyarapodást eredményez. Emiatt a sugárforrások felderítésére a közepes és nagy méretű drónok lehetnek alkalmasak.

A hatékony felderítéshez szükséges a használt mérőeszközök nagy érzékenysége és a minimum félórás repülési idő. A nagy érzékenységet nagyméretű detektorok alkalmazásával lehet elérni, ami szintén növeli a drónra eső terhelést. A felhajtó erőt a drónok rotorjai által a földfelszín irányába cirkulált levegő szolgáltatja. A drón súlyának növekedése erősebb rotorok használatát teszi szükségessé. Ezek igen jelentős talaj irányú légmozgást generálhatnak, ami akár 5 m magasságból is képes például faleveleket szétfújni a felszínen.

## A FELDERÍTENDŐ RADIOAKTÍV ANYAGOK JELLEMZŐI

A radioaktív sugárforrások között nyílt és zárt forrásokat különböztetünk meg. A zártaságot a sugárforrás kapszulájának ellenálló képessége határozza meg. Nyílt forrás esetén a kapszula ellenállása minimális, vagyis akár kisebb behatásokra is felnyílik. Ilyen tárolók például az üveg ampullák. A nyílt tárolókból a radioaktív anyag kikerülhet a környezetbe, ahol szétoszlik és ennek hatására a tereptárgyakon ún. felületi szennyezettség alakul ki (kontamináció). A zárt sugárforrások kapszulája értelemszerűen erősebb behatásoknak is képes ellenállni. Jellemzően minél nagyobb egy forrás aktivitása annál erősebb kapszulába zárják. A nagy aktivitású források kapszulája akár igen extrém körülmények mellett (pl. magas hőmérséklet, nyomás) is megtartja az integritását.

A sugárforrások általában fizikailag kis méretűek, kiterjedésük pár cm és a tömegük jellemzően nem éri el a 200 g-ot. Ennek ellenére magas fajlagos aktivitás esetén nagy aktivitással rendelkezhetnek, és árnyékolás nélkül magas dózisteljesítményű tereket hozhatnak létre. A sugárforrás aktivitásának növekedésével nagyobb árnyékolású forrástartó konténereket vagy nagy méretű berendezéseket használnak. A megfelelő árnyékolásnak segítségével a dózisteljesítmény a forrástartó körül nem haladja meg az előírásokat, pl. a közúti fuvarozási szállítás esetén a konténer felületétől 1 m távolságban a megengedett legnagyobb dózisteljesítmény 10 mSv/h.

## A DRÓNNAL TÖRTÉNŐ RADIOAKTÍV SUGÁRFORRÁS-FELDERÍTÉS KRITÉRIUMAI

### Személyi feltételek

A radioaktív sugárforrás felderítése olyan munkafolyamat, mely során a felderítő sugárforrással dolgozik. A fő hazai sugárvédelmi rendeletben (2/2022. IV.29.) jelenleg nincs említve a sugárforrás felderítése robotok felhasználásával, de a rendelet 19.§ (2) pontjába sorolhatóak azon szakemberek, akik sugárforrás-felderítésben részt vehetnek. Emiatt indokolt a rendelet szerinti bővített sugárvédelmi tanfolyam elvégzése [10].

A drónpilóta szervezett munkavégzés keretében végzi a repülést, munkavédelmi, tűzvédelmi, továbbá katasztrófavédelmi oktatásban is részesülnie kell az első munkavégzés megkezdése előtt. Az oktatás lebonyolításra és a visszakerdezésre való megfelelés összeállítása a munkáltató felelőssége.

Az elveszett források megtalálásához mindezekon felül szükséges egy speciális elméleti tananyag elsajátítása. Ezt követően a keresést a HUN-REN EK SBL által kifejlesztett virtuális sugárforrás segítségével lehet begyakorolni. A nagy tanpályáján lehetőség van az ún. 4 - 5. kategóriájú valódi sugárforrásokkal való gyakorlatozásra is.

A drón operátornak tapasztalt pilótának kell lennie, mivel a sugárforrások épségét tilos veszélyeztetni 2/2022. IV.29. rendelet 41.§ (3) [10].

### A sugárforrás felderítő drónnal szemben állított követelmények:

A drónnak a rá szerelt mérőeszközökkel minimum fél órán át a levegőben kell tartózkodnia. A fedélzeti számítógépen nem szabad adatot tárolni kiber biztonságtechnikai okokból. A drón nem közelítheti meg annyira a felszínt, hogy az általa keltett légörvény a talajon lévő esetleges szennyezést széthordja, illetve a kistömegű sugárforrást arrébb lökje.

A méretének növekedésével a minimális magasság is nő. A drón elektronikáját, irányíthatóságát nagyobb dózisteljesítményű terekben kell tesztelni, mivel az elektronika érzékeny. Emiatt a nagy dózisteljesítményű terekben a drón irányíthatósága részlegesen megszűnhet. Emiatt érdemes egy a drónra közvetlenül felszerelt dózisteljesítmény mérő által mért adat esetén figyelmeztetési, illetve riasztási szintet beállítani, hogy a pilóta elkerülje a kontroll esetleges elvesztését. Amennyiben ez megtörténik, akkor egy beépített automatika segítségével úgy kell beprogramozni a drónt, hogy ilyen esetben visszatérjen a bázisra. A drónnak a manuális felderítés mellett képesnek kell lennie egy előre beállított séma szerint automatikusan mozogni.

Munkavédelmi szempontból fontos továbbá, hogy a használni kívánt drón rendelkezzen érvényes vonatkozó dokumentumokkal, úgymint típusvizsgálati tanúsítvány, a munkavállaló által értett nyelven használati útmutatóval (ami helyszínen rendelkezésre is van bocsátva) továbbá a drón műszaki dokumentációjával. Ezen kívül a munkavégzés környezetét úgy kell kialakítani, hogy az ne veszélyeztesse a munkavállaló saját és más, hatókörben lévő személyek testi épségét és biztonságát, sem a le és felszállás alkalmával, sem pedig a manuális vagy akár automatikus repülés során.

### **A felderítő drónra szerelt mérőeszközök követelményei:**

A mérőeszközöknek a lehető legérzékenyebbnek kell lenniük, mivel így lehet minél nagyobb távolságból már kis dózisteljesítmény esetén is észlelni a forrást. Sokszor ez azzal jár, hogy a mérőeszköz mérete és tömege megnövekszik, ami kedvezőtlen a drónos alkalmazáshoz. Lehetőség szerint automatikusan kell működniük, emellett szükséges az előre beállítható figyelmeztető és riasztási szintek elérhetősége. A mért értékeket a földi kiszolgáló felé digitálisan kell továbbítani. Fontos továbbá, hogy a mérőeszközök hitelesített műszerek legyenek, amit jellemzően egy független akkreditált szervezet által lehet megszerezni.

## **AZ EK ÉS A DRW KÖZÖS DRÓN FEJLESZTÉSE**

A korábbiakban ismertetésre kerültek a jelenleg jellemzően elérhető sugárforrás-felderítésre kifejlesztett drónok tulajdonságai. A fejlesztések során sajnos nem vették kellően figyelembe az elveszett források tulajdonságait. A piacon kapható drónok csak nagy magasságban használhatóak, mivel alacsonyabb repülés mellett valószínűsíthetően a rotorkok által keltett légörvény széthordhatja a sugárforrást. Emiatt a detektorok érzékenysége drasztikusan lecsökken, ugyanis az (1) egyenlet alapján látható, hogy a mért dózisteljesítmény a távolság négyzetével fordítottan arányos. Emiatt egy nagy aktivitású árnyékolt forrást már nem képes kimutatni a detektor. Amennyiben a drón a sugárforrás közelébe repül és belép annak nagy dózisterébe, akkor megnő annak a valószínűsége, hogy a drón irányíthatatlanná válik. Ekkor a drón gyakorlatilag bárhova zuhanhat, akár élő személyre, akár magára a forrásra is, ami értelemszerűen nagy veszélyforrás, a teszteleseknél, bemutatóknál emiatt szükséges a forrás megfelelő védelme. A 2/2022 (IV.29.) OAH rendelet 41.§ értelmében:

„(3) A radioaktív sugárforrás zártságát veszélyeztetni (nem rendeltetésszerű mechanikai behatással, hevítéssel, és egyéb módokon) tilos.”

Például egy 40 MBq-es árnyékolatlan  $^{137}\text{Cs}$  forrás dózisteljesítménye 5 m távolságban a természetes háttér értékkel megegyező, vagyis 0,12  $\mu\text{Sv/h}$ . Ha ugyanezt a forrást 10

cm-re tudnánk megmérni a mért érték a következő lenne:  $305 \mu\text{Sv/h}$ . A számokból látható, hogy az emelkedés igen szignifikáns, nagyjából 2541-szer magasabb érték mérhető 10 cm-ről (5. ábra) [11].

5. ábra: Sugárforrás várhatóan mérhető dózisteljesítménye, [11]

Az ADR (közúti veszélyesanyag szállítási kódex) értelmében a nagy aktivitású forrásokat árnyékolt sugárforrás tartóban kell szállítani. III-as értékű, sárga bárcát (ADR szerinti sugárveszélyt jelző tábla) kell a sugárforrás tartóra felhelyezni, ebben az esetben a tartó felületi dózisteljesítménye maximálisan  $2 \text{ mSv/h}$  lehet. Amennyiben egy nagy aktivitású ( $A=19 \text{ GBq}$ )  $^{60}\text{Co}$  sugárforrást szállítanak  $10 \text{ cm}$  vastagságú ólom konténerben, akkor annak felületi dózisteljesítménye épp a maximálisan megengedett  $2 \text{ mSv/h}$ .

A bűnügyi szcenárió értelmében, ha a forrás egy baleset vagy rablás során kikerül a környezetbe, akkor a felderítésnél annyi tudható, hogy a forrás maximális felületi dózisteljesítménye  $2 \text{ mSv/h}$ . A számítást a Radpro kalkulátorral elvégezve  $5 \text{ m}$  távolságban a forrás dózisteljesítmény járuléka  $0,94 \mu\text{Sv/h}$ , azaz a természetes háttér nagyjából 9-szerese. Ebben az esetben a drónra közvetlenül felszerelt detektorral egyértelműen kimutatható a sugárforrás jelenléte. Ugyanakkor amennyiben a drón erdős terület felett repül, akkor pl.  $15 \text{ m}$  repülési magasságon a drón által mért dózisteljesítmény a háttérrel megegyező érték kb.  $0,1 \mu\text{Sv/h}$  és ekkor már nem kimutatható a sugárforrás.

Ugyanezt a számítást elvégezve II-es sárga bárcára, ahol a maximálisan megengedett felületi dózisteljesítmény  $0,5 \text{ mSv/h}$  látható, hogy ekkor ugyanebben a forrástartóban maximum  $4771 \text{ MBq}$   $^{60}\text{Co}$  forrás szállítható. Ennek a forrásnak árnyékolással együtt  $5 \text{ m}$  távolságban a dózisteljesítmény járuléka  $0,24 \mu\text{Sv/h}$ , azaz kb. a háttér 2-szerese. Ebben az esetben már igen nehéz egyértelműen kimutatni a sugárforrást, mivel a példában feltételezzük, hogy a drón pont a sugárforrás felett halad el kis sebességgel. Nagyobb sebesség esetén pásztázó üzemmódban, amikor a két repülési pont távolsága  $10 \text{ m}$  és a sugárforrás épp a két

elhaladási útvonal közé esik (5 m) akkor a tényleges forrás-detektor távolság 7 m. Ekkor a mért dózisteljesítmény  $0,12 \mu\text{Sv/h}$ , azaz a természetes háttér érték.

A fenti példából látható, hogy a közvetlen drónra szerelt dózisteljesítmény mérővel csak a legnagyobb aktivitású sugárforrások észlelhetőek.

Az általunk tervezett fejlesztésben a drónt olyan dózisteljesítmény mérővel kívánjuk ellátni, ami nincs a drónra rögzítve, hanem repülés közben leereszthető egy csörlő segítségével, így a fent említett sugárvédelmi problémák kiküszöbölhetőek és ezáltal a drón tényleges bevetethetősége, használhatósága megnő (6. ábra).



6. ábra: Drónról leereszthető mérőeszköz, illusztráció, (saját szerkesztés MI felhasználásával)

### A felderítő drónra szerelt mérőeszközök tesztelése:

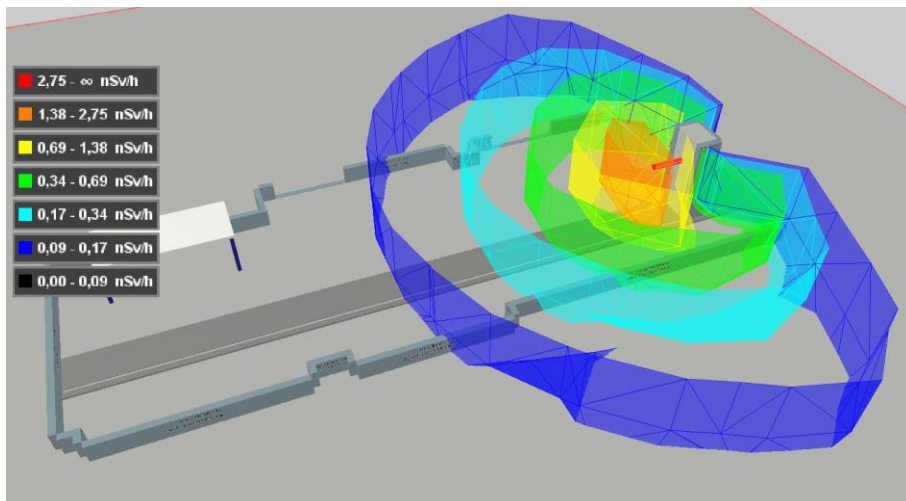
A korábbi drónos felderítési tapasztalatokból láthattuk, hogy a fejlesztők sokszor kihagyják a mérőeszközök tesztelését. A mérőeszközök sokszor egyénileg fejlesztett eszközök. Amennyiben a tesztelés hiánya miatt nem ismert a mérőeszköz mérési tartománya, úgy könnyen előfordulhat, hogy a drón a sugárforrás felett repül el nagy dózisteljesítményű térben, akkor a készülék méréshatárát túllépheti a mérendő dózisteljesítmény szint. Ekkor a szonda nem a megfelelő értéket jelzi, hanem az emelkedett háttérrel. Ebben az esetben a forrástól távolodva pl. egy körgyűrűn a szonda már bejelez, de több hamis jelzést ad. Ilyenkor a földi felderítő nem egy nagy sugárforrást észlel, amit kellene a valóságban, hanem attól távol több mérési pontban azt a következtetést lehet levonni, hogy több kisebb sugárforrás van kb. körgyűrű szerűen szétszóródva az adott felderítési zónában.

Az általunk a drón fedélzetére szánt dózisteljesítménymérő GM szondát az EK SBL tesztlaboratóriumában teszteltük. A tesztekben három fő mérési tulajdonságra koncentráltunk:

- A mérőeszköz mérési pontossága alacsony dózisteljesítményű terek esetén
- A mérőeszköz mérési dinamikájának vizsgálata

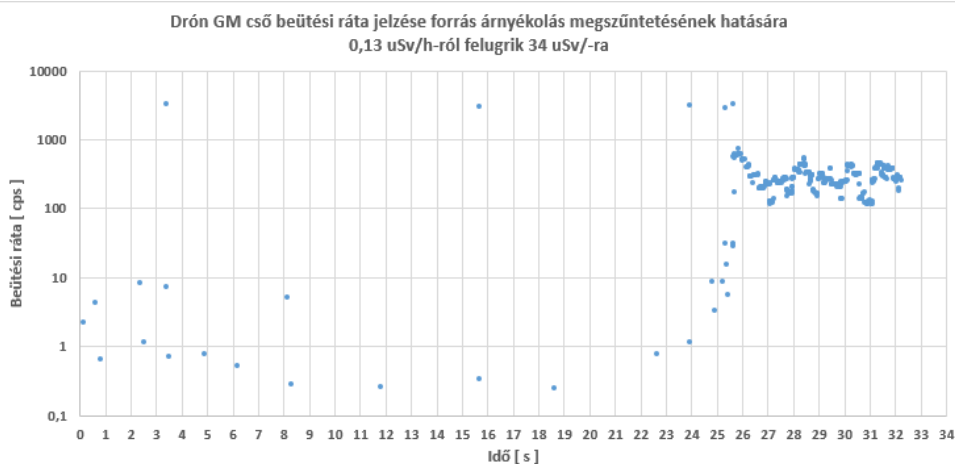
- A dózisteljesítmény mérő reakciója hirtelen dózisteljesítmény növekedés esetén
- Ismételt mérési tesztek.

Amennyiben egy pontszerű, árnyékolatlan sugárforrás dózisterébe lép a drón, akkor az (1)-es egyenlet értelmében a dózisteljesítmény lassan, majd egyre gyorsabban kezd el emelkedni (7. ábra).



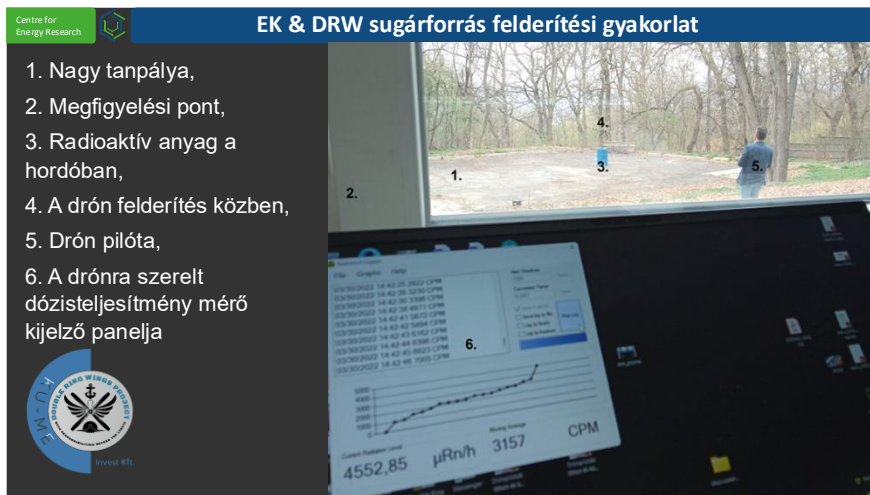
7. ábra: Pontszerű sugárforrás dózisteljesítmény tere, (saját szerkesztés)

Fontos tisztában lenni a mérőeszköz érzékenységeivel, vagyis a kis dózisteljesítményű terek mérési képességeiről. Tesztjeinkben megvizsgáltuk a fedélzetre tervezett mérőeszköz mérési képességét. Például az adott sugárforrás árnyékolását megszüntettük, így a készüléket a természetes háttérhez képest 261-szer magasabb dózisteljesítménynek tettük ki. A természetes háttérrel a 8. ábrán is láthatóan igen nagy szórással méri a készülék. Emiatt kis dózisteljesítményt létrehozó kis aktivitású vagy nagy aktivitású, de megfelelően árnyékolott sugárforrások keresésére nem alkalmas. Ugyanakkor a hirtelen dózisteljesítmény növekedésre megfelelően reagál a detektor, és emellett nagyságrendben is megfelelően mér a mérőeszköz.



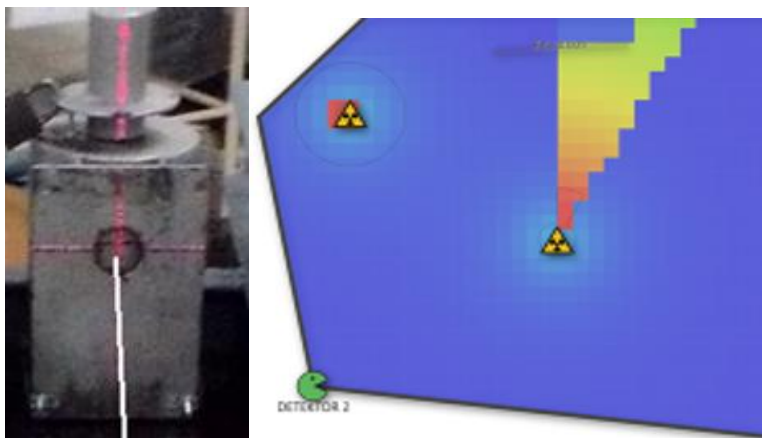
8. ábra: A drónra szerelt dózisteljesítmény mérő teszt eredményei, (saját szerkesztés)

A fejlesztett drón dózisteljesítmény növekedés-csökkenés dinamikáját is megvizsgáltuk. A lassan reagáló eszköz nem használható, vagy csak igen korlátozottan alkalmazható felderítésre, mivel a drón felderítés közben eleve alacsony sebességgel mozog. Ilyen esetben a mérőeszköz dózistérbe lépésekor nem mér, ezért nem tudja kimutatni a radioaktív anyag jelenlétét. A teszt során a HUN-REN EK nagy tanpályáján egy hordóba helyeztük a sugárforrást. A drónt a forrás felett reptettük és a kijelzett értékek alapján megfigyeltük a mért dózisteljesítmény időbeli változását. A drón sugárforrás közelébe érésekor a dózisteljesítmény azonnal elkezdett emelkedni, és a forrást elhagyva már másodpercek alatt a mért érték a természetes háttér értékre tér vissza. Így elmondható, hogy a detektor megfelelt a dinamikus teszt elvárásainak (lásd 9. ábra).



9. ábra: A drónra szerelt dózisteljesítmény mérő tesztelése, (saját szerkesztés)

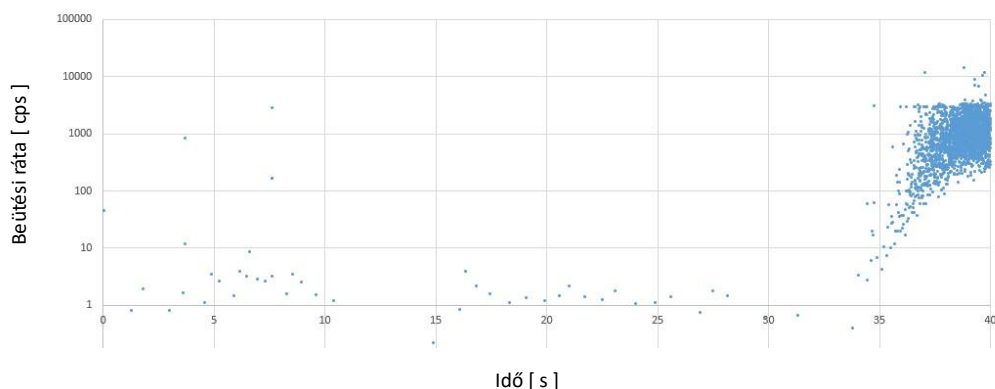
Előfordulhat olyan scenárió, hogy egy nagy aktivitású sugárforrás a forrástartóban marad, azonban annak mechanikája nem a zárt pozícióban helyezkedik el, hanem a sugárforrás kivezérelt állapotban tartózkodik. Így egy nyaláb irányú nagy dózisteljesítményű tér jön létre, és a nyalábon kívül a dózisteljesítmény természetes háttér értékű (10. ábra).



10. ábra: Részlegesen árnyékolt radioaktív sugárforrás dózisteljesítmény tere, (saját szerkesztés)

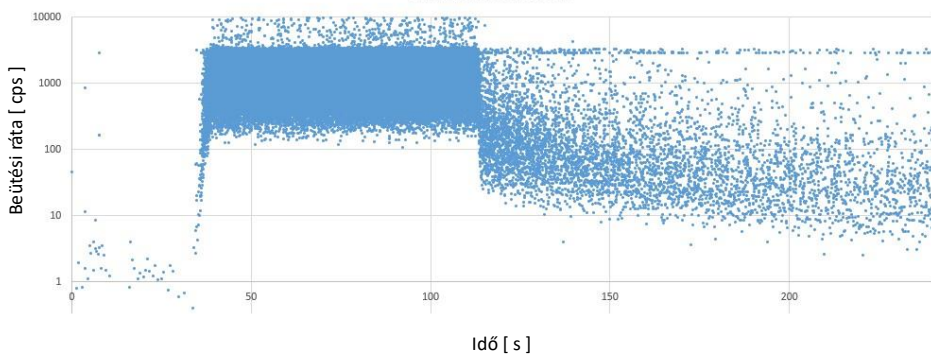
Ilyen esetben a drónos felderítés során a dózisteljesítmény mérőkészülék beléphet a nagy dózisteljesítményű térbe. Ilyen esetben a dózisteljesítmény magasabb volt, mint a készülék kimutatási határa, illetve a hirtelen növekedést nem tudta a mérőeszköz megfelelően kezelni. Így természetes háttér értéket jelzett, míg a forrástól távolabbi mérési pontokon pedig bejelezett a készülék. Ez megtévesztheti a földi megfigyelőket.

A fenti esetet szimulálva a HUN-REN EK Teszt Laboratóriumában végeztünk tesztek, melyek során a természetes háttér értékét hirtelen megemeltük 1 mSv/h értékre és megvizsgáltuk a mérőeszköz detektáló képességét (11. ábra). Itt megjegyzendő, hogy bizonyos GM szondáknak van olyan tulajdonsága, miszerint túlterhelés esetén a készülék a természetes háttérre jelzi, ami szintén megtévesztheti az operátort.



11. ábra: A drónra szerelt dózisteljesítmény mérő túlterhelése, (saját szerkesztés)

A többszörös mérési teszt során a sugárforrást leárnyéktoltuk és megvizsgáltuk, milyen gyorsan áll vissza a detektor a háttér értékre (12. ábra).



12. ábra: A dózisteljesítmény mérő mért értékei a sugárforrás leárnnyékolását követően, (saját szerkesztés)

A 12. ábra alapján látható, amennyiben a drón megtalálja a nagy dózisteljesítményű sugárforrást, és elhalad a tér felett, akkor a készüléknek szükséges pár perc, mire visszaáll a természetes háttér érték jelzésére.

Megállapítható, hogy a drón fedélzetére tervezett GM szonda korlátozottan megfelel a felderítési elvárásoknak, azaz csak nagy dózisteljesítmény mérésére alkalmas és relaxációja időbe telik. Egy ilyen GM szonda olyan olcsóbb felderítő drónokra lehet ideális, amivel megvizsgálható, hogy az adott területen van-e nagy dózisteljesítményű zóna.

### A DoziMobil mérőrendszer:

A HUN-REN EK által kifejlesztett DoziMobil rendszer is felszerelhető a drónra. Ez a készülék képes online továbbítani a mért jeleket és az értékek megjeleníthetők egy térképen (13. ábra).



13. ábra: A HUN-REN EK által fejlesztett „DoziMobil” dózisteljesítmény térkép megjelenítésre alkalmas felderítő mérőeszköze, (saját szerkesztés)

## DRÓN PILÓTÁK OKTATÁSA A VIRTUÁLIS SUGÁRFORRÁS RENDSZER SEGÍTSÉGÉVEL

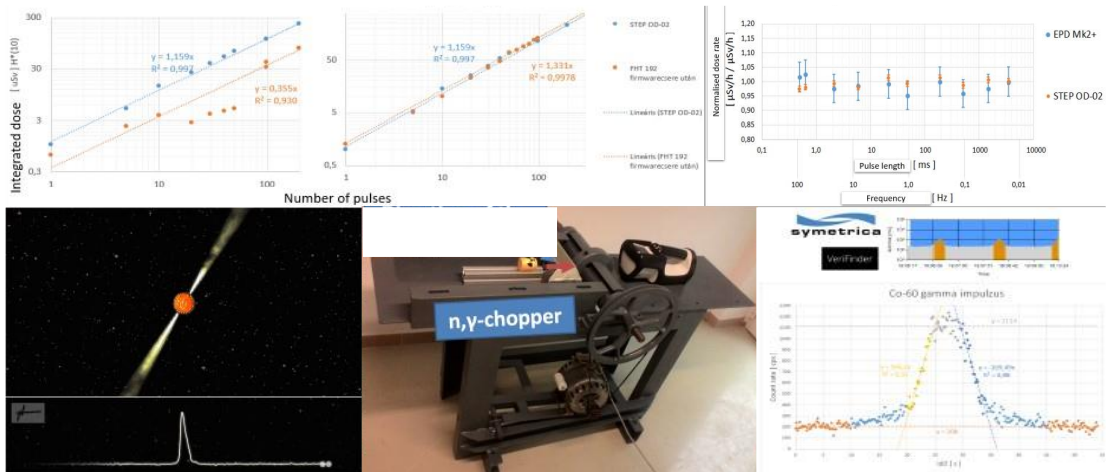
A HUN-REN EK SBL-ben kifejlesztettünk egy ún. virtuális sugárforrás rendszert, mely egy adó-vevő egységből áll és képes a radioaktív sugárforrás-dózisteljesítményt mérő mérőeszköz valósághű szimulálására. A rendszer folyamatosan méri az adó (virtuális forrás)-vevő (virtuális dózisteljesítménymérő készülék) közötti távolságot, és az (1)-es egyenlet alapján másodpercenként kiszámolja a virtuális dózisteljesítmény értékét, a beprogramozott nuklid aktivitása alapján. A rendszer valósághűen imitálja a sugárforrást és a dózisteljesítmény mérő készüléket, ugyanakkor teljesen biztonságos. Ezért a drónpilóta-képzésben is felhasználható a rendszer (14. ábra).



14. ábra: A virtuális radioaktív rendszer „dózisteljesítmény mérő” egysége, (saját szerkesztés)

## DÓZISTELJESÍTMÉNY MÉRÉS PULZÁLT TEREKBE DRÓN SEGÍTSÉGÉVEL

Speciális részecskegyorsítók esetén felmerült az igény (MonRob: Radiation Monitoring based on a ROBot Fleet), hogy a gyorsítási folyamat során keletkező pulzált tereket mérni lehessen drónra szerelt speciális mérőeszközzel. A HUN-REN EK SBL tesztlaboratóriumában kifejlesztésre került egy ún. Gamma-chopper, mely segítségével lehetséges detektor tesztek elvégzési ismert pulzált térben (15. ábra).



15. ábra: A HUN-REN EK által fejlesztett Gamma-chopper, (saját szerkesztés)

Az eddigi tesztek alapján a STEP OD-02 kézi műszer alkalmas pulzált terekben való mérésre, ezen eszköz felszerelhető a HUN-REN EK-DRW drónjára (16., 17. ábra).

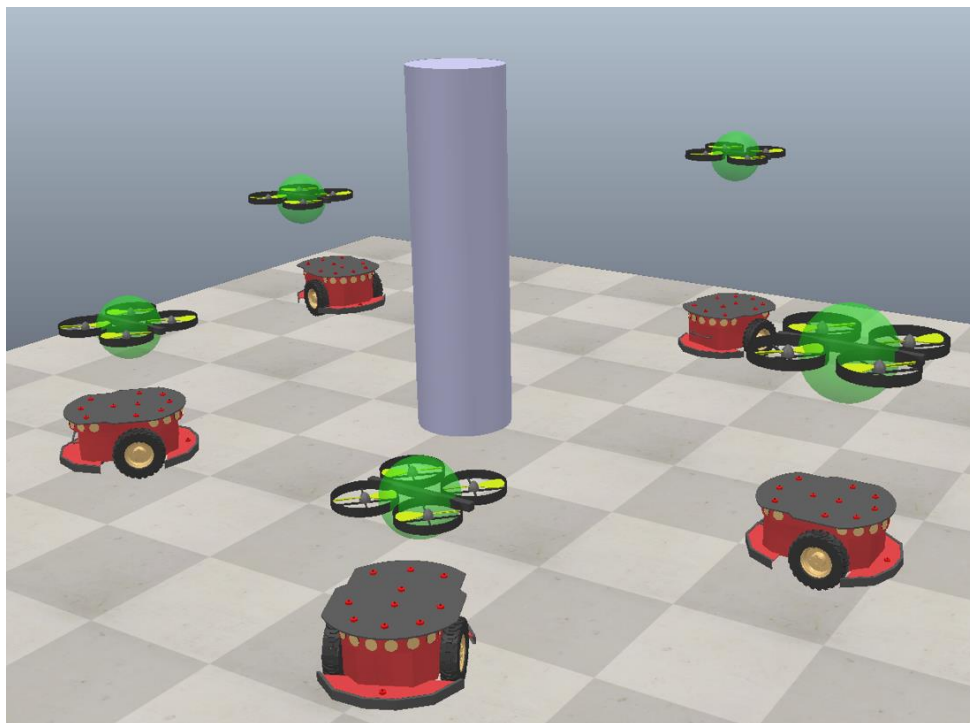


16. ábra: A HUN-REN EK és a DRW által fejlesztett drón, (saját szerkesztés)



17. ábra: A pulzált terek mérésére alkalmas STEP OD-02 kézi mérőeszköz, (saját szerkesztés)

A gyorsító berendezések közelében a töltött részecskegyorsítás során nagy elektromágneses impulzus (EMP) keletkezik, ami a drón elektronikáját és ezáltal az irányíthatóságát is megzavarhatja. Ezen hatás miatt fontos, hogy az általunk fejlesztett drón és a mérőeszköz nincs egybe építve. A részecskegyorsító besugárzó termében a besugárzás alatt szelvényzet nem tartózkodhat, így a drón irányítását a besugárzó termen kívülről kell megoldani. Ez kivitelezhető a besugárzó terem irányító szobájából, mivel a pilóta a teremben lévő megfigyelő kamerák és a drónra szerelt kameraképek segítségével tud tájékozódni. A drónt a besugárzó terem belépési pontjánál elhelyezett adó segítségével lehet távirányítani. A készülék a nagy prompt dózistér és EMP miatt nem repülhet közvetlen a besugárzó kamerák közelében (18. ábra).



18. ábra: A pulzált terek mérésére robotok által, a részecskegyorsító besugárzó termében, illusztráció, (saját szerkesztés)

### A VESZÉLY TERMÉSZETÉNEK MEGHATÁROZÁSA UGV ÉS UAV ALKALMAZÁSÁVAL

A módszerek célja kifejezetten olyan komponensek alkalmazásán alapul, amelyek használata együttes üzemeltetésük nélkül is rutinszerű a speciális rendvédelmi szervek esetében. Együttes használatuk azonban új távlatot nyit meg rendvédelmi célú felhasználásuk során.

Egy előzetes felderítés, művelet közbeni monitorozás, vagy bűnügyi, katasztrófavédelmi összefüggésű sugárzóanyag felkutatása során fontos annak ismerete, hogy a potenciális veszély természetes (NORM), ipari, orvosi, esetleg nukleáris felhasználásra alkalmas sugárforrásból származik. Ennek közelítő meghatározása, illetve a hozzá kapcsolódó dózisteljesítmény becslése alapvetően meghatározhatja a speciális egységek beavatkozásának taktikáját.

A dózisteljesítmény becslésére, meghatározására azért van szükség, hogy nagy biztonsággal meghatározható legyen egy művelet során a forrás közelében eltölthető idő, a biztonságos terület határa, a kitett terület és az esetleges szennyezett zóna mérete. Ez a feladat végrehajtható talajról és levegőből egyaránt. Mindkét esetben van lehetőség olyan detektor, vagy detektor kombináció alkalmazására, amely(ek) a hiteles dózis/dózisteljesítmény becslésére, illetve a forrás kategorizálására is alkalmasak. Ebben az esetben olyan UGV átalakítást teszteltünk, amelyhez Thermo Scientific FH-40-hez csatlakoztatott külső környezeti dózismérő szondát alkalmaztunk egy FLIR First Look UGV-re rögzítve. A külső

szondát 1 m magasságban rögzítettük egy 3D nyomtatott állvány segítségével, valamint a műszer kijelzőjét analóg kameraképen továbbítottuk távolra az UGV kezelőhöz minimális késleltetéssel. Az UGV ugyan kis méretű, de lehetőség nyílt még egy spektrometriás képességű, CsI detektort használó Kromek D3S műszer elhelyezésére is a potenciális veszélyt jelentő sugárzóanyag kategorizálása, valamint többszörös gázérzékelő műszer csatlakozására a levegő általános minőségének monitorozása érdekében ( $O_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ , robbanásveszélyes gázok,  $Cl_2$ , stb.).

Ez esetben lehetőség nyílik az UGV-vel előzetes felderítésre, illetve az adott művelet során telepítve alkalmazva a környezet folyamatos monitorozására egyaránt (19. ábra).



19. ábra: Az UGV-re rögzített detektor és az analóg jelátvitel, (saját szerkesztés)

Az UAV alkalmazása esetében fontos volt letesztelni a detektort dinamikus környezetben (mozgás során), szimulált, laboratóriumi környezetben, illetve terepi viszonyok között (20. ábra). A rotorszél által keltett por felkavarodása, ezáltal az ideális reptetési magasság megállapítása szintén fontos szempont volt a tesztek során annak érdekében, hogy a repülés során felmerülő kockázati tényezőket valós körülmények között határozhassuk meg.

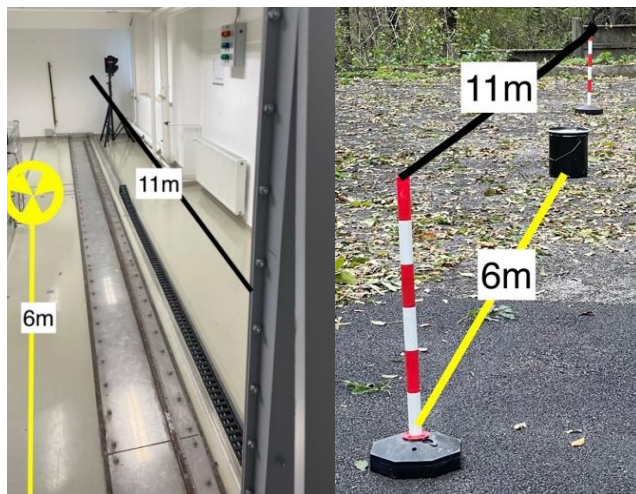


20. ábra: Az UAV-ok tesztelése során (saját szerkesztés)

A laboratóriumi környezetet a HUN-REN EK SBL tesztelő laboratóriuma (TESZLA) biztosította (21. ábra). A TESZLA segítségével szimulálni lehetett az UAV egyenletes mozgását vonalpályán úgy, hogy a dinamikus pálya mozgó részén különböző magasságokba került rögzítésre a Kromek D3S detektora, a sugárforrást pedig a pálya közepére helyeztük.

A mérések alátámasztották a detektor érzékenységét, de a riasztási algoritmus miatt a riasztási esemény tovább megmaradt az eszközben, így egy elnyújtott dózisteljesítmény-idő görbét kaptunk. Az UAV-ra rögzített detektor esetében a modellezett paramétereket ismételtük meg terepi környezetben, több reptetési magasságban, amely tesztek során a laboratóriumi eredményekkel összhangban lévő eredményeket kaptunk.

Mind az UGV, mind az UAV integráció sok fejlesztési lehetőséget biztosít a későbbi felderítő munka támogatására. Ilyen fejlesztési irányok lehetnek: a detektor és a „hordozó” eszköz informatikai integrálása a koncentrált adattovábbítás érdekében, a geolokációs adatok és a detektorok mért értékeinek összefűzött kezelése a valós idejű, illetve a megismételhető mérések, detektálások kivitelezése érdekében.



21. ábra: A dinamikus tanpálya (TESZLA) és az UAV tesztpálya ábrázolása, (saját szerkesztés)

## DEKONTAMINÁLÓ DRÓN ALKALMAZÁSI LEHETŐSÉGE

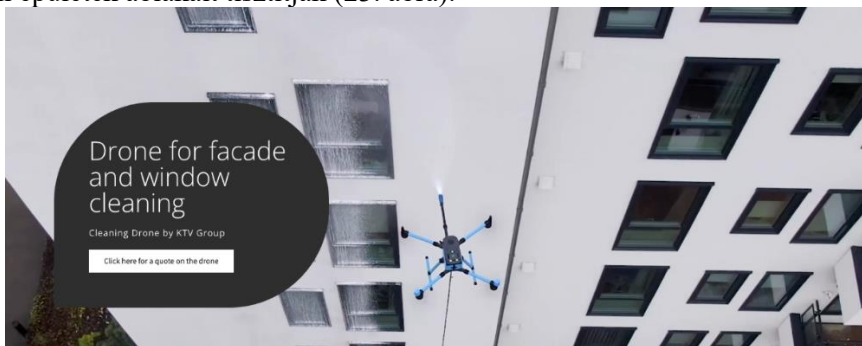
Egy piszkos bomba felrobbanását követően, vagy egy nukleáris baleset következményeként kiterjedt terület szennyeződhet el radioaktív anyaggal. A felületekre kitapadt szennyezés mentesítése sokszor időigényes feladat. Emiatt a dekontaminátorok a dekontamináláskor sok időt töltenek közel a radioaktívan szennyezett területhez (22. ábra). A sugárvédelem ALARA alapelve értelmében a külső sugárterhelés csökkenthető a távolság-idő-árnyékolás védelem alkalmazásával. A dekontaminálás során mindenképp a helyszínen kell tartózkodni, mivel a kézi permetezőből csak így lehet a dekontamináló folyadékot a szennyezett felületre juttatni. A dekontaminálással nem lehet sietni, mert a terep nehezen járható és a dekontamináló felszerelés súlya is nagy. Emiatt az ólomárnyékolás sem jöhet szóba, mert hosszabb használat esetén a beavatkozó elfáradhat, ami ergonómiai szempontból nem kívánatos. A dekontamináló folyadék permetezése azért fontos, mert egyrészt így

a felület szennyezettsége csökkenthető, másrészt a folyadék megköti a radioaktív részecskéket és így a kicsapódás mértéke jelentősen csökken. Ezáltal a környezet további elszennyeződése és az élőlények, emberek inkorporációja minimalizálható.



22. ábra: Dekontaminátor Csernobilban, [12]

Jelenleg nemzetközi szinten nincs dekontaminációra alkalmas drón, pedig a fent említett tényezők miatt sugárvédelmi szempontból jelentősen növelhető lenne a külső dózisterhelés csökkentése, amivel egyben kiküszöbölhető lenne élő személy alkalmazása is a tevékenység elvégzésére. Azonban az alpin technikában alkalmaznak drónokat, melyekkel általában épületek ablakait tisztítják (23. ábra).



23. ábra: Épülethomlokzat tisztítására használt drón, [13]

A fenti ábrán látható takarító drón jó kiindulási alap lehet. Azonban a radiológiai felderítésnél a drón nem mehet a szennyezett felülethez közel, mivel:

- a drón jelentősen elszennyeződhet

- a drón által keltett légörvény felkavarja a szennyezést és széthordja azt.

A dekontaminálás folyamata a drón megfelelő átalakításával, a permetezőcső meghosszabbításával és a drón kiegyensúlyozásával, ezt követően pedig egy külsős akkreditált szervezet által hitelesített tanúsítvánnyal biztonságosan és hatékonyan elvégezhető.

## A PISZKOS DRÓN IMITÁLÁSA

A drónokat széles körben alkalmazzák háborús helyzetben. Ezért sajnos nem kizárható, hogy egy drónra radioaktív anyagot tartalmazó bombát szerelnek (piszkos drón – dirty drone), melyet a kívánt területre irányítanak és ott vagy becsapódik, vagy felrobbantják. Így távolról lehet piszkos bombamerényletet elkövetni. A HUN-REN EK egy ilyen eseményt képes szimulálni a virtuális radioaktív rendszer segítségével, mely során a drónt egy kiválasztott helyszínre irányítva robbanást lehet imitálni, majd a virtuális rendszert élesítve felületi szennyezettséget lehet imitálni. A kivonuló egységek a virtuális felületi szennyezettség mérő segítségével valósághűen tudják begyakorolni a terület felderítését és annak dekontaminálását.

## ÖSSZEFOGLALÓ

A HUN-REN EK SBL számos más feladata mellett a radioaktív anyagok felderítésével is foglalkozik. Az eljárásrend megalkotása és a forráskeresési bemutatók során felmerült az igény, hogy az elsődleges felderítést drónra szerelt speciális mérőeszközökkel kelene megoldani. Ugyanakkor ilyen speciális drón akkoriban nem állt rendelkezésre.

A dróntechnológia az elmúlt években jelentősen fejlődött, jelenleg is elérhetőek már sugárforrás-felderítésére alkalmas mérőeszközökkel ellátott drónok. Megjegyzendő, hogy a mérőeszközöket a drónokhoz illesztik, emiatt ezen kialakítás jelentősen limitálja ezen eszközök tényleges bevethetőségét egy elveszett forrás felkutatásához, mivel a forrás nyílnak minősül, illetve dózistere ismeretlen. Ezért csak egy minimum limitált magasságban repülhetnek a drónok, így megakadályozható a forrás szétfújása a drón által. Valamint elkerülhető a dózistér hirtelen emelkedéséből adódó esetleges irányíthatatlanság. A limitált magasságban történő felderítés miatt ezen rendszerek detektáló képessége jelentősen romolhat, így csak a nagyobb magasságban is jelt adó sugárforrások felderítésére alkalmasak.

A HUN-REN EK és a DRW közös drónfejlesztésénél a felderítés során a sugárvédelmi szempontokat is figyelembe vettük. A mérőeszköz a drónról egy speciális kábelen leengedhető, így a jelenlegi limitáló tényezők megszűntek, valamint jelentősen növelhető a drónos sugárforrás mérési érzékenysége. A fedélzetre szerelt dózisteljesítmény-mérő mérőeszközöket alapos teszteknek vettettük alá, így meg tudunk bizonyosodni, hogy a mérőrendszer minden speciális esetben képes-e megfelelően mérni a jeleket, ezáltal a földi megfigyelők helyes következtetéseket vonhatnak le. A jelenleg drónra szerelt dózisteljesítmény-mérő eszköz használhatósága limitált, de nagy dózisteljesítményű terek felkutatására alkalmas. Egy érzékenyebb detektor használatával kisebb dózisteljesítmények mérése is megoldható.

A drónra speciális pulzált tér mérésére alkalmas tesztelt mérőeszközt szerelve, a részecskegyorsítás során kialakuló prompt dózistér is mérhetővé válik a besugárzó termeken belül, anélkül, hogy a drónt veszélyeztetné a magas EMP és prompt dózistér elektronikára gyakorolt hatása. A jelenleg elérhető épülethomlokzat-takarító drónok sugárvédelmi szempontú átalakításával, továbbfejlesztésével hatékonyan, biztonságosabban elvégezhető

a dekontaminálás folyamata. A HUN-REN EK által fejlesztett radioaktív anyagot, szennyezettséget imitáló virtuális rendszer segítségével a drónpilóta-képzés kiegészíthető kifejezetten radioaktív anyagok keresésére, valamint a piszkos drón által okozott felületi szennyezettség detektálása és annak dekontaminálása is begyakorolhatóvá válik.

## IRODALOM

- [1] W. Kluwer, „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”, *Jogtár*, Jun. 29, 2022. [Online]. Elérhető: <https://net.jogtar.hu/jogszabaly?docid=a1500490.kor>
- [2] É. Kovács-Széles et al., „How to respond a crime scene contaminated with radioactive material?”, *Belügyi Szemle, Special Issue 3, 2020*, doi: 10.38146/BSZ.SPEC.2020.3.3
- [3] Cs. Varga, „Az FBI és az Interpol is emeli kalapját a magyar helyszínelők előtt”, *Index*, Apr. 15, 2022. [Online]. Elérhető: <https://index.hu/belfold/2022/04/15/fbi-interpol-magyar-helyszinelok-becs-nemzetkozi-konferencia-sugarzo-anyagok/>
- [4] A. Miklya, „Sugárzásveszély”, *Kékfény*, Jan. 10, 2022. [Online]. Elérhető: <https://www.youtube.com/watch?v=vbNwCNtQpmQ&t=1s>
- [5] INCLUDING H2020 Project, „INCLUDING Project Exercise in Budapest”, *Including website*, June 16, 2022. [Online]. Elérhető: <https://www.including-h2020.eu/movies/48-including-project-exercise-in-budapest-june-2022.html>
- [6] CAEN, „GAMON-Drone”, *CAEN website*, Jan. 15, 2021. [Online]. Elérhető: <https://www.caen.it/products/gamon-drone/>
- [7] Go2fly website, „Drónos szenzor segítheti a radioaktív sugárzás észlelését”, *Dróntechnológiai – Hírek*, Nov. 7, 2022. [Online]. Elérhető: <https://go2fly.hu/dronos-szenzor-segitheti-a-radioaktiv-sugarzas-eszleleset/>
- [8] W. Kluwer, „3/2022 (IV. 29.) OAH rendelet a radioaktív anyagok nyilvántartásának és ellenőrzésének rendjéről, valamint a kapcsolódó adatszolgáltatásról”, *Jogtár*, May 1, 2022. [Online]. Elérhető: <https://net.jogtar.hu/jogszabaly?docid=A2200003.OAH&txtreferer=00000001.txt>
- [9] W. Kluwer, „190/2011. (IX. 19.) Korm. rendelet az atomenergia alkalmazása körében a fizikai védelemről és a kapcsolódó engedélyezési, jelentési és ellenőrzési rendszerről”, *Jogtár*, July 1, 2022. [Online]. Elérhető: <https://net.jogtar.hu/jogszabaly?docid=a1100190.kor>
- [10] W. Kluwer, „2/2022. (IV. 29.) OAH rendelet az ionizáló sugárzás elleni védelemről és a kapcsolódó engedélyezési, jelentési és ellenőrzési rendszerről”, *Jogtár*, Dec. 11, 2024. [Online]. Elérhető: <https://net.jogtar.hu/jogszabaly?docid=A2200002.OAH&txtreferer=00000001.txt>
- [11] Radpro, „Gamma Emitter Point Source Dose-Rate to Activity and Shielding Calculations (In Air)” *Radpro calculator website*, Aug. 14, 2026. [Online]. Elérhető: <http://www.radprocalculator.com/Gamma.aspx>
- [12] A. Bendix, „HBO’s ‘Chernobyl’ just won 10 Emmys – here’s what it gets right (and wrong) about the world’s worst nuclear power plant accident”, *Business Insider*, Sep. 23, 2019. [Online]. Elérhető: <https://www.businessinsider.com/chernobyl-hbo-whats-true-myths-2019-5>

- [13] KTgroup, „Cleaning drone ready for sale”, *KTgroup website*, Oct. 14, 2021. [Online]. Elérhető: <https://ktvgroup.no/en/cleaning-drone-ready-for-sale/>
- [14] K. Bodor and P. Zagyvai, „Lost radioactive source exploration training capabilities at the Centre for Energy Research (EK)”, *Biztonságtudományi Szemle*, vol. 4, no. 4., pp. 81-96, 2022. [Online], Elérhető: <https://biztonsagtudomanyi.szemle.uni-obuda.hu/index.php/home/article/view/252/228>