

IONIZÁLÓ SUGÁRZÁSOK DOZIMETRIÁJA

(Dr. Kanyár Béla, SE Sugárvédelmi Szolgálat)

A sugárzások a károsító hatásuk mértékének megítélése szempontjából két nagyobb csoportra oszthatók:

- Ionizáló sugárzások (pl. röntgensugárzás)
- Nemionizáló sugárzások (látható fény, rádióhullámok, mikrohullámok, ultrahang stb.).

Az ionizáló sugárzások a hatásukat elsősorban az anyagban keltett ionizáció révén fejtik ki, azaz útjuk mentén az elektromosan semleges atomokat, molekulákat „szétszakítják” negatív töltésű elektronokká és pozitív ionokká (ionpárokat képeznek). Az ionpárok képzéséhez energia szükséges, ezért a sugárnyaláiban terjedő részecskék, fotonok útjuk mentén lassan lefékeződnek, elnyelődnek.

A vízben, testszövetekben egy ionpár képzéséhez átlagosan 32 eV (elektronvolt) energia szükséges ($32 \text{ eV} = 5,1 \text{ atto joule}$, rövidítve: aJ). A károsító hatás, az ártalom szempontjából lényeges az ionizáció gyakorisága, sűrűsége.

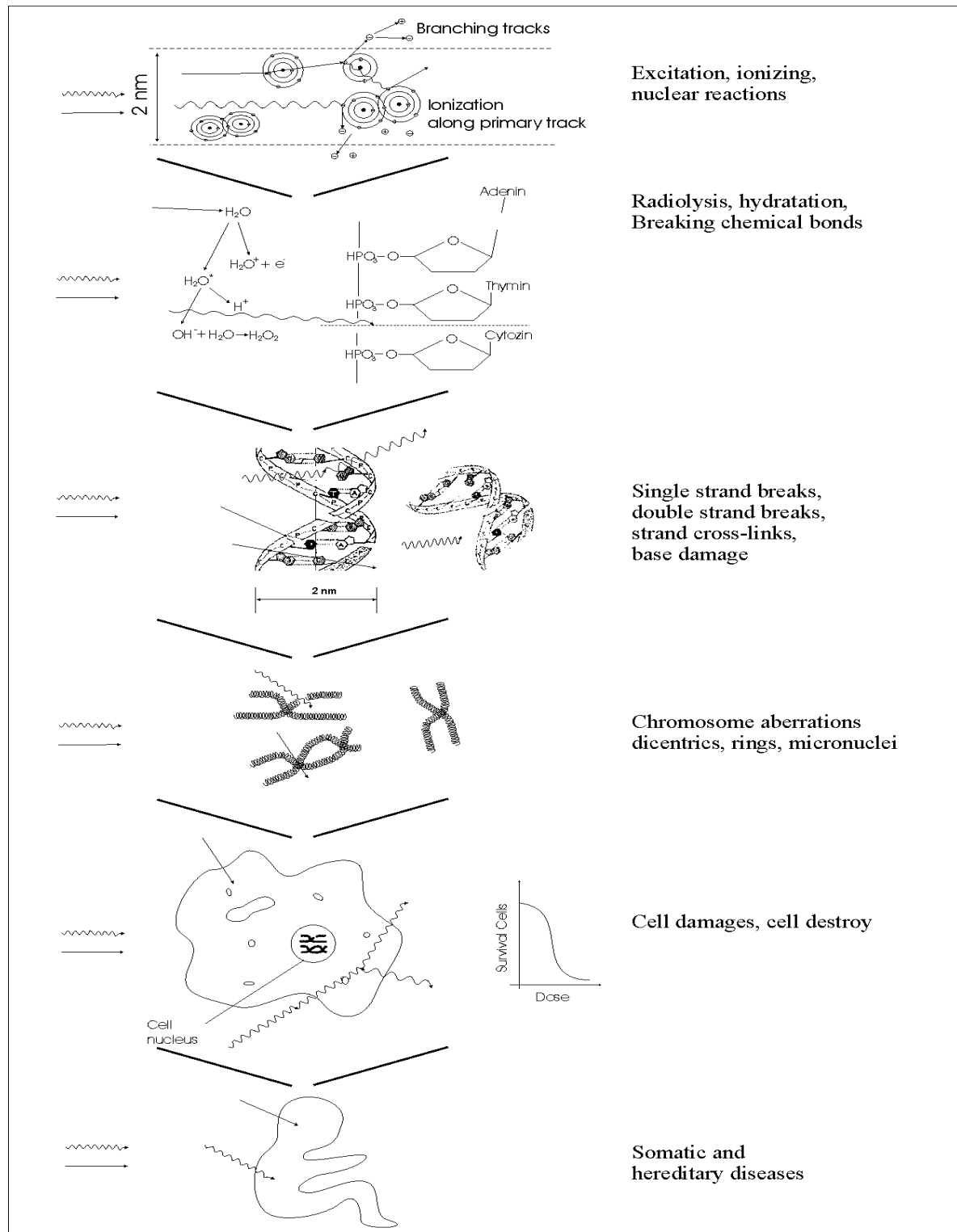
Az elektromágneses sugárzás esetén, általában:

nemionizáló sugárzás: $E_{\text{foton}} < \text{Oxigénatom átlagos ionizációs energia (12,3 eV)}$,
ionizáló sugárzás: $E_{\text{foton}} \geq \text{Oxigénatom átlagos ionizációs energia}$.

A sugárzás káros hatásának kifejlődése, kvalitatív formában, vázaltszerűen az 1. ábrán látható. A vázlat a bevezetésre kerülő dozimetriai fogalmak, mennyiségek megértését segíti.

Természetesen nem zárható ki, hogy bizonyos körülmények között a sugárzásnak pozitív hatása van az élő egyedre.

1. ábra. Sugárzás hatásának kifejlődése, séma



A károsodás időléptékei

Az ionizáció, a molekula szakadások a másodperc milliomod részei alatt történnek, a sejtkárosodások kialakulására már több perc, ill. órák szükségesek, míg a szövet és szerv károsodás (pl. rosszindulatú daganat) rendszerint csak évekkal a sugárhatás után alakul ki.

A dozimetria célja, feladata

Természetesen jó lenne, ha a jelen sugárzási viszonyok, jellemzők alapján következtetni tudnánk, hogy milyen mértékű ártalom várható órákkal, évekkal, évtizedekkel a sugárexpozíció után. Ezt a célt szolgálja a **sugárzások dozimetriája**, amikor a jelenleg mérhető, ill. számolható sugárzási viszonyok alapján becsüljük a várható sugárkárosodást, ill. annak kockázatát, pontosabban az esetleg bekövetkező károsító hatás mértékét, valószínűségét. Ennek ismeretében a védekezés is hatékonyabb, célzottabb lehet.

Dózisfogalmak, dózismennyiségek és mértékegységek a sugárvédelemben

A sugárterhelés mértékét jellemző sugárdózis egy gyűjtőfogalom, melynek az adott körülmények között már jól meghatározott értelme van.

Elnyelt dózis (Jele: D)

Bármely ionizáló sugárzásra vonatkozóan a besugárzott anyag térfogatelemében elnyelt energia és a térfogat tömegének hányadosát elnyelt dózissnak nevezzük. Egyszerű matematikai alakban:

$$D = \varepsilon / m,$$

ahol ε a sugárzásból (nagyreszt ionizáció révén) elnyelt energia átlagértéke, m a V térfogatelem tömege. Részletesebb vizsgálatokhoz a magreakciókat, az elnyelődés véletlenszerű ingadozását és más jelenségeket is figyelembe kell venni.

Az elnyelt dózis egysége a *gray*; jele Gy, és $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$. (Régi egysége a *rad*, $1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$.)

A sugárvédelmi gyakorlatban használjuk a "**szervdózis**" fogalmát, mely egy szövetben vagy szervben az átlagos elnyelt dózis.

Minden dózismennyiséghez hasonlóan az elnyelt dózis időegységre jutó hányadát elnyelt *dózteljesítménynek* nevezzük, egysége Gy/s. A környezeti ellenőrzéseknél elterjedt a nGy/h mértékegység.

Egyenérték dózis (Jele: HT)

A tapasztalat szerint a károsító hatást az elnyelt dózis mellett a sugárzás típusa és energiája is meghatározza. Ezt az tulajdonságot a sugárvédelemben az egyenérték dózis fogalmának bevezetésével vesszük figyelembe. A definíció szerint az R típusú és minőségű sugárzásból a T szerv, ill. szövet egyenérték dózis sugárterhelése a következő:

$$H_{T,R} = W_R \cdot D_{T,R},$$

ahol:

W_R : a sugárzás fajtájára, minőségére jellemző súlytényező, dimenzió nélküli,

$D_{T,R}$: a T szövetben, az R sugárzásból eredő elnyelt dózis.

A $H_{T,R}$, (ill. a $H_T = \sum_R H_{T,R}$) egysége is J/kg, mely speciális nevet kapott, mégpedig: *sievert*, jele: Sv.

A W_R értékét a gamma-sugárzásra, definíciószerűen 1-nek vesszük és a többi sugárzást ehhez viszonyítjuk.

A W_R jellemzése:

- arányos az úthosszmenti fajlagos ionizációval (utóbbi egysége: ionpár·nm⁻¹, vagy ionpár · μ·m⁻¹), ill. az ezzel arányos **Lineáris Energia Transzfer (LET)** értékkel (a LET egysége: eV·nm⁻¹).

- szerepe hasonló mint korábban a Q sugárzás-minőségi tényezőnek, ill. RBE-nek (Relatív Biológiai Effektivitás)

Az 1. táblázat a W_R és LET értékeket mutatja.

1. táblázat. Az egyenérték dózist meghatározó sugárzási súlytényezők, ember esetén, a sugárvédelmi gyakorlat dózistartományában és a LET-érték vízben

Sugárzástípusok és energia tartományok	Sugárzási súlytényező, W_R	LET-érték (eV·nm ⁻¹)
Gamma-sugárzás	1	0,2-3,5
Elektronok*, müonok	1	0,2-1,1
Neutronok, energia < 10 keV	5	20
10 keV - 100 keV	10	-
100 keV - 2 MeV	20	50
2 MeV - 20 MeV	10	-
> 20 MeV	5	-
Protonok, energia > 2 MeV	5	-
Alfa-részecskék, nehéz magok, hasadási termékek	20	130

* kivétel a DNS-ben kötött nuklidokból származó Auger-féle elektronok esetén, ahol ún. mikrodozimetriai számítások szükségesek

Effektív dózis (Jele: E)

Szintén számolt dózismennyiség, az egyes szervek, szövetek egyenérték dózisének súlyozott összege és az egész testre jellemző.

$$E = \sum_T W_T \cdot H_T,$$

ahol W_T a szöveti súlyozó tényező.

A szöveti súlytényezők értéke 1-nél kisebb, és $\sum_T W_T = 1$.

Az effektív dózis az egyén egészére vonatkozik, ezért egésztest dózisének is nevezzük, egysége szintén a sievert (Sv).

A definíció alapján az effektív dózis megegyezik azzal az egésztestben egyenletes eloszlásban kapott dózissal, mely a késői sugárhatások (daganatos betegségek, öröklődő ártalmak stb.)

ugyanakkora kockázatával jár mint a szövetek külön-külön besugárzásával kapott szöveti dózisok együttesen. Ezért egésztést dózis alatt rendszerint effektív dózist értünk.

Mivel az effektív dózist az egyenérték dózis alapján határoztuk meg, szintén kevésbé használható a nagy (közel 1 Sv) sugárterhelések jellemzésére. A 2. táblázat szöveti súlytényezői is csak az ún. sugárvédelmi gyakorlat tartományára (évi, vagy egyszeri 0,1 - \approx 1000 mSv) vonatkoznak. Mindezért nagyobb sugárterheléseket célszerűbb az elnyelt dózissal és a sugárzás fajtájának, ill. energiájának megadásával jellemezni. Más élő szervezetek esetén sem használatos az effektív dózis, bár elviekben nincs akadálya a kiterjesztésnek, pl. más értékű súlytényezőkkel.

2. táblázat. Szöveti súlytényezők

<i>Szövet, szerv</i>	<i>Szöveti súlyozó tényező, W_T</i>
ivarszervek	0,20
vörös csontvelő	0,12
vastagbél	0,12
tüdő	0,12
gyomor	0,12
hólyag	0,05
emlő	0,05
máj	0,05
nyelőcső	0,05
pajzsmirigy	0,05
bőr	0,01
csontfelszín	0,01
összes többi együtt, maradék	0,05

További dózismennyiségek, fogalmak

Lekötött egyenérték és lekötött effektív dózis

A szervezetbe került radioaktív anyag sugárzásától eredő sugárterhelés (belső dózis) jellemzésére használatos a **lekötött dózis** (lekötött elnyelt dózis, lekötött egyenérték dózis stb.).

Az előbbieket alapján a lekötött effektív dózis definíciója, a radioaktív anyag inkorporáció időpontjától τ időtartamig összegezett (integrált) dózisa a következő összefüggéssel adható meg:

$$E(\tau) = \int E_{\text{teljesítm}}(t) dt,$$

ahol: $E_{\text{teljesítm}}(t)$ a t időpontban a dózisteljesítmény. Megállapodás szerint a sugárvédelmi szabályozásban a τ értéke gyermekeknél 70, felnőtteknél pedig 50 év.

A lekötött dózis tehát az egyszer a szervezetbe került sugárzó radionuklidból eredő dózis az egész élettartam, pontosabban 70 ill. 50 év alatt.

Dózislekötés

Amennyiben a lekötött dózist nem 50 ill. 70 évig, hanem igen hosszú időtartamra, elvileg végtelenig összegezzük, akkor dózislekötésről beszélünk.

Elsősorban egyszeri, nagyobb szennyeződések hatásának jellemzésére használjuk, amikor akár több generációra kiterjedő dózist határozzunk meg.

Besugárzás, expozíció (besugárzási dózis)

Csak rtg- és gamma-sugárzásra, valamint levegő elnyelő anyagra értelmezett mennyiség, az ionizáció mértéke, egyszerű a mérése. Ma már nem ajánlott dóziszfogalom.

$$X = dQ/dm ,$$

ahol dQ a dm tömegű levegőben keltett elektromos töltések, ionok mennyisége. SI egysége: $C \cdot kg^{-1}$ (C: coulomb), korábban a röntgen (R) volt és 1 R dózisu sugárzás esetén 1 kg levegőben $2,58 \cdot 10^{-4}$ C egynemű elektromos töltés keletkezik.

Lágy szövetekben 1 R-nek kb. 0,0088 Gy elnyelt dózis felel meg, csontszöveteknél ennél 20-30 %-kal nagyobb.

Közölt-dózis (kerma)

A közölt dózis, ill. a "*levegő-kerma dózis*" mennyiség elsősorban növények kapott dózisának jellemzésére használatos (a "kerma" angol mozaikszó: kinetic energy released to matter), mértékegysége megegyezik az elnyelt dózis egységével, azaz $J \cdot kg^{-1}$, ill. Gy. Ez esetben a sugárzás (rendszerint közvetve ionizáló sugárzás) által kiváltott töltött részecskéknek a kezdeti kinetikus energiáját használjuk dózismennyiségként.

RBE

Az *RBE* (relatív biológiai hatékonyság), a sugárzási súlytényezőnek megfelelő mennyiség, dózismérés során ma is használatos.

Kollektív dózis (Jele: S)

Több társadalmi vonatkoztatásban nemcsak egyének, hanem egy kollektíva vagy akár a népesség egészének a sugárterhelése is fontos lehet. Ennek mértékéül szolgál a kollektív dózis, melynek értéke a sugárterhelést elszenvedett egyedek egyéni dózisának összege. Ha az egyéni dózis szempontjából csoportokra osztható a kollektíva, akkor a csoportok átlagát szorozzuk a tagok számával és az így kapott értékeket adjuk össze.

A definícióból következik, hogy a kollektív dózis egysége a *személy.Sv* .

Dózisfogalmak használatának kiterjesztéséről

Általában mondható, amennyiben más élőlények esetén hasonló fogalmakat akarunk használni mint az embernél, akkor az eddig bevezetett W_R , és W_T súlytényező értékeket - különösen az utóbbit - módosítani kell. További nehézséget jelent, hogy a vizsgálandó dózistartomány sokkal nagyobb mint embernél, azaz a súlytényezők dózistól való függését mindenképpen figyelembe kell venni. A kerma-dózis elsősorban azért használatos állati és növényi szervezetek dózisának meghatározásához, mert számos élőlény mérete olyan kicsi, hogy a másodlagos sugárzások egy része elhagyja a testet, azaz az elnyelt dózis kisebb, mint pl. ember esetén. Viszont a védekezés szempontjából az energiaátadás, a kerma-dózis jellemzőbb lehet mint az elnyelt dózis.

Dózismérés, dózisegyenértékek, dózismennyiségek összehasonlítása

Dózismérések reprodukálhatósága, kalibrálás,

Elsősorban az egyenérték dózis és az effektív dózis közelítésére, de a mérések összehasonlíthatósága, reprodukálhatósága, azaz a gyakorlati dozimetria érdekében az ICRU (International Committee on Radiation Units and Measurements) nemzetközi szervezet az emberi törzs méretének és összetételének hasonlóságára bevezette az un. ICRU gömb fantomot.

ICRU fantom: átmérője 30 cm, sűrűsége $1 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, összetétele: O: 76,2 %, C: 11,1 %, H: 10,1 % és N: 2,6 %.

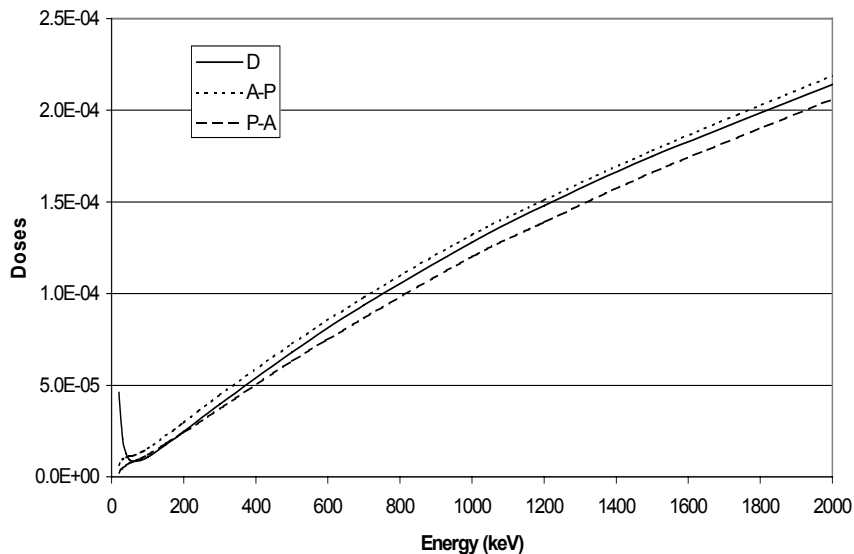
A gömb különböző mélységű helyén, akár különböző irányból, különböző típusú sugárással végzett besugárzások mellett kapott dózis- ill. dózisteljesítmény értékekkel lehet kalibrálni, hitelesíteni a mérőeszközöket. Az így definiált mennyiségek a **dózisegyenértékek**, ezek egysége is a Sv (ill. $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$).

A területellenőrzésnél, akár munkahelyen is használatos a **környezeti dózisegyenérték - jele: $H^*(d)$** - amely a sugárzási tér egy adott pontjában elhelyezett ICRU-fantom d mélységében mért dózist jelenti, ha egyirányú a sugárzás, akkor a sugárzás irányával ellentétes oldalon. Erősen áthatoló (γ -) sugárzás esetén $d=10$ mm, gyengén áthatoló (β -) sugárzásnál $d=0,07$ mm az ajánlott mélység.

A személyi ellenőrzés esetén ajánlott az un. **személyi dózisegyenérték – jele $H_p(d)$** – használata, mérése a fantomban. A $d=10$ mm esetén mért érték elsősorban a lágy szövetekre vonatkozó dózist jellemzi, $d=3$ mm a szemlencse dózis, míg a $d=0,07$ mm mélység a bőr sugárterhelésének meghatározására alkalmas.

Természetesen az így definiált dózisegyenérték mennyiségek alkalmazása az emberi sugárterhelés jellemzésére is vitatható, viszont az igaz, hogy az egyes detektorok, mérőeszközök segítségével hatékonyan összehasonlíthatók különböző típusú sugárzások és sugárzási terek esetén, szinte a földkerekség minden laboratóriumában.

Az emberi dózis meghatározásánál figyelembe kell venni az emberi test sugárszóródó és árnyékoló hatását, különösen, ha az egyes szervek sugárterhelését kell meghatározni. Ekkor nem mindegy, hogy oldalt, vagy elölről történik a besugárzás, vagy az emberi szervezetbe került radioaktív anyag sugárzásából származik a dózis. Mindez a viszonylag nagy áthatolóképeséggel bíró γ - és röntgen-sugárzás esetén is fennáll, különösen a 100 keV-nál kisebb energiájú sugárzásnál (lásd 2.ábra).



2. ábra. Az 1 foton/s pontforrástól eredő dózisteljesítmények, 1 m távolságban, a foton-energia függvényében (D: a levegőben elnyelt dózisteljesítmény más elnyelő anyag nélkül, nGy/h egységben, A-P, ill. P-A: az effektív dózisek nSv/h egységben, AP ill. PA irányú sugárnyaláb és emberi test esetén).

Dózismennyiségek összehasonlítása

Az eddig bevezetett dózismennyiségek nagyrésze összefoglalóan, elsősorban használatuk és érvényességük összehasonlítása céljából a 3. táblázatban szerepelnek. Bár a rövidített megfogalmazások esetenként elnagyoltak, de általában is mondható, hogy a használt fogalmak, mennyiségek definíciói, érvényességük értelmezése, a dozimetriai mérési eljárások még számos tisztázatlan kérdést tartalmaznak és a fogalmak használata sem egyértelmű. Különösen áll ez a speciális dózismennyiségek esetén. Igaz ezen nem is lehet csodálkozni, ugyanis már egy sejt, de különösképpen egy emberi szervezet meglehetősen bonyolult ahhoz, hogy az egészségkárosító hatást egy számérték, a dózismennyiség alapján megítéljük. Pedig a sugárdózis mérésével, becslésével éppen arra kívánunk ismereteket szerezni, hogy mekkora hatás várható hetekkel, hónapokkal, esetleg évekkel később rosszindulatú daganat formájában, hogy a szükséges védelmi intézkedést, akár a gyógyítást a lehető legkorábban elkezdhessük.

3. táblázat. Dózismennyiségek összefoglaló táblázata

Megnevezése és jele	Rövid meghatározása	Mértékegység	Érvényessége, megjegyzések
Elyelt dózis, D	Sugárzás révén elnyelt energia osztva az elnyelő tömeggel	Gy (J kg^{-1})	Mindenfajta ionizáló (esetenként nemionizáló) sugárzásra és mindenféle elnyelő anyagra (élettelenre is) értelmezhető. Egymagában nem jellemzi a biológiai hatás mértékét
Egyenérték dózis, H_T	Elyelt dózis szorozva a sugárzás fajtájára jellemző súlytényezővel	Sv (J kg^{-1})	Elsősorban emberi szövetekre, szervekre, ≈ 1 Sv dóziséig használható. Jellemző a szövetek, szervek biológiai, egészségkárosító hatására. Kiterjeszthető más élőlényekre is.
Effektív dózis, E	Egyenérték dózis és a szöveti súlytényezők szorzatának összege	Sv (J kg^{-1})	Emberi egészségre, ≈ 1 Sv dóziséig. A szöveti súlytényezők összege = 1. Megkötésekkel kiterjeszthető
Környezeti dózisegyenérték, $H^*(d)$	ICRU-fantomban, különböző mélységben és irányban mért dózis	Sv	Terület- és munkahely ellenőrzésre, a H_T és E jellemzésére használt dózis
Személyi dózisegyenérték, $H_p(d)$	ICRU-fantomban, különböző mélységben és irányban mért dózis	Sv	Személyi sugárterhelésre, a H_T és E jellemzésére használt dózis
Besugárzási dózis	Levegőben keletkező elektromos töltés és tömeg hányadosa	R, röntgen ($1 \text{ R} = 2,6 \cdot 10^{-4} \text{ C kg}^{-1} \approx 0,009 \text{ Gy}$)	Csak γ - ill. röntgen sugárzás és levegő elnyelő közeg esetén érvényes. Könnyen mérhető, de nem illeszkedik a SI-ba, ezért használata nem ajánlatos
Lekötött dózis	Szervezetbe került radioaktív anyagoktól, 70 ill. 50 év időtartamra integrálva	Gy, Sv	Csak belső dózishoz, értékét a radioaktív bomlás és a felszívódás ill. kiürülés sebessége határozza meg
Kollektív dózis, S	Több személyre, egy populáció egyéni dózisainak összege	személy Gy, személy Sv	Sztochasztikus sugárhatásnál, néhány mSv-től néhány 100 mSv-ig használatos, társadalmi kockázat jellemzésére
Dózis-lekötés	Szervezetbe került radioaktív anyagoktól, $t=\infty$ -ig integrálva	Elsősorban személy Gy ill. személy Sv	Egy hirtelen szennyeződést követően, több generációra kiterjedő kollektív dózis

Irodalom:

Rontó Gy., Tarján I. (szerk.): A biofizika alapjai. Medicina Kiadó, Budapest, 1995 (10. kiadás)

Köteles Gy. (szerk): Sugáregészségtan. Medicina Könyvkiadó, Budapest 2002.

Kanyár B., Béres Cs., Somlai J., Szabó S. A.: Radioökológia és környezeti sugárvédelem. Veszprémi Egyetemi Kiadó, Veszprém, 2004 (2. kiadás)