1. Atomenergia és biztonság
1.1. Megoldás

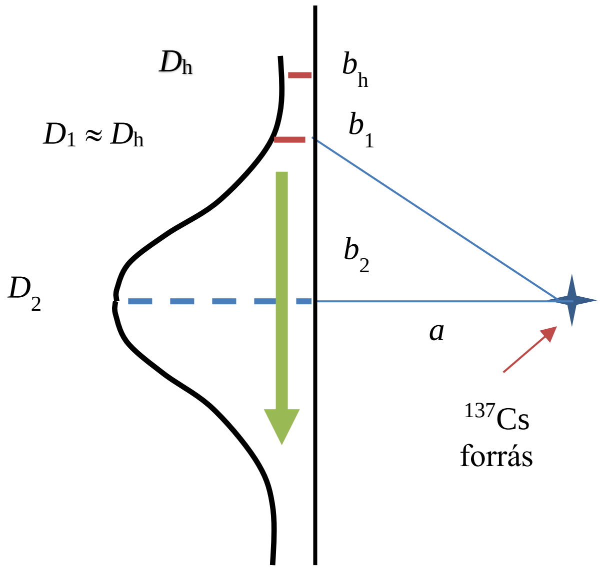
Elveszett radioaktív sugárforrás

Közli: Bodor Károly
MTA Energiatudományi Kutatóközpont

1) A mért spektrum alapján ^{137}Cs-ot találtunk, mivel egyrészt látható, hogy a spektrum 1 db gamma-csúcsot tartalmaz és a 660 keV körül (bár elvben 2 csúcsa van, de a másik csúcs számossága elenyésző), a ^{60}Co két csúcsot tartalmaz jóval nagyobb energiákon.

2) A radioaktív sugárforrás helyzetének meghatározásához az alábbi ún. háromszögelési módszert lehet felhasználni. Tegyük fel, hogy a ^{137}Cs forrás a kezünkben lévő dózisteljesítmény-mérő műszer magasságában van:

A módszer lényege abból áll, hogy adott útvonalon – egyszerűség kedvért egyenes mentén – haladva határozzuk meg a háttér dózisteljesítmény szintjét a kezünkbe lévő dózis-teljesítménymérővel. Ezt akkor kaphatjuk meg, ha számottevő távolságon nem találunk szignifikáns változást, jelöljük a háttér értékét D_h-val. Majd keressük meg azt a helyet, ahol a dózisteljesítmény elkezd nőni, jelöljük ezt a helyet b_1-gyel, ez után keressük meg azt a helyet b_2, ahol a dózisteljesítmény a maximális értéket veszi fel, ezt jelöljük D_2-vel. Majd kilencven fokkal elfordulunk valamelyik iránya és elindulunk. Ha a dózisteljesítmény csökken, akkor távolodunk a forrástól, ha növekszik, akkor közeledünk, így kijelölhetjük, hogy a forrás az egyenes melyik oldalán helyezkedik el.



Mért értékek:

$D_h = D_1$=100 nGy/h,

D_2= 0,11 mGy/h,

$b_2 - b_1$ = 20 m.

A radioaktív sugárforrás dózisteljesítményét az alábbi egyenlettel lehet meghatározni:

$$D = DCF \cdot \frac{A}{r^2}$$

ahol:

- D: a forrástól r távolságra mért dózisteljesítmény [µGy/h],
- r: forrás-detektor távolsága [m],
- A: a radioaktív forrás aktivitása a mérés idején [Bq],

- *DCF*: dózisállandó, vagy dóziskonverziós tényező [$\frac{Gy\cdot m^2}{Bq\cdot h}$].

$D_1 = DCF \cdot \frac{A}{a^2+(b_2-b_1)^2}$,

$D_2 = DCF \cdot \frac{A}{a^2}$,

$\frac{D_2}{D_1} = \frac{DCF\cdot\frac{A}{a^2}}{DCF\cdot\frac{A}{a^2+(b_2-b_1)^2}} = \frac{a^2+(b_2-b_1)^2}{a^2} = 1 + \frac{(b_2-b_1)^2}{a^2}$ ⇒ rendezve a-ra

$a^2 \cdot \left(\frac{D_2}{D_1} - 1\right) = (b_2 - b_1)^2 \Rightarrow a = \left(\frac{(b_2-b_1)^2}{\frac{D_2}{D_1}-1}\right)^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{400}{\frac{110000}{100}-1}\right)^{\frac{1}{2}} = 0{,}363^{0,5} = 0{,}6$ m, azaz 60 cm-re haladtunk el a forrás mellett!

3) A $D = DCF \cdot \frac{A}{r^2}$ képletet alkalmazva az aktivitás meghatározható.

- $DCF_{Cs\text{-}137}$= 75,90 $\frac{\mu Gy\cdot m^2}{GBq\cdot h}$,
- $DCF_{Co\text{-}60}$= 143,1 $\frac{\mu Gy\cdot m^2}{GBq\cdot h}$.

A fenti egyenletet átrendezve a sugárforrás aktivitása meghatározható, azaz:

$$A = D \cdot \frac{r^2}{DCF}.$$

Az r távolság ismert, mivel az megegyezik a háromszögelési módszerrel kapott a értékkel, a D-t szintén ismerjük (definícióját lásd fentebb: D: a forrástól r távolságra mért dózisteljesítmény), mivel az mért adat a maximális dózisteljesítmény, azaz D_2.

A = 110 · $\frac{0{,}6^2}{75{,}9}$ = 0,52 GBq = 520 MBq (2017.03.16.) a megtalálás napján.

4) A sugárforrás kategóriáját a fizikai védelemről szóló 190/2011-es rendelet melléklete alapján lehet meghatározni:

Radioaktív sugárforrások kategorizálása

2. táblázat

A Kategória	B Általános gyakorlat	C R érték
1.	Radioaktív izotópokkal működő hőgenerátor Besugárzó létesítmény Teletherápiás egység Gamma kés	$R \geq 1000$
2.	Ipari gamma-radiografia Magas/közepes dózisú brachyterápia	$1000 > R \geq 10$
3.[42]	Ipari méréstechnika - szintmérés - szállítószalagi mérések	$10 > R \geq 1$
4.	Kis dózisú brachyterápia Falvastagság mérés Hordozható mérések pl: (páratartalom/sűrűség)	$1 > R \geq 0{,}01$
5.	Röntgen-fluoreszcens készülékek Elektron befogó készülék Mössbauer spektrometria PET vizsgálat	$0{,}01 > R$

$$\text{Ahol } R = \sum_i \frac{A_i}{D_i}$$

A kategóriához az *R* **dimenziótlan** értéket kell kiszámítani. Minél nagyobb a kategória értéke, annál veszélyesebb a forrás. A *D* érték ún. veszélyességi tényező (kifejezi mennyire veszélyes, mennyire környezetkárosító az adott nuklid), melynek értékei a 11/2010 KHEM rendeletben találhatók:

Radionuklid	**D aktivitás (TBq)**
60Co	$3 \cdot 10^{-2}$
^{137}Cs	$1 \cdot 10^{-1}$

MEGOLDÁS:

Mivel a talált forrás ^{137}Cs, ezért a *D* = 0,1 TBq értéket kell alkalmazni a számításnál, fontos a kiszámított aktivitást át kell váltani TBq-re, így:

(520/1E6)/1E-1=0,0052, azaz R kisebb, mint 0,01 tehát 5-ös kategóriájú a forrás!

5) A szállítás során a tárolócsomag felületén a dózisteljesítmény nem haladhatja meg az 5 μGy/h-t a nemzetközi veszélyesárú fuvarozási szabályzat (ADR) szerint, mert ekkor ún. engedményes a csomag.

   A számításokhoz az alábbi egyenleteket lehet felhasználni:

$$D_{felület} = D_{forrás\,felülete} \cdot e^{-\mu_i \cdot d_i}$$

   ahol:

- $D_{felület}$: a csomag felületén lévő dózisteljesítmény,
- $D_{forrás\,felülete}$: a forrás felületén lévő dózisteljesítmény,
- d_i: árnyékoló anyag vastagsága,
- μ_i: árnyékoló anyag árnyékolási tényezője.

A rendelkezésre álló konténerek adatai:

-
  d_{fa} = 1,3 m,
  $d_{ólom}$ = 0,3 m,
  μ_{fa} = 2 m^{-1},
  $\mu_{ólom}$ = 5 m^{-1},
  $D_{forrás\,felülete}$ = 50 μGy/h.

A leírás alapján ennek kell teljesülnie: $D_{felület} < 5$μGy/h

Ólom esetén:

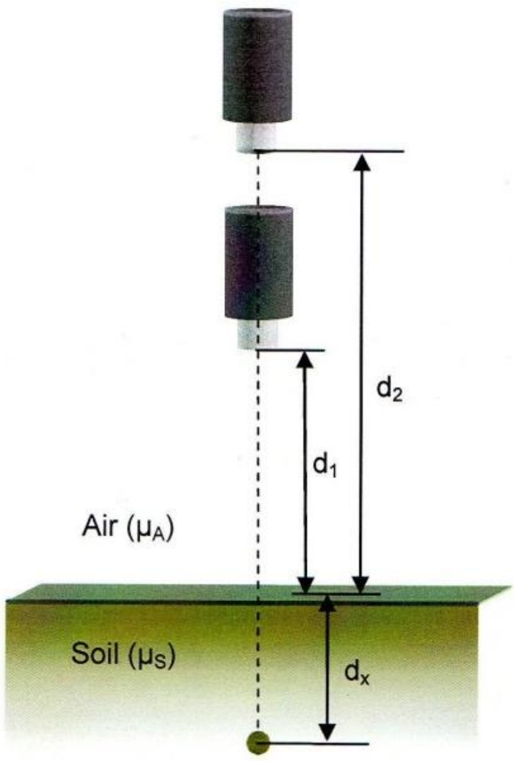
$$D_{felület} = 50 \cdot e^{-0,3\cdot 5} = 50 \cdot e^{-1,5} = 50 \cdot 0,22 = 11$$

Fa esetén:

$$D_{felület} = 50 \cdot e^{-1,3\cdot 2} = 50 \cdot e^{-2,6} = 50 \cdot 0,074 = 3,7$$

Tehát a meglévő 1,3 m vastag falú fából készült konténer teljesíti a kívánalmakat, míg az ólom nem.

6) Bónusz feladat, a vizsgálatok alapján egy másik ^{137}Cs forrást eltemettek a föld alá, a cél meghatározni a mélységet (d_x), ekkor a dózis-teljesítménymérő készüléket beütésszámláló [cps] módba kapcsoltuk, és két különböző magasságban (d_1; d_2) mértük meg 5 perc eltéréssel a beütésszámokat, melyek egy-egy adott csaknem konstans érték (N_1, N_2) körül ingadoztak. Feltételezzük, hogy a dózismérőkkel csak az energia csökkenés nélkül átjutott 662 keV-es fotonokat mérjük, ellenkező esetben a probléma jóval bonyolultabb, mert a talajban a detektor felé szóródott fotonok járulékát is mérjük.



$$A = \dot{N}_i \frac{1}{\varepsilon_{\text{int}} p_\gamma} \frac{4\pi}{\Omega_i} e^{(\mu_S d_x + \mu_A d_i)} \qquad i = 1{,}2$$

A forrás aktivitása (*A*) és a beütésszám (*N*) közötti összefüggés látható az ábra alatt, ahol:

- $\dot{N}_i$: az *i*-dik mérési pontban (magasságban) mért beütésszám ráta (azaz időegységre eső beütésszám),
- *A*: a forrás aktivitása a mérés idején,
- ε_{int}: detektor hatásfoka,
- p_γ: gamma forrás kibocsátás valószínűsége,
- μ_a, μ_s: levegő, illetve talaj árnyékolási tényező,
- d_i: detektor-földfelszín közötti távolság,
- d_x: forrás-földfelszín közti távolság-mélység,
- Ω: a detektor térszöge a detektor belépő felülete és sugárforrást körülvevő, a detektort érintő gömb felületének a hányadosa $\Omega = \frac{\pi \cdot r^2}{4\pi \cdot (d_x + d_i)^2}$
- *r*: a henger formájú detektor sugara.

d_1 = 1 m esetén a mért N_1=10 000 cps-el, míg
d_2 = 1,5 m esetén a beütésszám (N_2) lecsökkent 9500 cps-re.
μ_A = 0,0000001 $\frac{1}{\mathrm{m}}$.

A sugárforrás aktivitása az időben folyamatosan csökken, ugyanakkor, ha a mérés ideje alatt a beütésszám láthatóan nem csökken, illetve pár perc után akár ugyanolyan távol, akár távolabb vagy

közelebb mérünk és a beütésszámok ismét egy-egy konstans érték körül ingadoznak, akkor egyértelmű, hogy a mért sugárforrás felezési ideje közepes, vagy hosszú. Azaz a fenti egyenletnél az aktivitás állandónak tekinthető csak az $\dot{N}_i$ és d_i változik, továbbá a térszög.
Ebből következően a fenti egyenletnél amikor d_1 magasságban $\dot{N}_1$-et mérünk és d_2 magasságban $\dot{N}_2$-t és az aktivitások megegyeznek, így a fenti aktivitás egyenletet 1 és 2 esetre is fel lehet írni, majd el lehet osztani a kettőt egymással, ekkor a konstansok kiesnek:

$$1 = \frac{\dot{N}_1(d_x + d_1)^2}{\dot{N}_2(d_x + d_2)^2} e^{\mu_A(d_1 - d_2)}$$

az $a = \frac{\dot{N}_1}{\dot{N}_2} e^{\mu_A(d_1-d_2)}$-t bevezetve egyszerűsödik az egyenlet, d_x-re nézve másodfokú egyenletet kapunk, Mivel $\mu_A \ll |d_1 - d_2|$, ezért az exponens jól közelíthető 1-gyel, azaz $a = \frac{\dot{N}_1}{\dot{N}_2}$:

$$(a-1)d_x^2 + 2(ad_1 - d_2)d_x + ad_1^2 + d_2^2 = 0$$

Felírjuk a másodfokú egyenlet megoldóképletét:

$$d_{x(1,2)} = \frac{-2(ad_1 - d_2) \pm \sqrt{4(ad_1 - d_2)^2 - 4(a-1)(ad_1^2 + d_2^2)}}{2(a-1)}$$

ennek lehetséges eredményei:

Először a diszkriminánst kell megvizsgálni, hogy $a$mely értéi esetén van megoldás. Az a változóról leszögezhetjük, hogy 1-nél nagyobb értékek felelnek meg a feladatnak, hiszen ha távolodunk a forrástól, akkor egyre kisebb értékeket kell mérjünk. Tehát vizsgáljuk meg a diszkriminánst behelyettesítve a d_1 és d_2 távolságértékeket.

$$D = 4(ad_1 - d_2)^2 + 4(a-1)(ad_1^2 + d_2^2) \geq 0$$

$$D = \frac{18 - 17a}{4} \geq 0; 1 < a \leq \frac{18}{17} = 1.0588$$

Ebből az következik, hogy a mért beütésszámok rátája nem lehet tetszőleges, csak a fenti szűk intervallumba eshetnek, továbbá $a = \frac{18}{17}$ esetén a diszkrimináns 0, tehát 1 elfajult megoldásunk lesz. A többi esetben pedig két megoldást fogunk kapni. A megadott adatokkal a következő egyenletre jutunk d_x-re:

$$\frac{d_x}{19} - \frac{17d_x}{19} + \frac{251}{76} = 0$$

Ennek a megoldásai:

$$d_{x_1} = \frac{\sqrt{38} + 17}{2}\ \mathrm{m} \approx 11{,}58\ \mathrm{m}; \qquad d_{x_2} = \frac{17 - \sqrt{38}}{2}\ \mathrm{m} \approx 5{,}42\ \mathrm{m}$$