

Bizonytalanságok értékelése és kezelése a sugárvédelmi környezetellenőrzésben

Jakab Dorottya, Pázmándi Tamás, Zagyvai Péter

HUN
REN



Energiatudományi
Kutatóközpont

Bizonytalanságok értékelése és kezelése a sugárvédelmi környezetellenőrzésben

Bevezetés

Eszközök és módszerek

Eredmények

Bizonytalanságok értékelése és kezelése a sugárvédelmi környezetellenőrzésben

Bevezetés

Eszközök és módszerek

Eredmények

Sugárvédelmi környezetellenőrzés főbb kihívásai

a)

A rövid idejű és gyors változások észlelését, ugyanakkor a radionuklid-szelektív mérések végrehajtását egyidejűleg lehetővé tevő mérési képességek szükségessége

b)

Az eredendően alacsony természetes sugárzási szintek, radionuklid-koncentrációk nyomon követéséhez és a kismértékű szintemelkedések és mesterséges eredetű szennyezések detektálásához szükséges mérési érzékenység, ugyanakkor a baleseti szituációkban lehetséges magas sugárzási szintek és radionuklid-koncentrációk mérésére alkalmas mérési képesség biztosítása

c)

A környezeti sugárzási szintek és a környezeti elemek radionuklid-koncentrációjának időbeli és térbeli változékonysága, heterogenitása miatti jelentős hibák és bizonytalanságok kezelése

Méréskiértékelés jelentősége

A méréskiértékelés a **mérni kívánt fizikai hatásra** (mérési eredmény, y , vagy a mérendő mennyiség *legjobb becslése*, $\hat{y}$, a mérési bizonytalanság, $u(y)$ vagy $u(\hat{y})$, és a lefedettségi tartomány, $[y_{low}, y_{up}]$) és a **mérési eljárásra jellemző mennyiségeket** (döntési határérték, y^* , kimutatási határ, $y^\#$) **számszerűsíti**.



A mérendő mennyiség becslésén keresztül **számszerűsíthető a vizsgálandó fizikai hatás**



A mérési bizonytalanság értékelésével **biztosítható az eredmények érvényessége, összehasonlíthatósága és metrológiai nyomon követhetősége**



A döntési határérték mennyiségén keresztül **igazolható a vizsgálandó fizikai hatás jelenléte**



A kimutatási határ által **ellenőrizhető, hogy a mérési eljárás** megfelel-e a mérendő fizikai hatás kimutatására vonatkozó követelményeknek és **alkalmas-e a mérési cél kiszolgálására**

Gyakorlati nehézségek a méréskiértékelés végrehajtásában

a)

A méréskiértékelési módszereket gyakran

- **nem alkalmazzák** esetleges bonyolultságuk miatt és/vagy
- megfelelőségük értékelése és **alkalmazhatósági feltételei teljesülésének vizsgálata nélkül használják**

b)

A vonatkozó **útmutatók, szabványok** esetenként **nehezen ültethetők át a gyakorlatba**

c)

Az automatikus méréskiértékelés végrehajtását támogató **szoftverek**

- a számítási funkciók ismeretének és megértésének hiányában csak **feketedobozként alkalmazhatók**
- bizonyos funkciók tekintetében **hiányosak, limitáltan használhatók** lehetnek

- A **méréskiértékelési eljárások alkalmazhatósági korlátai jelentkezésének vizsgálata** a legelterjedtebb sugárvédelmi környezeti mérésekben
- Egy átlátható és értelmezhető **méréskiértékelési eljárásrend kidolgozása**, amely kiküszöbölheti az elérhető megoldások esetleges hiányosságait, azok alternatívájaként vagy kiegészítéseként használható, miközben elősegíti a gyakorlati alkalmazást a rutinfelhasználók számára is
- A **környezeti mérések legfőbb bizonytalansági forrásainak azonosítása és számszerűsítése**, amelyek csökkentése révén eredményes javulás érhető el a mérési teljesítményben

Bizonytalanságok értékelése és kezelése a sugárvédelmi környezetellenőrzésben

Bevezetés

Eszközök és módszerek

Eredmények

Az y mérendő mennyiség legtöbbször nem közvetlenül mérhető, hanem az őt befolyásoló x_i bemenő mennyiségekből határozható meg közvetetten egy G mérési modell segítségével: $y = G(x_1, x_2, \dots, x_m)$.

Bizonytalanságterjedésen (LPU) alapuló mérésikiértékelés

$u(y)$ bizonytalanság kifejezése a mérési modell elsőrendű Taylor-soros kifejtésén alapuló közelítéssel:

$$u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^m c_i^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=i+1}^m c_i c_j u(x_i, x_j)}$$

amelyből származtatható a többi jellemző mennyiség.

Eloszlások terjedésén alapuló, MCM-alapú mérésikiértékelés

Véletlenszerű mintavételezés (n_M db) a bemenő mennyiségek hozzárendelt $f_{X_i}(\tilde{x}_i|\mathbf{a}_i)$ valószínűségeloszlásaiból, ezekből a mérési modell alapján számított y_j modellértékek és az y mérendő mennyiségre vonatkozó a posteriori valószínűségi eloszlás származtatható. A jellemző mennyiségek számszerűsítése a kapott $f_Y(\tilde{y}|\mathbf{a})$ eloszlás momentumai és kvantilisei alapján.

$$u(y) = \sqrt{u^2(y)} = \sqrt{\text{Var}(f_Y(\tilde{y}|\mathbf{a}))}$$

$$u(y) = \sqrt{\frac{1}{n_M-1} \cdot \sum_{j=1}^{n_M} (y_j - y)^2}$$

Legelterjedtebb sugárvédelmi környezetellenőrzési mérési problémák méréskiértékelése

→ Eltérő mérési modellek és különböző bemenő paraméterkészletek alkalmazása

Környezeti dózismérések

- Nem-lineáris mérési modell:
$$h = \frac{N_0}{r_{nl} \prod_{q=1}^m r_q} \cdot M - h_{BG}$$
- Linearizált mérési modell:
$$h = N_0 \cdot k_{nl} \prod_{q=1}^m k_q \cdot M - h_{BG}$$

$$k = 1/r$$

- Rendszerjellemzők
 - szabványban (IEC 62387) megengedett határértékek alapján közelítve: $r \in [r_{(-)} \dots r_{(+)}] \rightarrow k = 1/r \in [1/r_{(+)} \dots 1/r_{(-)}] = [k_{(-)} \dots k_{(+)}]$
 - kísérletleg (típusvizsgálat), modellezéssel számszerűsítve
- Mérési, besugárzási körülmények figyelembevétele
 - sugárzás energiájától és irányától való függés
 - háttér dózisdózisjáruléka

→ Különböző kiértékelési eljárásokkal kapott eredmények összevetése



A mérendő mennyiséget és annak bizonytalanságát befolyásoló hatások azonosítása



Bizonytalanság értékelése

- mérési (analitikai) bizonytalanság
- mintavételi bizonytalanság
- modellezési eljárás (LPU, MCM)
- ismételt megfigyelések statisztikai elemzésén (empirikus eljárás) alapuló értékelés



A bizonytalansági hozzájárulások számszerűsítése

$h(y, x_i)$ hozzájárulási együtthatók meghatározása: $h(y, x_i) = \left[\frac{c_i u(x_i)}{u(y)} \right]^2$

c_i érzékenységi együtthatók meghatározása:

- LPU:
 - mérési modell parciális deriválása
 - numerikus differenciáláson alapuló, véges (centrális, haladó, retrográd) differenciák
- MCM:
 - érzékenységvizsgálat

Bizonytalanságok értékelése és kezelése a sugárvédelmi környezetellenőrzésben

Bevezetés

Eszközök és módszerek

Eredmények

Bizonytalanságterjedésen (LPU) alapuló mérésikiértékelés

LPU-alapú eljárások érvényessége:

- **lineáris** vagy linearizált **mérési modelleknél**
- **normális eloszlással** jellemezhető **mérendő mennyiségeknél**

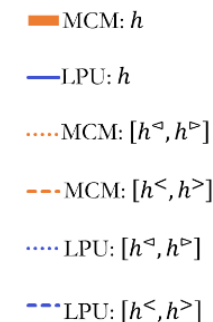
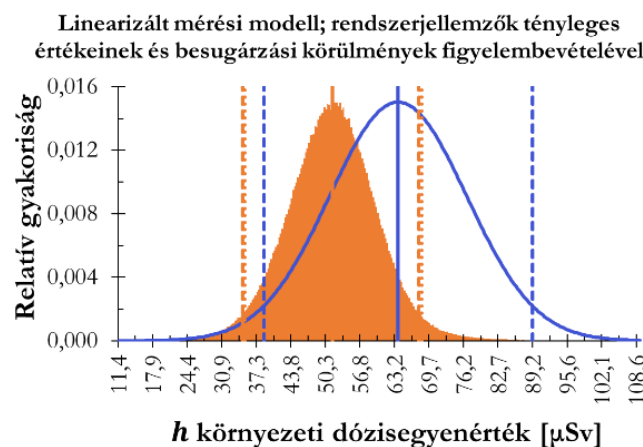
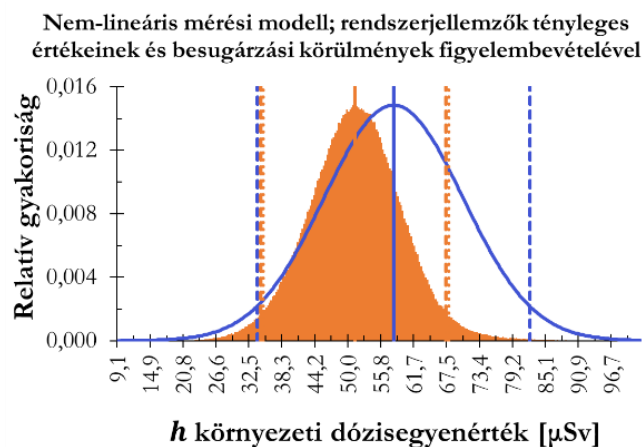
LPU-alapú eljárások alkalmazhatósági korlátai a környezeti mérésekben:

- a **mérési modellek legtöbbször eredendően nem-lineárisak**, linearizációjuk esetenként csak egyszerűsítő feltételezések mellett végezhető el
- a **bemenő mennyiségek** valós mérési körülményekre nézve többször reprezentatívabb **nem-normális**, akár aszimmetrikus, diszkrét **eloszlásai nem vehetők figyelembe**
→ a bemenő és kimenő mennyiségekről és annak valódi eloszlásáról csak korlátozott információ nyújtható

Eloszlások terjedésén alapuló, MCM-alapú mérésikiértékelés

MCM-alapú eljárások érvényessége:

- **valószínűségeloszlás-hozzárendelések megfelelőségétől** függően
- megfelelően **nagy számú ismételt MC kísérletnél**



Bizonytalanságterjedésen (LPU) alapuló mérésikiértékelés

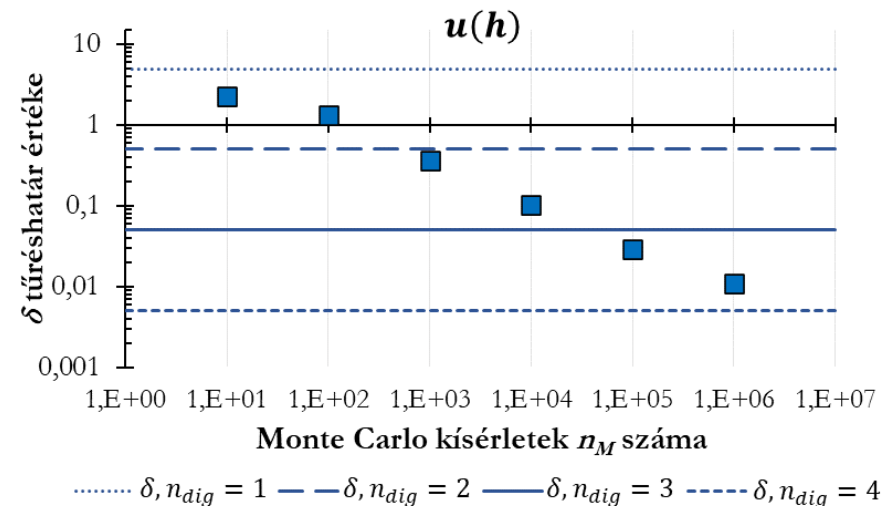
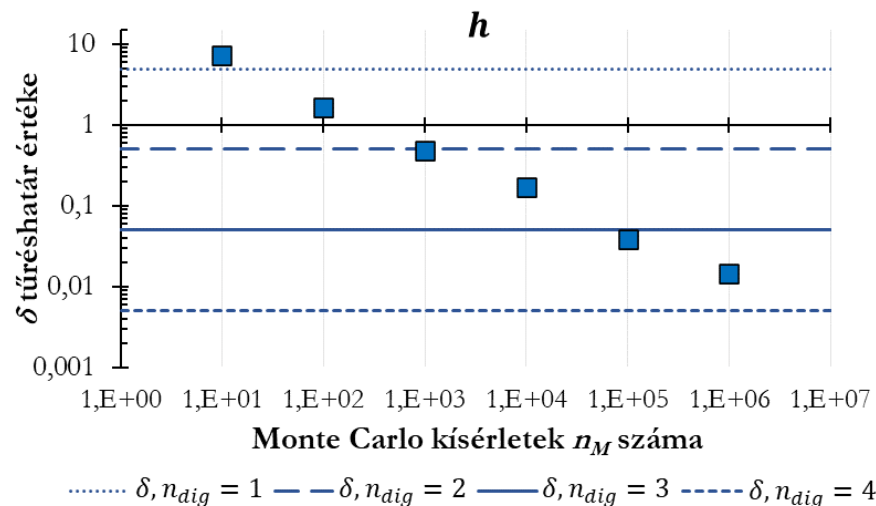
LPU-alapú eljárások alkalmazhatóságának feltétele:

- az y kimenő mennyiséggel nem-lineáris viszonyban álló x_i bemenő mennyiségek relatív bizonytalanságának kellően kis értéke ($u(x_i)/x_i = u_{rel}(x_i) < 10\%$)
- a nem-normális eloszlású x_i bemenő mennyiségeknek az $u^2(y)$ varianciánál lényegesen kisebb $c_i^2 u^2(x_i)$ komponense (kis, nem-domináns $h(y, x_i)$ hozzájárulási együttható)

Eloszlások terjedésén alapuló, MCM-alapú mérésikiértékelés

MCM-alapú eljárások alkalmazhatóságának támogatása:

- a számítási komplexitás és a számításigény csökkentése érdekében a Monte Carlo kísérletek számának a rendelkezésre álló számítási kapacitásokhoz és a numerikus eredmények (jellemző mennyiségek) elérni kívánt pontosságához igazított optimalizálása



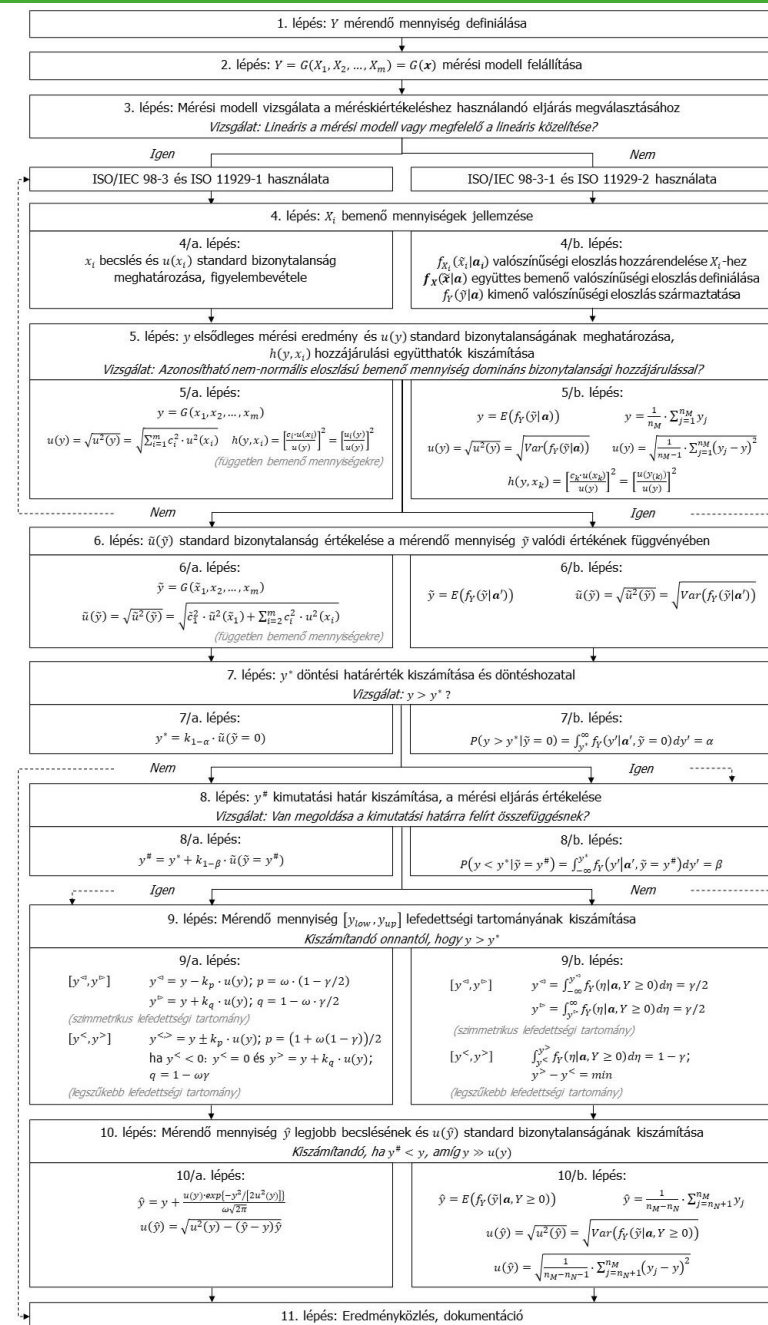


Gyakorlati alkalmazhatóságot támogató méréskiértékelési eljárásrend kidolgozása

- lépésről lépésre (11) történő, **átlátható alkalmazás**
- a **bizonytalanságterjedésen alapuló és az MCM-alapú valószínűségeloszlások-terjedését alkalmazó kiértékelési módszert egyaránt magában foglaló eljárásrend**
- számítási lépések és funkciók tekintetében **kompromisszummentes végrehajtás** az elérhető megoldások esetleges hiányosságainak kompenzálására
- **vizsgálati lépések beiktatása**
 - a **mérési eljárások megfelelőségének ellenőrzésére**
 - a méréskiértékelés szükséges **végrehajtandó lépéseinek és az eredményközlés módjának meghatározására**
- a **legelterjedtebben elérhető, táblázatkezelő szoftverkörnyezetben** (Microsoft Excel), az alapértelmezetten rendelkezésre álló funkciók segítségével **végrehajtható, különösebb programozási ismereteket nem igénylő felhasználás** a gyakorlati alkalmazhatóság támogatására a rutinfelhasználók körében is



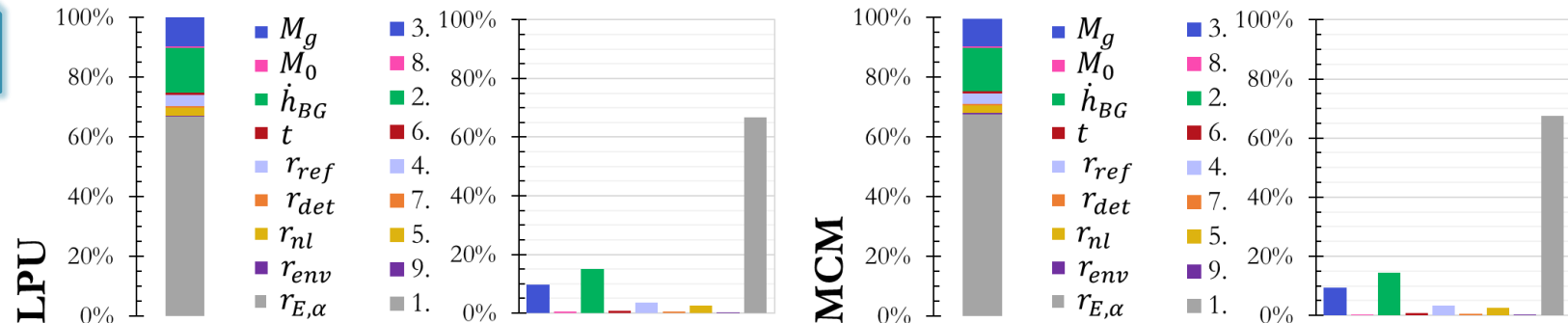
Az egyes lépésekben használható alternatív megoldások vizsgálata



→ Bizonytalansági hozzájárulások meghatározása

- a bizonytalanságterjedési keretrendszer megfelelőségének értékeléséhez
- a legnagyobb hozzájárulású bizonytalansági komponensek azonosításához, amelyek csökkentésével hatásos javulás érhető el a mérési teljesítményben

Környezeti dózismérések



Légekörkihullás-mérések gamma-spektrometriai radioanalízise

- az empirikus eljárással kapott becslés a bizonytalanságnak csak egy részét, a megismételhetőségi összetevőit tartalmazza

Értékelési eljárás	Bizonytalansági forrás	Relatív bizonytalanság (%)			Relatív hozzájárulás a teljes bizonytalansághoz (%)		
		Min.	Max.	Átlag	Min.	Max.	Átlag
Empirikus	Mintavétel	12,6	17,8	15,5	92,1	100	97,0
	Mérési (analitikus)	0,320	5,21	2,29	0,0385	7,92	3,03
	Teljes	12,7	18,5	15,8	100	100	100
Modellezés	Mérési (analitikus)	4,11	52,9	26,5	-	-	-

1. Jakab D. Improvement and optimization of methods used in environmental radiation monitoring. *Doktori (Ph.D.) értekezés*. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Fizikai Tudományok Doktori Iskola; 2023. <http://hdl.handle.net/10890/52926>.
2. Jakab D., Pázmándi T., Zagytvai P. Effects of the uncertainty contributions on the methods used for measurement uncertainty evaluation, *Applied Radiation and Isotopes*, 2021, 173, 109704. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2021.109704>.
3. Jakab D., Pázmándi T., Zagytvai P. Procedures for evaluating passive environmental dosimetry measurements, and the reliability of associated uncertainty assessments and characteristic limit calculations. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4498961>.
4. Jakab D., Apáthy I., Csőke A., Deme S., Endrődi Zs., Tószaki L., Pázmándi T. Comparative analysis of active and passive dosimetry systems used in environmental gamma radiation monitoring, In: 5th International Conference on Environmental Radioactivity (ENVIRA 2019) Proceedings (eds. I. Svétlik et al.); 2019, 42–45. <https://doi.org/10.14311/ENVIRA.2019>.
5. Jakab D., Pázmándi T., Zagytvai, P. The revision of the current radioactive fallout measurements at the KFKI campus in Budapest, Hungary, In: Proceedings of 6th International Youth Conference on Energy (IYCE), 2017. <https://doi.org/10.1109/IYCE.2017.8003711>.
6. Jakab D., Endrődi Zs., Pázmándi T., Tószaki L., Zagytvai P. Evaluation of the precision of radioactive deposition measurements, In: 9th International Conference on Radiation in Various Fields of Research (RAD 2021), 2021. https://rad2021.rad-conference.org/vs/RAD_2021-Dorottya_Jakab.pdf.
7. Jakab D., Endrődi Zs., Pázmándi T., Zagytvai P. Methods for improving the detection capabilities of environmental radioactivity measurements in the light of increased atmospheric radioactivity levels in 2020, In: Proceedings of the 15th International Congress of the International Radiation Protection Association (IRPA15); 2021, T2.5-P1223. <https://irpa.net/irpa15/T2.5-P1223.pdf>.
8. Jakab D., Pázmándi T., Zagytvai P. Módszertani útmutató a sugárvédelmi környezetellenőrző mérések kiértékeléséről és adatsorok elemzéséről, készült az Országos Atomenergia Hivatal megrendelésére (OAH-ABA-32/21-M/1), EK-SVL-2022-270-02-01-01; 2022.

Köszönjük a megtisztelő figyelmet!