



Energiatudományi Kutatóközpont

TSO Szeminárium
Országos Atomenergia Hivatal

**Módszerek fejlesztése a környezeti sugárvédelmi rendszerek
mérési eredményeinek pontosítása érdekében**

Pázmándi Tamás, Jakab Dorottya
(jakab.dora@ek-cer.hu)



A sugárvédelmi környezetellenőrzés feladatainak ellátásához szükséges

- nagy mérési érzékenység a természetes sugárzás eredendően alacsony szintjeinek monitorozására, a mesterséges sugárzás okozta kis szintemelkedések megfigyelésére is, közel a rendszerek kimutatási határértékeihez
- a mérés és bizonytalanságának megfelelő értékelése az eredmények érvényességének, összehasonlíthatóságának és metrológiai nyomon követhetőségének biztosítása érdekében
- az egyes mérési eredmények időben és térben való reprezentativitásának figyelembevétele
- a mérési eredmények megfelelő statisztikai és integrált elemzése a környezetben kialakult sugárzási viszonyok értékeléséhez
- **Módszerek alkalmazhatóságának problematikája**
 - a környezeti mérések mérés technika-specifikus kérdéseit korlátozott számú dokumentum tárgyalja
 - a mérés kiértékelésnek és a mérési adatok statisztikai elemzésének vannak létező eljárásai, de a modellek számos esetben nehezen érthetők és ültethetők át a gyakorlatba
 - gyakori az eljárások használata az alkalmazhatósági feltételek teljesülésének vizsgálata nélkül
- **Az országos sugárzási helyzet értékelése megköveteli az adatok összehasonlíthatóságát**
 - eltérő eredményközlési gyakorlatok → módszertan harmonizálásának szükségessége
 - adatközlési problémák jelentkezése



Módszerek fejlesztése a környezeti sugárvédelmi rendszerek mérési eredményeinek pontosítása érdekében

- 1. rész: A bizonytalanságok és a kimutatási határ meghatározása a környezetellenőrzésben alkalmazott mérések esetében
OAH-ABA-04/19, 2019. szeptember ✓
- 2. rész: A bizonytalanságok és a kimutatási határ csökkentése a környezetellenőrzésben alkalmazott mérések esetében
OAH-ABA-34/19, 2020. január ✓
- 3. rész: A környezeti mérési adatok integrált, statisztikai elemzésének módszerei
OAH-ABA-03/20, 2020. november ✓
- 4. rész: A környezeti sugárvédelmi rendszerek méréseinek kiértékelése, mérési adatok statisztikai elemzése – Hatósági útmutató tervezet
OAH-ABA-32/21, 2022. augusztus ...

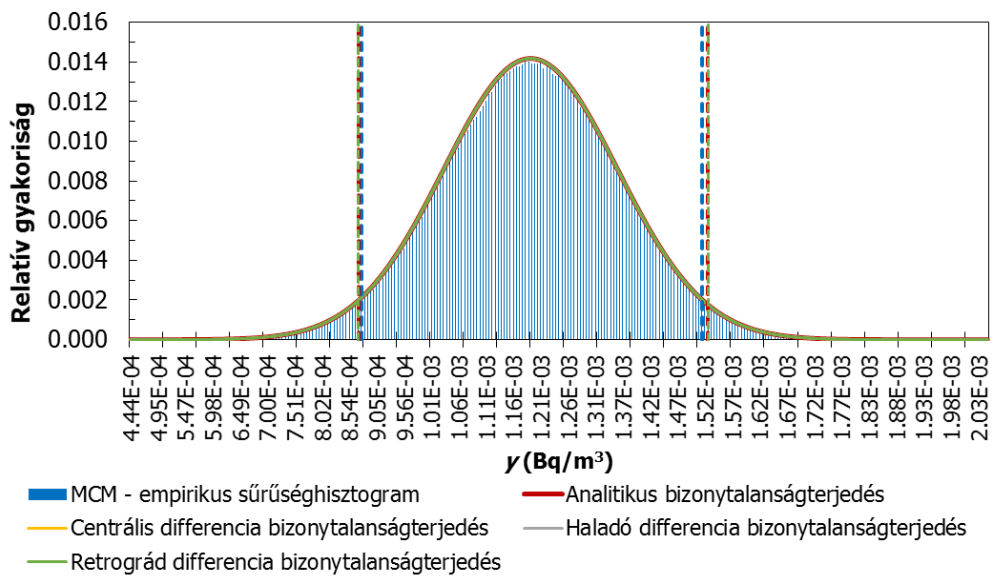


A mérési bizonytalanság és a karakterisztikus limitek meghatározása (1. rész)

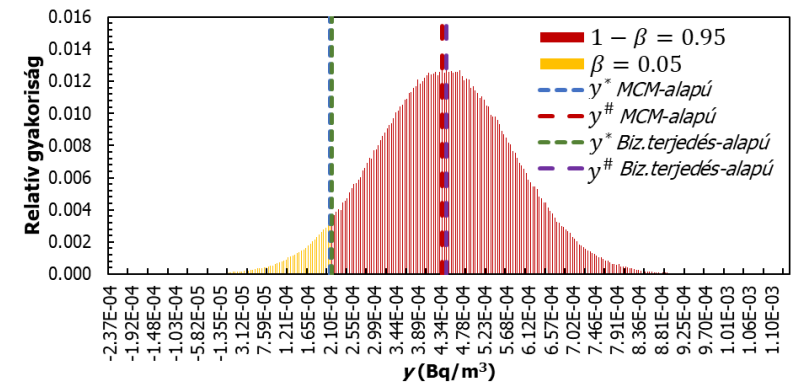
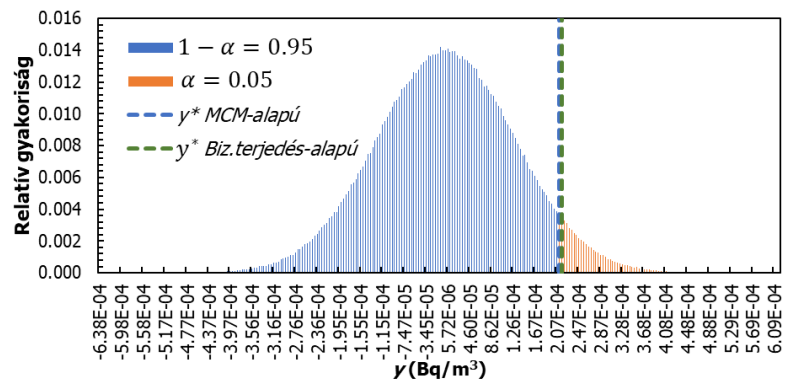
- A vonatkozó legfontosabb nemzetközi és hazai dokumentumok áttekintése
- A mérési bizonytalanság kiértékelésére és a karakterisztikus limitek (döntési küszöbérték, kimutatási határ, megbízhatósági tartomány) meghatározására szolgáló legelterjedtebb elméleti modellek matematikai interpretációja
 - Bizonytalanságterjedésen alapuló eljárások
 - Sztochasztikus, Monte Carlo-módszeren (MCM) alapuló eljárások

Detektált összbeütés számlálásán alapuló mérési példa – aktivitáskoncentráció meghatározása levegőmintában:

y mérési eredmény, $u(y)$ mérési bizonytalanság,
 $[y_-, y_+]$ megbízhatósági tartomány megadása



y^* döntési küszöbérték
 és $y^\#$ kimutatási határ
 megadása





A mérési bizonytalanság és a karakterisztikus limitek meghatározása (1. rész)

- Méréskiértékelési módszerek alkalmazhatóságának vizsgálata, alkalmazhatósági feltételek teljesülésének vizsgálata a legelterjedtebb környezeti méréstípusok értékelésére

Bizonytalanságterjedésen alapuló eljárások érvényessége

- lineáris vagy megfelelően linearizált mérési modelleknél
- a kimenő mennyiség valószínűségi eloszlása normális vagy Student-eloszlással jellemezhető

MCM-alapú eljárások érvényessége

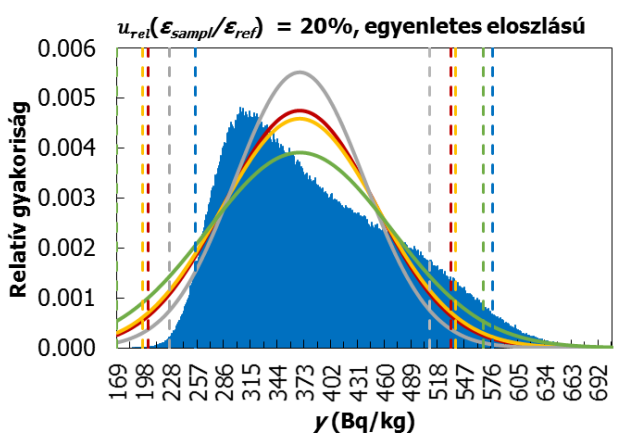
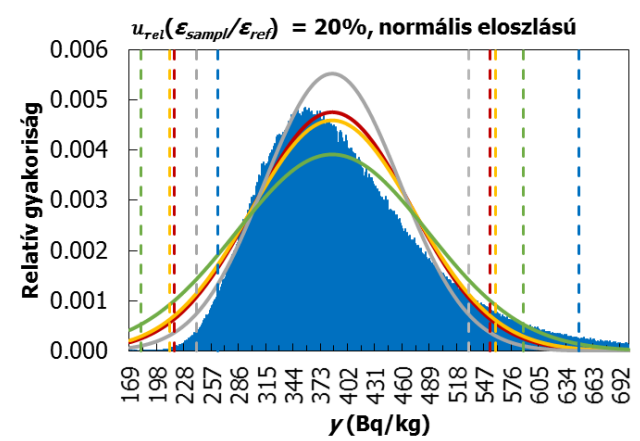
- függ a valószínűségeloszlás-hozzárendelések megfelelőségétől
- megfelelően nagy számú ismételt MC kísérletnél

Gamma-spektrometriai mérési példa – radionuklid aktivitáskoncentrációjának (A_m) meghatározása talajmintában:

$$y = A_m = \frac{n_n}{P_{\gamma} \epsilon_{ref} \frac{\epsilon_{sampl}}{\epsilon_{ref}} t_m m_m \prod_i K_i}$$

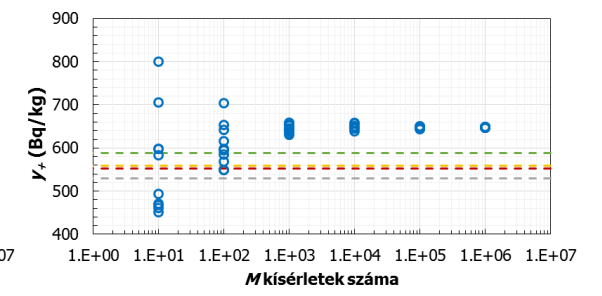
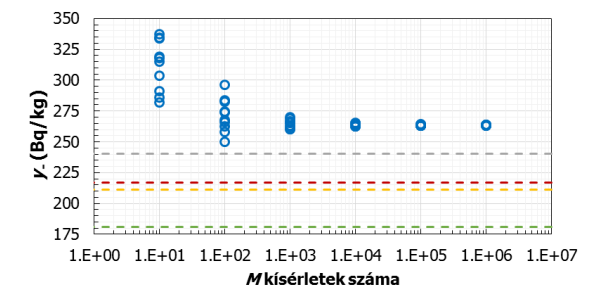
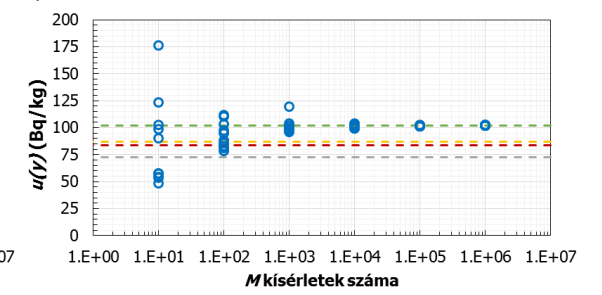
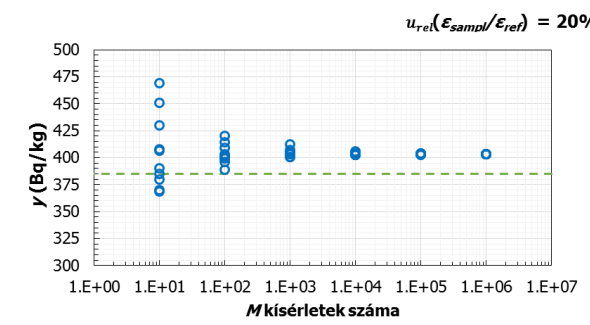
$\frac{\epsilon_{sampl}}{\epsilon_{ref}}$ a minta és a kalibráló forrás közti különbségek korrekciójának faktora (-)

10 ismételt MC szimuláció eredményei a szimulációnkénti kísérletek M számának függvényében



- MCM - sűrűség-histogram
- Centrális differencia bizonytalanságterjedés
- Retrográd differencia bizonytalanságterjedés

- Analitikus bizonytalanságterjedés
- Haladó differencia bizonytalanságterjedés



- MCM
- Centrális differencia bizonytalanságterjedés
- Retrográd differencia bizonytalanságterjedés
- Analitikus bizonytalanságterjedés
- Haladó differencia bizonytalanságterjedés



A mérési bizonytalanság és a karakterisztikus limitek meghatározása (1. rész)

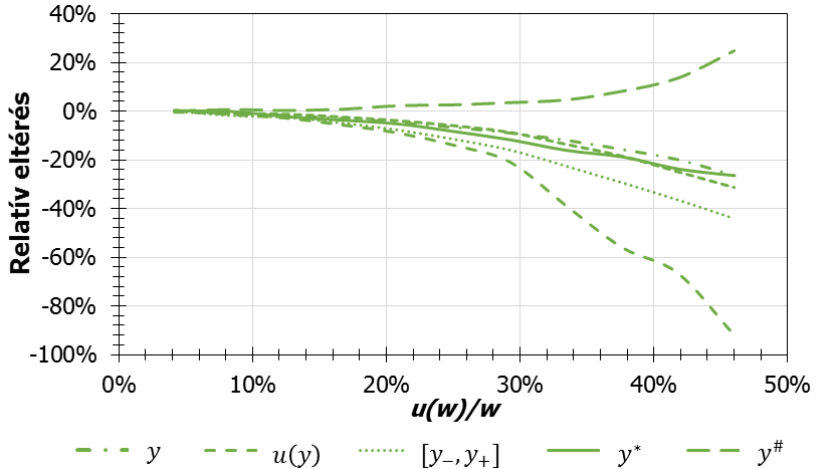
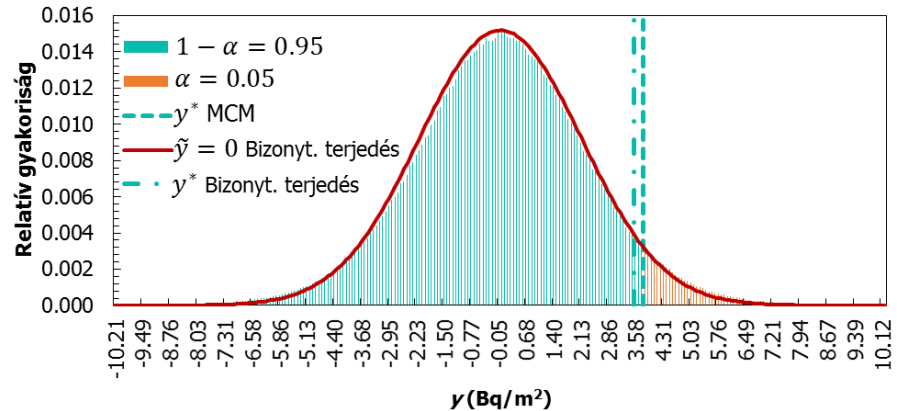
- Méréskiértékelési módszerek alkalmazhatóságának vizsgálata, alkalmazhatósági feltételek teljesülésének vizsgálata a legelterjedtebb környezeti méréstípusok értékelésére

Gamma-spektrometriai mérési példa – radionuklid aktivitáskoncentrációjának (a) meghatározása léghörrikihullás-mintában:

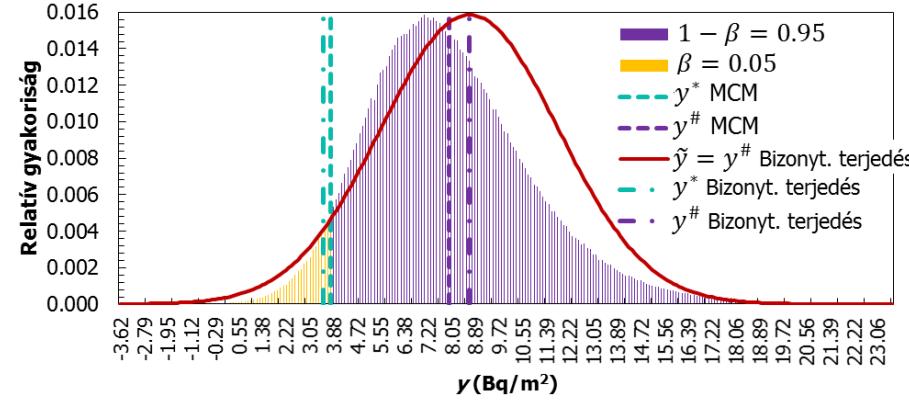
$$y = a = \frac{n_n}{t_m} w = \frac{n_n}{t_m} \frac{n_n}{\varepsilon p_\gamma q \prod_i K_i}$$

$$Pl. \frac{u(w)}{w} = 25\%$$

- n_n a mintamérés nettó beütésszáma (beütés)
- t_m a mintamérés időtartama (s)
- ε detektálási hatásfok (-)
- P_γ gamma-gyakoriság (-)
- q mintamennyiség (gyűjtőfelület, m²)
- K_i bomlaskorrekciós tényezők (-)



A bizonytalanságterjedésen alapuló eljárással kapott paraméterek értékének relatív eltérése az MCM alapú eljárással kapott értékekhez képest, a w arányossági tényező $u(w)/w$ relatív bizonytalanságának függvényében

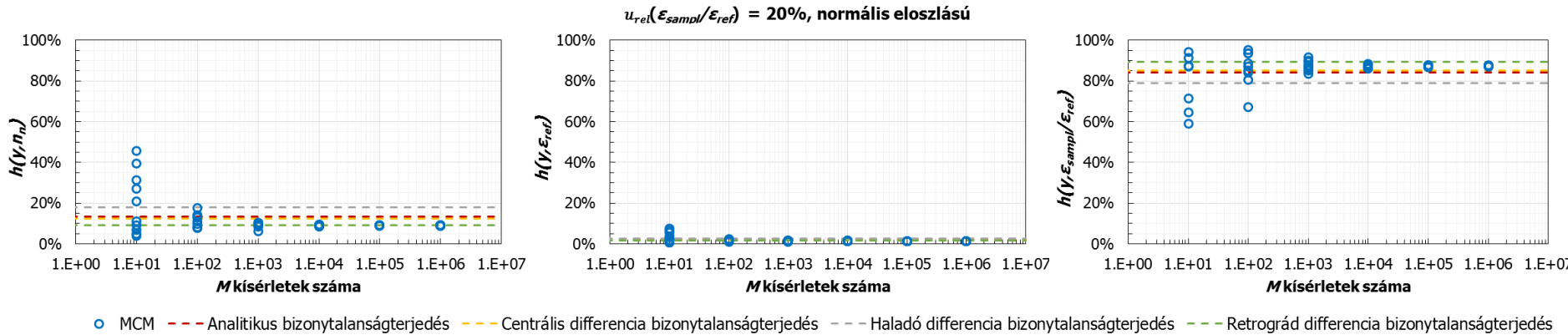




Mérési bizonytalanság forrásainak azonosítása (1. rész)

- Környezeti méréstípusok lehetséges mérési bizonytalansági forrásainak azonosítása
- Bizonytalanság-összetevők számszerűsítése, teljes bizonytalansághoz domináns hozzájárulású tényezők meghatározása – bizonytalanságterjedés érvényességének vizsgálatához, teljes bizonytalanság csökkentéséhez

Gamma-spektrometriai mérési példa – radionuklid aktivitáskoncentrációjának meghatározása talajmintában:



$$y = A_m = \frac{n_n}{P_\gamma \varepsilon_{ref} \frac{\varepsilon_{sampl}}{\varepsilon_{ref}} t_m m_m \prod_i K_i}$$

$h(y, x_i)$ hozzájárulási koefficiens

Gamma-spektrometriai mérési példa – radionuklid aktivitáskoncentrációjának (a) meghatározása légkörkihullás-mintában:

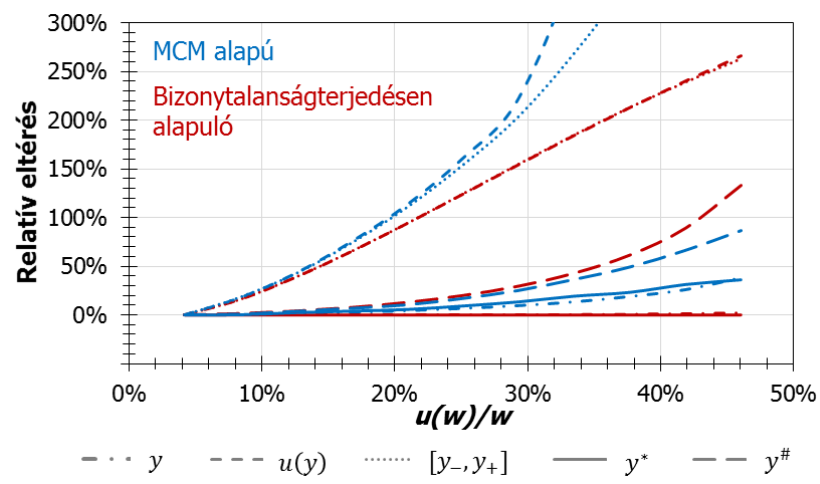
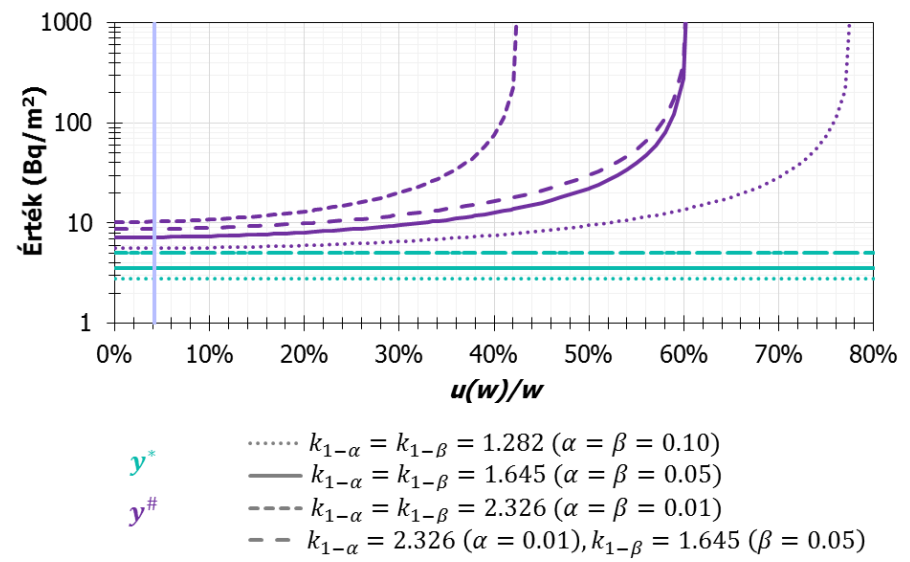
$$a = \frac{n_n}{t_m} w = \frac{n_n}{t_m} \frac{n_n}{\varepsilon p_\gamma q \prod_i K_i}$$

- n_n a mintamérés nettó beütésszáma (beütés)
- t_m a mintamérés időtartama (s)
- ε detektálási határfok (-)
- P_γ gamma-gyakoriság (-)
- q mintamennyiség (gyűjtőfelület, m^2)
- K_i bomláskorrekciós tényezők (-)

Mennyiség	Jellemző relatív bizonytalanság (%)		Jellemző hozzájárulás a teljes bizonytalansághoz (%)	
	Min	Max	Min	Max
n_n	1.90	64.5	23.2	99.6
t_m	0.01	0.29	0.00	
ε	2.50	3.09	0.22	57.9
p_γ	0.38		0.01	1.08
q	1.67	2.89	0.20	17.8
K_i	0.00	0.07	0.00	
a	3.69	65.6	100	



- A mérési bizonytalanság és a kimutatási határ csökkentésére, valamint az eredmények időbeli és térbeli reprezentativitásának javítására szolgáló lehetőségek felmérése
 - A mérések teljesítményjellemzői hatékonyan javíthatók, de ilyen intézkedések egyfelől költségesek lehetnek (bár a meglévő rendszerek elemeinek felhasználásával, a mintavételi és/vagy mérési eljárásrend módosításával is elérhető javítás), másfelől bizonyos szint után indokolatlan erőfeszítéseket igényelnek
 - A mérendő mennyiséget befolyásoló paraméterek megválasztásánál sokszor egymásnak ellentmondó hatásokat kell figyelembe venni és optimalizálni
 - A bizonytalansági hozzájárulások számszerűsítésével azonosíthatók a mérési bizonytalanság fő forrásai, amelyek csökkentésével a teljesítményjellemzők leghatásosabb javulása érhető el
 - A kimutatási határ csökkentésének is részét képezi a mérendő mennyiséget befolyásoló bemenő mennyiségek bizonytalanságának csökkentése



Gamma-spektrometriai mérési példa – radionuklid aktivitáskoncentrációjának (a) meghatározása légkörkihullás-mintában:

Paraméterek értékének megváltozása a w arányossági tényező $u(w)/w$ relatív bizonytalanságának függvényében, annak tipikus értékénél ($u(w)/w \sim 4,2\%$) kapott paraméterértékekhez viszonyítva



Méréskiértékelési módszerek alkalmazhatóságának támogatása (1-3. rész)

- Méréskiértékelési módszerek alkalmazásának illusztrációja valós mérési problémákon és adatokon alapuló példaszámításokon keresztül
- A kiértékelési módszerek gyakorlati alkalmazhatóságát támogató számítási sémák leírása, pl.
 - Bizonytalanságterjedési szabály c_i érzékenységi koefficienseinek becslésének alternatív megoldásai (analitikus, numerikus differenciáláson alapuló közelítések)

Detektált összebeütés számlálásán x_1, \dots, x_N bemenő mennyiségek

alapuló mérési példa

$$y = A_m = \frac{\frac{n_t}{t_m} - \frac{n_b}{t_b}}{\varepsilon m_m}$$

n_t, n_b a minta- és háttérméréshez tartozó teljes beütésszám (beütés)
 t_m, t_b a minta- és háttérmérés mérési ideje (s)
 ε számlálási hatásfok (-)
 m_m a mérendő minta mennyisége (m³)

		$u(n_t)$ 19		$u(t_m)$ -		$u(n_b)$ 13		$u(t_b)$ -		$u(\varepsilon)$ 0.01		$u(m_m)$ 1.03		
		$u(x_1)$		$u(x_2)$		$u(x_3)$		$u(x_4)$		$u(x_5)$		$u(x_6)$		
		$x_1^{(+)}$	$x_2^{(+)}$	$x_3^{(+)}$	$x_4^{(+)}$	$x_5^{(+)}$	$x_6^{(+)}$	$x_1^{(-)}$	$x_2^{(-)}$	$x_3^{(-)}$	$x_4^{(-)}$	$x_5^{(-)}$	$x_6^{(-)}$	
n_t	x_1	347	366	347	347	347	347	328	347	347	347	347	347	
t_m	x_2	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600	
n_b	x_3	175	175	188	175	175	175	175	175	162	175	175	175	
t_b	x_4	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600	
ε	x_5	0.45	0.45	0.45	0.45	0.46	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.44	0.45	
m_m	x_6	89	89.0	89.0	89.0	89.0	90.0	89.0	89.0	89.0	89.0	89.0	88.0	
A_m	y	1.193E-03	$y_1^{(+)}$	$y_2^{(+)}$	$y_3^{(+)}$	$y_4^{(+)}$	$y_5^{(+)}$	$y_6^{(+)}$	$y_1^{(-)}$	$y_2^{(-)}$	$y_3^{(-)}$	$y_4^{(-)}$	$y_5^{(-)}$	$y_6^{(-)}$
			1.325E-03	1.193E-03	1.103E-03	1.193E-03	1.167E-03	1.179E-03	1.061E-03	1.193E-03	1.283E-03	1.193E-03	1.220E-03	1.207E-03
$u_c(A_m)$	$u_c(y)$	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6							
1.624E-04		6.936E-06	-	-6.936E-06	-	-2.652E-03	-1.341E-05	Centrális differencia $c_i \approx (G(x_1, \dots, x_i + u(x_i), \dots, x_N) - G(x_1, \dots, x_i - u(x_i), \dots, x_N)) / 2u(x_i) = [y_i^{(+)} - y_i^{(-)}] / 2u(x_i)$						
1.623E-04		6.936E-06	-	-6.936E-06	-	-2.593E-03	-1.325E-05	Haladó differencia $c_i \approx (G(x_1, \dots, x_i + u(x_i), \dots, x_N) - G(x_1, \dots, x_i, \dots, x_N)) / u(x_i) = [y_i^{(+)} - y] / u(x_i)$						
1.626E-04		6.936E-06	-	-6.936E-06	-	-2.711E-03	-1.356E-05	Retrográd differencia $c_i \approx (G(x_1, \dots, x_i, \dots, x_N) - G(x_1, \dots, x_i - u(x_i), \dots, x_N)) / u(x_i) = [y - y_i^{(-)}] / u(x_i)$						
1.624E-04		6.936E-06	-6.685E-07	-6.936E-06	3.372E-07	-2.651E-03	-1.340E-05	Analitikus $c_i = \frac{\partial G(x_1, \dots, x_i, \dots, x_N)}{\partial x_i}$ $c_1 = \frac{\partial G}{\partial n_t} = \frac{1}{t_m \varepsilon m_m}$, ..., $c_5 = \frac{\partial G}{\partial \varepsilon} = -\frac{n_t t_b - n_b t_m}{\varepsilon^2 t_m t_b m_m}$, $c_6 = \frac{\partial G}{\partial m_m} = -\frac{n_t t_b - n_b t_m}{m_m^2 t_m t_b \varepsilon}$						

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

Független bemenő mennyiségek esetén
 Nem független bemenő mennyiségek esetén

- MCM-alapú kiértékelési eljárások standard táblázatkezelő szoftverrel is végrehajtható számítási sémája
- Döntési küszöbérték és kimutatási határ iteratív megadása



- Javaslatok, bemutatott módszerek alkalmazhatóságának tesztelése a KFKI Telephelyen üzemelő környezetellenőrzési rendszer gyakorlatában
- A sugárvédelmi környezetellenőrző mérések kiértékelésének hazai gyakorlata – OKSER felmérés
 - Bizonytalanságvértékelés rendszerint a mérőrendszer kiértékelő szoftvereinek automatikus számításaival, egyes méréstípusoknál a mért adatokból utólagos *bizonytalanságvértékelés a bizonytalansághatárterjedési szabály alkalmazásával*
 - Mérendő mennyiséget befolyásoló paraméterek elhanyagolása eltérő gyakorlatok szerint
 - Mérési eredmény közlésekor minden esetben *közölt mérési bizonytalanság, amely az analitikai (mérési) bizonytalanságot foglalja magában* és nem tartalmazza a mintavétel, a fizikai, kémiai mintaelőkészítés bizonytalanságát
 - *Mérési eredményhez egységesen az eredő standard bizonytalanságot ($k = 1$ kiterjesztési tényezővel) társítják, hol abszolút, hol relatív értéként megadva*
 - Az eredményközlés formátumát a vizsgálati jegyzőkönyvek határozzák meg, rendszerint a vonatkozó MSZ szabvány vagy belső – akkreditált – útmutatásnak megfelelően, az *eredményközlés formátuma között jelentős eltérések*
 - Az értékes jegyek számának megválasztására rendszerint nincsenek megkötések, bevett gyakorlatok vannak
 - *Kimutatási határ meghatározása* kiértékelő szoftverek automatikus számításából vagy az adatok alapján „manuálisan” végzett számítással történik a *Currie-módszer vagy az ISO 11929 szabványcsoport eljárásainak alkalmazásával*
 - *A kimutatási határ (LD vagy KH) alatti adatokat rendszerint <LD formátumban, az LD értékének megadásával közlik, a „nyers” (a kimutatási határ alatti, de a döntési küszöbértéket meghaladó) mérési adat vagy az \hat{y} legjobb becslés nincs feltüntetve*



Eredmények értelmezése, adatközlés (1., 3. rész)

Méréskiértékelés eredményeinek értelmezése

Az eredmény nem tulajdonítható a fizikai hatásnak

$$y^* < y ?$$

A fizikai hatás fennáll

Megbízhatósági tartomány y_-, y_+ alsó és felső határának kiszámítása

$$y^* < y < y^\#$$

A fizikai hatás megfigyelhető, de nem számszerűsíthető

\hat{y} legjobb becslés és $u(\hat{y})$ standard bizonytalanság kiszámítása, amellyel figyelembe vesszük, hogy y nem-negatív ($y \geq 0$)

$$y^\# < y < 4u(y)$$

A fizikai hatás megfigyelhető és számszerűsíthető, de közel van $y^\#$ -hoz

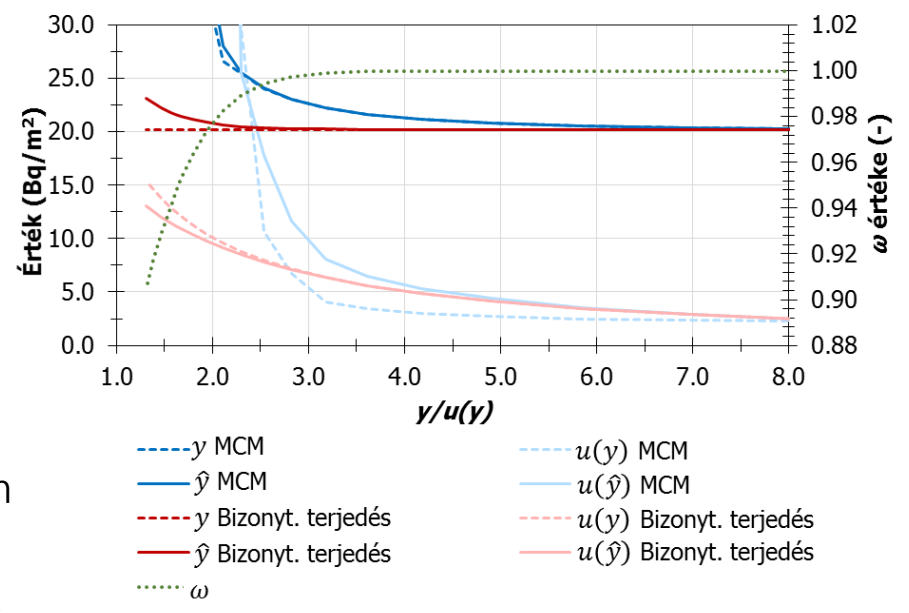
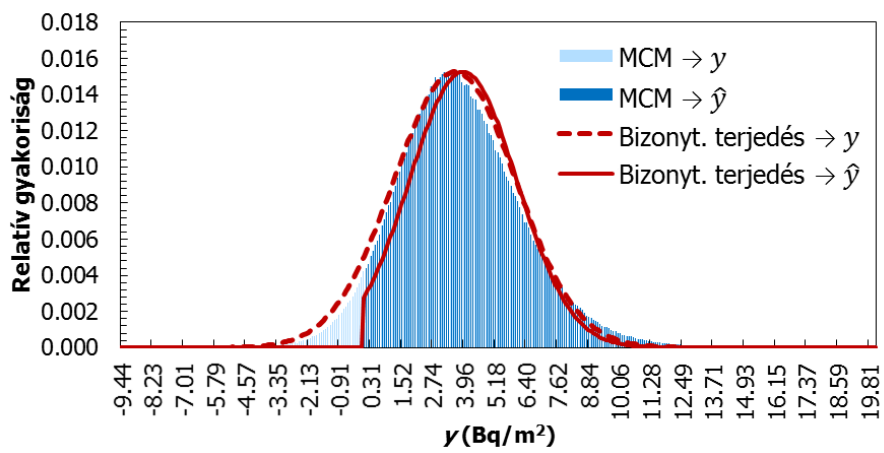
$$y \geq 4u(y)$$

A fizikai hatás egyértelműen megfigyelhető és számszerűsíthető

$\hat{y} = y, u(\hat{y}) = u(y)$ becslések megfelelőek, \hat{y} és $u(\hat{y})$ kiszámítása nem szükséges

Gamma-spektrometriai mérési példa – radionuklid aktivitáskoncentrációjának (a) meghatározása légkörkihullás-mintában:

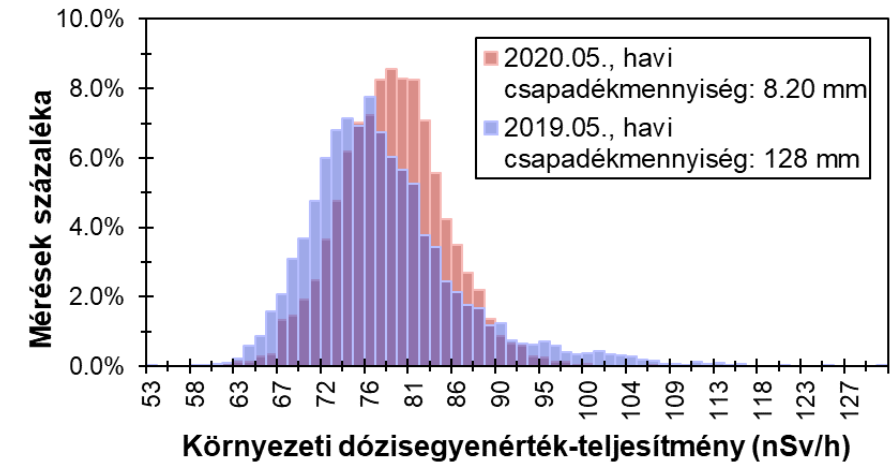
$$Pl. y^* < y < y^\#, \frac{u(w)}{w} = 25\%$$



- Sugárzási helyzet elemzéséhez szükséges adattartalom és adatformátum meghatározása
- Előforduló adatközlési problémák: hiányos adatközlés, kerekítési problémák, cenzúrázott adatsorok helytelen kezelése



- Rendelkezésre álló statisztikai módszerek alkalmazhatóságának vizsgálata a környezeti méréseket és mérési adatsorokat jellemző specifikusságok figyelembevételével
 - a környezetellenőrző gyakorlatban legtöbbször szisztematikus megközelítésen (térben és/vagy időben azonos közönként történő) alapuló mintavételezés, néha (időben) eseti mintavételezések, amelyek térben szisztematikusak (mindig azonos helyről vételezett minták) vagy véletlenszerűen megválasztottak
 - térben és időben korreláló értékek
 - nem-normális eloszlású mintasokaságok
 - kiszóró pontok és kimutatási határ alatti értékek jelenléte
→ torzult adatsorok
 - különböző sokaságból származó, eltérő rendelkezésre állású adatok
- A környezeti mérési módszerek eredményeinek integrált értékelésével növelhető a kinyerhető információ tartalom, így a mérési eredmény reprezentativitása
 - antropogén szennyeződés (^{106}Ru) valós példája:
 - az időfüggő vonatkoztatási értéknek (mintázott levegő térfogata) a szennyeződés megjelenésének időpontját és tartózkodásának hosszát figyelembe vevő korrekciója volt szükséges
 - rövid idejű szennyeződés időbeli lefutásának becslése a jobb időbeli felbontású, de nem nuklidspecifikus analízis alapján vált lehetségessé → időfüggő vonatkoztatási érték pontosítása, pontosabb bomláskorrekció → eredmények pontosítása
 - az eltérő rendelkezésre állású adatok direkt összehasonlíthatósága is lehetővé vált





- A megfogalmazott ajánlások egységes szerkezetbe foglalása
- Ajánlások ismertetése a hazai és a nemzetközi szakmai közösséggel
- A visszacsatolások beépítése az ajánlásokba
- State-of-the-art tudás, gyakorlati tapasztalatok és visszacsatolások szintetizálása
- Hatósági útmutató tervezet elkészítése

- *Javasolt eljárásrendek alkalmazása a hazai sugárvédelmi környezetellenőrzési gyakorlatban*
- *Harmonizált módszertan használata*



Energiatudományi Kutatóközpont

Köszönjük a megtisztelő figyelmet!