

Szerven belül egyenetlen dóziseloszlások és az LNT-modell

Madas Balázs Gergely*, Balásházy Imre
Magyar Tudományos Akadémia Energiatudományi Kutatóközpont
1121 Budapest, Konkoly-Thege Miklós út 29-33.
*madas.balazs@energia.mta.hu

Title and Abstract – Inhomogeneous suborgan dose distributions and the LNT-model. In the current system of radiation protection, linear relation between risk of stochastic effects and effective dose is assumed. Effective dose being the weighted sum of absorbed organ doses is independent of the suborgan dose distribution. However, there are experiments suggesting that risk is a non-linear function of absorbed dose and thus it depends on the suborgan dose distribution. The objective of the present work is to study how inhomogeneous dose distribution may influence the risk in case of different dose–effect relationships with the example of inhaled radon progeny. Results show that the risk is independent of the suborgan dose distribution if the dose–effect relationship is linear. However, it can be concluded that if there is a low dose range where the dose–effect relationship is not linear then the threshold of this dose range is lower for inhomogeneous than for homogeneous spatial dose distributions.

Keywords – LNT-model, spatial dose distribution, radon progeny

Note – An extended version of this paper can be found in Balázs G. Madas's PhD dissertation (in Hungarian) and among the proceedings of 13th IRPA Congress (in English). Citation data can be found in the reference section.

Kivonat – A sugárvédelem jelenlegi rendszere a sztochasztikus hatások kockázata és az effektív dózis között lineáris összefüggést feltételez. Az effektív dózis a szervekben elnyelt dózisok átlaga, így független a szerven belüli dóziseloszlástól. Ugyanakkor számos kísérlet utal arra, hogy a kockázat nemlineáris függvénye az elnyelt dózissal, és ezért szükségképpen függ a szerven belüli terhelésseloszlástól. Ebben a munkában a belélegzett radon-leányelemek példáján azt vizsgáljuk, hogy az egyenetlen terhelésseloszlás hogyan befolyásolhatja a kockázatot különböző dózis-hatás összefüggések esetén. Az eredmények azt mutatják, hogy a kockázat független a szerven belüli dóziseloszlástól, ha a dózis-hatás összefüggés lineáris. Ugyanakkor megállapítható, hogy ha létezik egy kis dózis tartomány, ahol a dózis-hatás összefüggés nem lineáris, akkor e dózistartomány határa egyenetlen dóziseloszlások esetén kisebb, mint egyenletes terhelésseloszlások esetén.

Kulcsszavak – LNT-modell, térbeli dóziseloszlás, radonleányelemek

Megjegyzés – A cikk bővebb változata megtalálható Madas Balázs Gergely doktori értekezésében, illetve angolul a 13. IRPA kongresszus konferenciáinak között. A pontos hivatkozási adatok megtalálhatóak az „Irodalom” fejezetben.

BEVEZETŐ

A sugárvédelmi szabályozás jelenlegi rendszere részben azon a feltevésen alapul, hogy a sugárterhelés sztochasztikus hatásának valószínűsége egyenesen arányos az effektív dózissal. Az effektív dózis a szövetekben elnyelt dózisok súlyozott összege, és ezért független a terhelés szerven belüli térbeli eloszlásától. Sugárbiológiai kísérletek viszont olyan jelenségekre mutattak rá, amelyek szerepet játszhatnak a rák kialakulásában, de mértékük nem egyenesen arányos az elnyelt dózissal. E jelenségek közé tartoznak a szomszédhatások [1], az adaptív válasz [2] és a genomikai instabilitás is [3]. Ezek a nemlineáris jelenségek mikroszkopikus skálán (is) megfigyelhetők, és ezért arra utalnak, hogy az ionizáló sugárzás sztochasztikus hatásainak kockázata a szerven belüli terhelésseloszlástól is függhet.

A kísérleteken kívül egy elvi megfontolás is felveti a kérdést, hogy a kockázatbecslés során figyelmen kívül hagyható-e a szerven belüli terheléseloszlás. Ha ugyanis a kockázat független a mikroszkopikus terheléseloszlástól, akkor az azt is jelenti, hogy adott sugárfajta esetén 0,1 J ionizáló energia ugyanazt a makroszkopikus hatást váltja ki attól függetlenül, hogy egy szerv egészében, annak felében vagy negyedében, esetleg egyetlen sejtjében nyelődik el. Ez a természettől idegennek tűnik.

Természetesen a sugárvédelemnek nem célja, hogy olyan esetekben adjon útmutatást a szabályozásra nézve, amelyek a valóságban gyakorlatilag nem fordulnak elő. Miután azonban a radonleányelemek, amelyekből a háttérsugárzás legnagyobb része származik, igen egyenetlen terheléseloszlást eredményeznek a tüdőben [4–7], az elnyelt dózis térbeli eloszlásának szerepére vonatkozó kérdés nem csupán elméleti, a válasznak gyakorlati következményei is lehetnek.

Ebben a munkában azt vizsgáljuk, hogy hogyan lehet bevezetni az effektív dózis számításának egy új módját, amellyel figyelembe vehető a sugárterhelés szerven belüli egyenetlensége. A légutakban kiülepedő radonleányelemek példáján azt is tanulmányozzuk, hogy a kis dózis tartományban mikroszkopikusan megfigyelhető nemlineáris jelenségek, hogyan mutakozhatnak meg makroszkopikus szinten egyenletes és egyenetlen terhelések esetén.

MÓDSZEREK

A válaszadó egységek definiálása

Annak érdekében, hogy figyelembe lehessen venni a szerven belüli terheléseloszlást, a szerveket kisebb egységekre kell felosztani. Ezeket a kisebb egységeket a továbbiakban szövetegységekre nevezzük. Az elnyelt dózisokat és az egyenértékdózisokat ezekre a szövetegységekre vonatkozóan számítjuk ki, majd az effektív dózis meghatározásánál az egyes szövetegységekhez tartozó egyenértékdózisokat összegezzük valamilyen súlyozással. Az összegzésből következik, hogy a különböző szövetegységekhez rendelt biológiai hatásokat egymástól függetlennek tekintjük. Ez az egyszerűsítés tekinthető túlzottnak, azonban ugyanilyen egyszerűsítés jellemzi a jelenlegi sugárvédelmi szabályozást, csak ott nem a szövetegységeken, hanem a szerveken bekövetkező biológiai változások függetlenségét feltételezik. Az új módszer tehát nem a szerveket, hanem a szövetegységeket tekinti a sztochasztikus hatások szempontjából lényeges válaszadó egységnek.

Az egyszerűség kedvéért csak a tüdőt vizsgáljuk, és nem vesszük figyelembe a többi szerv terhelését. Sőt, miután a tüdőbeli terheléseloszlás sem ismert megfelelő pontossággal, azaz a szövetegységek méretének megfelelő felbontással, ezt az eloszlást azzal a dóziseloszlással közelítjük, amely a centrális légutak egy öt elágazásból álló egységét jellemzi, és amelyre vonatkozóan ismert az α -részecskék találati eloszlása. Ezt a találati eloszlást Szőke és társainak számításaiból vettük át [8]. Az eloszlás csak a belégzés során kiülepedő radonleányelemekből származó α -részecskéket tartalmazza, a kilégzés során kiülepedőkből származóakat nem. Emellett a számításokban a mukociliáris tisztulásnak a részecskék térbeli eloszlására gyakorolt hatását sem vettük figyelembe.

A dóziseloszlás és ebből fakadóan a becsült biológiai hatás függ a szövetegységek méretétől. Emiatt nem magától értődő feladat megfelelő méretet választani, ha figyelembe szeretnénk venni mind a matematikai, mind a biológiai szempontokat. Mindazonáltal e tanulmány célja nem az, hogy az újonnan bevezetett módszer segítségével becslést adjon a nominális kockázat, illetve az effektív dózis értékére, sokkal inkább arra kíván rávilágítani, hogy milyen minőségi következményekkel járhat az egyenetlen terheléseloszlás, illetve ez hogyan kezelhető a jelenlegi szabályozással konzisztens módon. E célok szempontjából sem a szövetegységek választott mérete, sem pedig az eddig megfogalmazott közelítések nem

lényegesek. A szövetegységek átlagos alapterülete $250\ \mu\text{m} \times 250\ \mu\text{m}$, vastagsága pedig $57,8\ \mu\text{m}$. Utóbbi méret a nagy hörgőkre jellemző [9], míg az alapterület összhangban van a szomszédhatás hatótávolságára vonatkozó becslésekkel ($0,1\ \text{mm}$ [10], illetve $0,21\ \text{mm}$ [11]).

A szövetegységekhez rendelt súlyfaktorok

A szövetegységekben elnyelt dózisok meghatározása után, a szövetegységekhez tartozó súlytényezők bevezetésére van szükség. Annak érdekében, hogy a számítás konzisztens legyen azzal, amit a jelenlegi sugárvédelem alkalmaz, szükséges, hogy a szervet egyenletesen érő terhelések esetén az új számítási módszer ugyanarra az effektív dózisa és ugyanarra a nominális kockázatra vezessen, mint a jelenlegi definíciók. Ennek a feltételnek úgy tehetünk eleget, ha előírjuk, hogy az adott szervhez tartozó szövetegységek súlytényezőinek ($w_{TU,i-k}$) összege egyenlő legyen a sugárvédelemben alkalmazott, adott szervre vonatkozó súlytényezővel (w_T):

$$\sum_i w_{TU,i} = w_T \quad (1)$$

Miután nem tudunk arról, hogy a tüdő hámszövetének különböző részei eltérő sugárérzékenységgűek lennének, azonos súlytényezőket adunk az egyes szövetegységeknek, pontosabban a szövetegységek súlytényezői arányosak azok tömegével ($m_{TU,i}$), ugyanis a szövetegységek nem teljesen azonos méretűek:

$$w_{TU,i} = \frac{m_{TU,i}}{m_T} w_T \quad (2)$$

Itt m_T a szerv tömegét jelöli.

Az effektív dózis és az egyenértékdózis alternatív definíciója, illetve az alkalmazott mikroszkopikus válaszfüggvények

A szövetegységekhez rendelt súlytényezők meghatározása után, az (alternatív) effektív dózist (E) a következő kifejezéssel definiáljuk:

$$E = \sum_i w_{TU,i} \cdot \sum_j w_{R,j} \cdot D_{i,j} \quad (3)$$

Itt $w_{R,j}$ a sugárzási súlytényezőt, $D_{i,j}$ pedig a j . sugárforrásból eredő és az i . szövetegységben elnyelődött dózist jelöli. Feltételezzük, hogy a tüdőn kívül más szervet nem ér sugárzás. A (3) kifejezésből az is látszik, hogy az i . szövetegységhez tartozó egyenértékdózis ($H_{E,i}$) az alábbi képletből adódik:

$$H_{E,i} = \sum_j w_{R,j} \cdot D_{i,j} \quad (4)$$

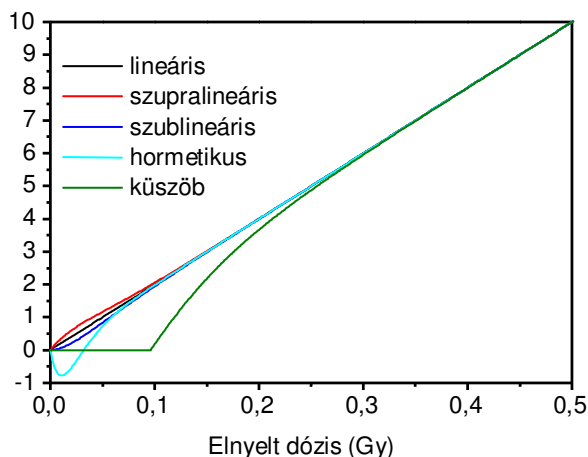
Az effektív dózis előbbi bekezdésekben bemutatott definíciójában nem a szervi átlagdózisok, hanem a szövetegységek átlagdózisai szerepelnek. Ebből fakadóan azt is megvizsgálhatjuk, hogy a mikroszkopikus szinten megfigyelhető, sztochasztikus hatásokban feltételezhetően szerepet játszó, ugyanakkor a kis dózis tartományban nemlineáris válaszfüggvényű jelenségek hogyan mutatkozhatnak meg makroszkopikus szinten. Fontos megjegyezni, hogy az ezeket a jelenségeket jellemző dózis–hatás függvények számos tényezőtől függenek, és ezért nem könnyen leírhatóak. Ebben a munkában azonban nem szükséges, hogy pontos összefüggéseket vegyünk figyelembe. Elegendő, ha a lineáris mellett (5) négy, egymástól alapvetően különböző függvény esetét vizsgáljuk, melyek közelítőleg lineárisra válnak egy bizonyos küszöbdózis felett, alatta azonban nemlineárisak, és durván leírhatják bizonyos biológiai mennyiségek dózisfüggését (6–9). Ezeket a függvényeket a szövetegységekhez rendelt egyenértékdózis kiszámításánál alkalmazzuk. A függvények az 1. ábrán, az azokat leíró kifejezések pedig az 1. táblázatban láthatóak.

1. táblázat. Az i . szövetegységre vonatkozó lineáris és alternatív egyenértékdózis definíciók, ha a szövet csak egyféle sugárzási súlyfaktorú (w_R) sugárzásnak van kitéve, és az ebből származó elnyelt dózis D_i

Rövid név	Alternatív egyenértékdózis	
lineáris	$H_{E,i} = w_R \cdot D_i$	(5)
szupralineáris	$H_{E,i} = w_R \cdot D_i \cdot (1 + \exp(-36 \text{ Gy}^{-1} \cdot D_i))$	(6)
szublineáris	$H_{E,i} = w_R \cdot D_i \cdot (1 - \exp(-36 \text{ Gy}^{-1} \cdot D_i))$	(7)
hormetikus	$H_{E,i} = w_R \cdot D_i \cdot (1 - 10 \cdot \exp(-72 \text{ Gy}^{-1} \cdot D_i))$	(8)
küszöb	$H_{E,i} = \begin{cases} 0 & , \text{ ha } D_i \leq 96 \text{ mGy} \\ w_R \cdot D_i \cdot (1 - 10 \cdot \exp(-24 \text{ Gy}^{-1} \cdot D_i)) & , \text{ ha } D_i > 96 \text{ mGy} \end{cases}$	(9)

Az α -nyomok szövetegységeken való eloszlásának meghatározásához szükséges számítási idő a belélegzett részecskék számával növekszik. Emiatt az eloszlásra vonatkozó, korábbi szimulációkból nyert adatok legfeljebb 0,0129 WLM terhelésnek és körülbelül 0,5 mGy átlagos szövetdózisnak felelnek meg [7,8]. Ennél a terhelésnél a szövetegységek jelentős hányada nem lép kölcsönhatásba α -részecskékkel. Ahhoz, hogy a dózis-hatás összefüggést a 0 és 0,5 mGy közötti intervallumon kívül is meg lehessen vizsgálni, valamilyen extrapolációra van szükség. Az egyszerűség kedvéért azt feltételezzük, hogy az α -találateloszlás a szövetegységek között nem változik a terhelés növekedésével 0,0129 WLM felett. Ez a feltevés éppen a nem eltalált szövetegységek nagy száma miatt bizonyosan nem igaz. Az el nem talált szövetegységek jelentőségét oly módon lehet vizsgálni, hogy megnézzük, mi történik akkor, ha az egyenetlen terhelés mellett egy egyenletes terhelés is jelen van. Például figyelembe vehető egy β -sugárzásból származó, egyenletesnek tekintett terhelés. Az ebből származó eredményeket itt terjedelmi korlátok miatt nem mutatjuk be, de korábbi munkáinkban megtalálhatóak [12,13].

Alternatív egyenértékdózis ("Sv")



1. ábra. A lineáris és az alternatív egyenértékdózisok az elnyelt dózis függvényében, ha a szövet kizárólag α -sugárzás éri, és az elnyelt dózis az egész szerve vonatkoztatott átlag

EREDMÉNYEK

A 2. ábra az alternatív effektív dózist mutatja be az átlagos szervdózis függvényében, ha csak az α -sugárzást vesszük figyelembe. A felső vízszintes tengelyen WLM-ben megadott terhelést a radonra vonatkozó dóziskonverziós együttható [15 mSv/WLM, 14] felhasználásával becsültük meg. Az értékek itt még inkább tájékoztató jellegűek, hiszen a dóziskonverziós együttható meghatározásában mind a többi sugárfajtát, mind pedig a többi szerv terhelését figyelembe vesszük. A jobb oldali tengelyen látható alternatív nominális kockázat úgy adódik, hogy az alternatív effektív dózist megszorozzuk a jelenleg alkalmazott $0,05 \text{ mSv}^{-1}$ együtthatóval. Az ábra felső paneljén az az eset látható, amikor az egyenértékdózist a szervre átlagolt elnyelt dózissal számoljuk, azaz nem vesszük figyelembe a terheléseloszlást. A középső panel görbéinek meghatározásánál azt feltételeztük, hogy az α -részecskék véletlenszerűen, egyenletes eloszlás szerint találják el a különböző szövetegységeket, azaz ekkor sem vesszük figyelembe a valódi kiüledéseloszlást, viszont az effektív dózis már nem a szervre, hanem a szövetegységekre átlagolt dózis függvénye. Az alsó panel esetében figyelembe vesszük az α -találatok szövetegységek közötti eloszlását. Ennek természetesen csak akkor van értelme, ha az elnyelt dózist a szövetegységekre, és nem a szervre vonatkozóan számítjuk ki.

A fekete görbék mindhárom panelnél azt az esetet mutatják, amikor az alternatív effektív dózis (illetve a felső panelnél a tényleges, azaz nem alternatív effektív dózis) lineáris függvénye az elnyelt dózisnak, illetve az elnyelt dózisoknak. Látható, hogy ebben az esetben az effektív dózis, illetve az alternatív effektív dózisok függetlenek a szervben belüli dóziseloszlástól. Ez az eredmény várható volt, hiszen csupán egy matematikai azonosságra mutat rá. Ha a (3) egyenletben $w_{TU,i}$ -t kicseréljük a (2) kifejezést felhasználva, illetve az i . szövetegységben elnyelődött dózist ($D_{i,j}$) az ott elnyelt energia ($E_{i,j}$) és a szövetegység tömegének ($m_{TU,i}$) hányadosaként írjuk, akkor az alábbi összefüggéshez jutunk:

$$E = \sum_i \frac{m_{TU,i}}{m_T} w_T \cdot \sum_j w_{R,j} \cdot \frac{E_{i,j}}{m_{TU,i}}. \quad (10)$$

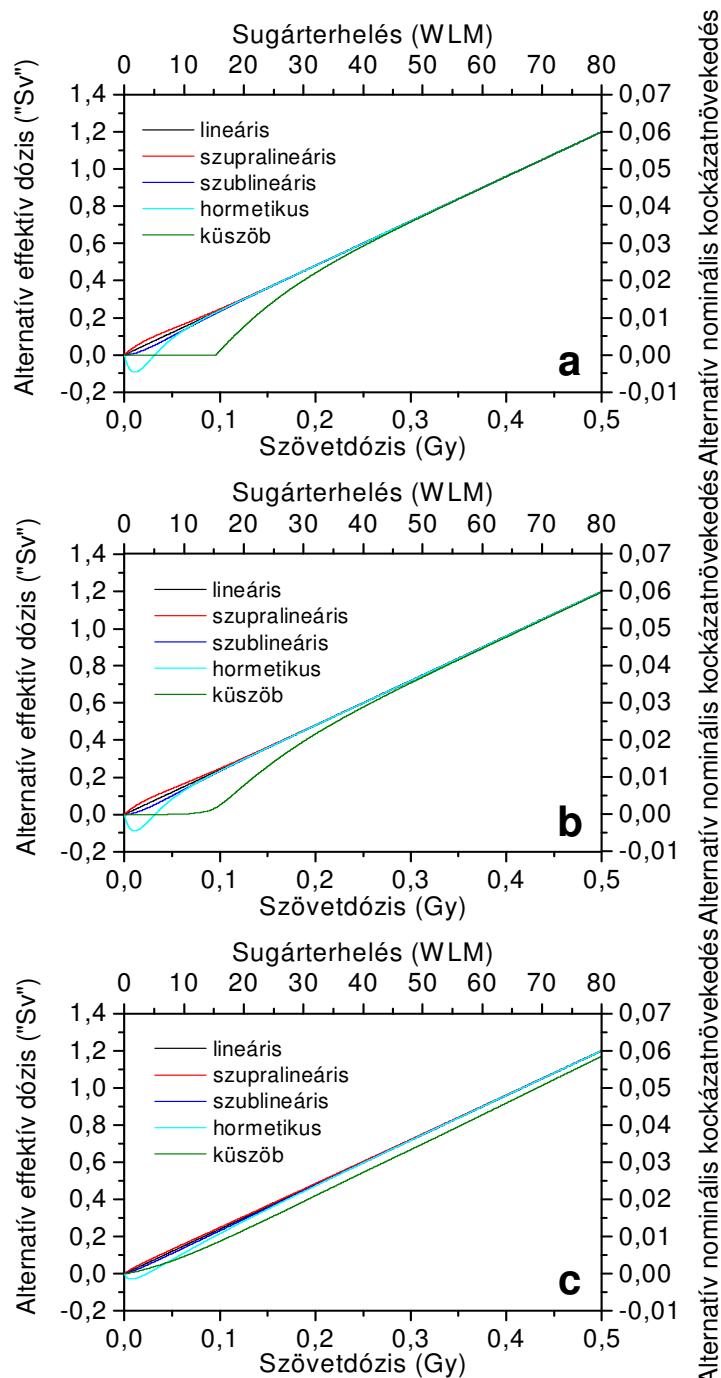
Felcserélve az összegzések sorrendjét az alábbi kifejezés adódik:

$$E = w_T \cdot \sum_j w_{R,j} \cdot \frac{\sum_i E_{i,j}}{m_T}. \quad (11)$$

ahol a tört egyenlő a j . sugárfajtából származó, a szervben átlagosan elnyelt dózissal. Ez azt jelenti, hogy visszakaptuk a sugárvédelemben alkalmazott, effektív dózissal vonatkozó definíciót arra az esetre, ha csak egy szervet ér sugárterhelés. Ettől függetlenül általában véve is igaz, hogy ha a szövetegységekre vonatkozó súlyfaktorokat a (2) kifejezéssel vezetjük be, és az alternatív egyenértékdózis lineáris függvénye az elnyelt dózisoknak, akkor az alternatív effektív dózis egésztest-besugárzások esetén is független attól, hogy mekkora tömegre vonatkozóan számítjuk ki az elnyelt dózisokat. Azaz teljesen lényegtelen, hogy a kicsiny szövetegységeket vagy a szerveket tekintjük az ionizáló sugárzásra adott válasz szempontjából megfelelő egységeknek.

Összehasonlítva a 2. ábra felső és középső paneljét látható, hogy a küszöbnél, ahol a zöld görbe emelkedni kezd, a középső panelnél nincs olyan éles törés, mint a felső panel esetében. Ennek az a magyarázata, hogy ha az α -részecskék találati eloszlása véletlenszerű, akkor egyes szövetegységeken az elnyelt dózis előbb eléri a 96 mGy-es küszöböt, mint az egész szervre számított átlag. Emiatt az átmenet jóval simább. A többi görbe esetén nincsenek olyan jelentős különbségek a felső és a középső panel között. Ez azt mutatja, hogy egyenletes terheléseloszlás esetén a szövetegységek bevezetése felesleges, vagy legalábbis az alkalmazott átlagos szövetegységméret mellett felesleges. Másként fogalmazva az elnyelt

dózist még akkor is lehet a szervekre átlagolni, ha a dózis–hatás összefüggés nem egészen lineáris a kis dózisok tartományában, de a terheléseloszlás egyenletes.



2. ábra Az alternatív effektív dózisok a szervben átlagosan elnyelt dózis függvényében, ha az egyenértékdózist az átlagos szervdózisból (felső, **a** panel), az egyenletes α -találat-eloszlás esetén kialakuló szövetegységekben elnyelt dózisokból (középső, **b** panel), illetve a valódi terheléseloszlás esetén kialakuló szövetegységekben elnyelt dózisokból (alsó, **c** panel) számoljuk, és ha a szervet kizárólag α -sugárzás éri

Ha a 2. ábra alsó paneljét hasonlítjuk össze a felső és a középső panellel, akkor már több különbséget figyelhetünk meg. Ebben az esetben ugyanis valamennyi nemlineáris függvény jóval inkább odasimul a lineárishoz az egyenetlen terheléseloszlás esetén, mint akkor, ha az eloszlás egyenletes, illetve akkor, ha az effektív dózis nem a szövetegységekre, hanem a szerve átlagolt dózisok függvénye. Ugyanakkor az is megfigyelhető, hogy az a dózistartomány, ahol a nemlineáris görbék láthatóan eltérnek a lineáristól, szélesebb akkor, ha a terhelés egyenetlen, és ezt figyelembe is vesszük a szövetegységekre számolt dózisokkal. Miután azonban a görbék közötti legnagyobb eltérés jóval kisebb az egyenetlen eloszlás esetében, feltételezhető, hogy a kis dózis tartományban esetlegesen jelenlévő nemlinearitások jelentősége a sztochasztikus hatások szempontjából kisebb az egyenetlen terheléseknél, mint az egyenleteseknél.

KÖVETKEZTETÉSEK

Az előbbieken a radonleányelemek példáján bemutattuk, hogy a sugárterhelés egyenletlenségét nem szükséges, de nem is lehetséges figyelembe venni, ha a nominális kockázat, az effektív dózis és az egyenértékdózis lineáris függvényei az elnyelt dózissal. A sugárbiológiai kísérletekből sejthető, a kis dózis tartományban mikroszkopikusan megfigyelhető nemlineáris dózisfüggésű jelenségek miatt azt is megvizsgáltuk, hogy milyen makroszkopikus következményei lehetnek a szerven belüli egyenetlen terheléseloszlásnak, ha a sztochasztikus hatások kockázata és az elnyelt dózisok közötti összefüggés a kis dózis tartományban nemlineáris. Az eredmények azt mutatják, hogy a kis dózis tartományra jellemző nemlinearitások jelentősége egyenetlen terheléseloszlás esetén kisebb, mint egyenletes terheléseloszlások esetén. Számolásaink alapján a kis dózis tartományra jellemző, nemlineáris dózisfüggésű jelenségek jelentősége kisebb a belélegzett radonleányelemek tüdőre gyakorolt hatása esetén, mint olyan sugárforrásoknál, melyek térben egyenletes sugárterhelést eredményeznek. Mindezekből látható, hogy bár a sugárterhelés térbeli eloszlása miatt a radon-terhelésből származó egészségi hatás ugyanakkora dózissal valószínűsíthetően egészen más, mint egyenletes terhelések esetén, a sugárvédelem jelenlegi feltételezései mellett ennek kezelésére nincs mód.

IRODALOM

- [1] Blyth B. J. & Sykes P. J., 2011, „Radiation-induced bystander effects: what are they, and how relevant are they to human radiation exposures?” *Radiat Res*, **176**(2), pp. 139–157.
- [2] Tapio S. & Jacob V., 2007, „Radioadaptive response revisited” *Radiat Environ Biophys*, **46**(1), pp. 1–12.
- [3] Morgan W. F., Day J. P., Kaplan M. I., McGhee E. M. & Limoli C. L., 1996, „Genomic instability induced by ionizing radiation” *Radiat Res*, **146**(3), pp. 247–258.
- [4] Szőke I., Farkas Á., Balásházy I. & Hofmann W., 2008, „Modelling of cell deaths and cell transformations of inhaled radon in homes and mines based on a biophysical and microdosimetric model” *Int J Radiat Biol*, **84**, pp. 127–138.
- [5] Balásházy I., Farkas Á., Madas B. G. & Hofmann W., 2009, „Non-linear relationship of cell hit and transformation probabilities in a low dose of inhaled radon progenies” *J Radiol Prot*, **29**, pp. 147–162.
- [6] Farkas Á., Hofmann W., Balásházy I., Szőke I., Madas B. G. & Moustafa M., 2011, „Effect of site-specific bronchial radon progeny deposition on the spatial and temporal distributions of cellular responses” *Radiat Environ Biophys*, **50**, pp. 281–297.

- [7] Madas B. G., Balásházy I., Farkas Á. & Szőke I., 2011, „Cellular burdens and biological effects on tissue level caused by inhaled radon progenies” *Radiat Prot Dosim*, **143**, pp. 253–257.
- [8] Szőke I., Farkas Á., Balásházy I. & Hofmann W., 2009, „Stochastic aspects of primary cellular consequences of radon inhalation” *Radiat Res*, **171**, pp. 96–106.
- [9] Mercer R. R., Russell M. L. & Crapo J. D., 1991, „Radon dosimetry based on the depth distribution of nuclei in human and rat lungs” *Health Phys*, **61**, pp. 117–130.
- [10] Gaillard S., Pusset D., De Toledo S. M., Fromm M. & Azzam E. I., 2009, „Propagation distance of the alpha-particle-induced bystander effect: the role of nuclear traversal and gap junction communication” *Radiat Res*, **171**(5), pp. 513–520.
- [11] Leonard B. E., 2009, „The range of the bystander effect signal in three-dimensional tissue and estimation of the range in human lung tissue at low radon levels” *Radiat Res*, **171**(3), pp. 374–378.
- [12] Madas B. G. & Balásházy I., 2012, „Possible consequences of inhomogeneous suborgan distribution of dose and the linear no-threshold dose-effect relationship.” 13th International Congress of the International Radiation Protection Association, Glasgow, Skócia, TS1a.6, pp. 1–9
- [13] Madas B. G., 2012, „Az ionizáló sugárzás biológiai hatásainak szövetszintű modellezése” doktori értekezés, Eötvös Loránd Tudományegyetem.
- [14] Al-Jundi J., Li W. B., Abusini M., Tschiersch J., Hoeschen C. & Oeh U., 2011, „Inhalation dose assessment of indoor radon progeny using biokinetic and dosimetric modeling and its application to Jordanian population” *J Environ Radioact*, **102**, pp. 574–580.

A pályamű a Somos Alapítvány támogatásával készült.