

A LÉGZŐRENDSZER RADONLEÁNYELEMÉK BOMLÁSÁBÓL SZÁRMAZÓ SUGÁRTERHELÉSÉNEK MODELLEZÉSE

Füri Péter

Energiatudományi Kutatóközpont, Budapest

Bevezetés

A radon és leányelemei

A légzés alapvető életfolyamat. A légzés során azonban számos folyadékcsépp és szilárd részecske is a felső légutakba, illetve a tüdőbe kerülhet. Ezek irritálhatják a légúti szöveteket, amely során számos légzőrendszeri betegség (például asztma) is kialakulhat. Emellett a légutakban kiülepedett, nagy részben a környezeti levegőben lévő aeroszolrészecskék felszínéhez tapadt radonleányelemek alfa- és béta-bomlása a természetes eredetű sugárterhelés fő forrása. A dohányzás után az ionizáló sugárzás e forrása tehető felelőssé a legtöbb tüdőrákos esetért [1]. A sugárvédelem fontos feladata tehát a radonleányelemek bomlásából származó sugárterhelés vizsgálata.

Gyakran hallani, hogy a radon belégzése komoly egészségi kockázatot jelent. Ez így azonban nem pontos megfogalmazás. A belélegzett radon ugyanis nemesgáz, nem tapad tehát hozzá a levegőben lebegő aeroszolrészecskékhez, ezért nem ülepedhet ki a tüdőben. Felezési ideje 3,8 nap, a légzőrendszerben azonban jellemzően csupán 2,5-5 másodpercet tölt, így a felső légutakban és a tüdőben töltött idő alatti bomlás valószínűsége igen kicsi.

A légutak sugárterhelése ezért nem a radon bomlásából, hanem leányelemeinek aeroszolrészecskék felszínéhez tapadtan (ez a kitapadt frakció) vagy egy ionként (ez a ki nem tapadt frakció) történő alfa- és béta-bomlásából származik. A leányelemek többsége kitapadt, azaz a radonleányelemnél sokkal nagyobb aeroszolrészecske felszínéhez kapcsoltnak jut a légzőrendszerbe. E radioaktív izotópokat hordozó aeroszolrészecskék, de még a ki nem tapadt radonleányelemek is diffúzióval, tehetetlenségüknél fogva és a gravitáció hatására is kiülepedhetnek a légutakban, így a radonnál jóval hosszabb időt, akár órákat is eltölthetnek a légzőrendszerben. A légutakban töltött

idő így a legtöbb esetben elegendő ahhoz, hogy elbomoljanak és bomlás közben alfa- és béta-részecskéket bocsássanak ki.

A ^{238}U bomlási sorának ^{218}Po -tól ^{210}Pb -ig terjedő szakaszában két alfa- és két béta-bomlás is található. A biológiai hatás szempontjából ezek közül jelentősebb a ^{218}Po és a ^{214}Po alfa-bomlása. A ^{218}Po egy 6 MeV-es, míg a ^{214}Po egy 7,69 MeV-es alfa-részecskét bocsát ki, amelyek a rövid hatótávolságukon belül nagy mennyiségű energiát adnak le, így biológiai hatásuk is jelentős lehet.

A légutakban található sugárérzékeny sejtek közül legfontosabbak a bazális és a kiválasztó sejtek. Ezek közel fekszenek a légutak belső falához, így a kibocsátott alfa-részecskék hatótávolsága számos esetben elegendő ezen sejtek örökítőanyagának eléréséhez. Azon sejtekben, ahol jelentős mennyiségű energia nyelődik el a sejtmagban, az örökítőanyag (DNS) sérüléseit nem minden esetben tudja javítani a humán szervezetre jellemző DNS javító mechanizmus.

Az örökítőanyag ki nem javított vagy a rosszul javított hibái mutációkat okozhatnak, amely következtében akár rákos sejtek is kialakulhatnak.

A humán légzőrendszer jellemző felépítése

E tanulmány módszereinek és eredményeinek megértéséhez szükséges a humán légzőrendszer főbb elemeinek bemutatása.

A légzőrendszer felső légutakra és tüdőre osztható fel. A felső légutak kifejezés az orrot, szájat, garatot, és a géget foglalja magában. A légzőrendszer e része szűri, előmelegíti és nedvesíti is a beszívott levegőt. Az orr sokkal jobb szűrő a szájnál, így nagy határfokkal szűri ki a kicsi (néhány nanométeres), valamint a nagy (több mikrométer átmérőjű) aeroszolrészecskéket is. A humán tüdő két része, a bronchiális (szétosztó) és az acináris (gázcsere végző) régió, amelyek bifurkációkból épülnek fel. Minden bifurkáció egy anyag feléből és két leányágának első feléből áll.

A belélegzett részecskék kiülepedéseloszlásának meghatározásához és a dózisszámításhoz be kell vezetnünk a légúti generáció fogalmát, amely lényegében a tüdő azonos számú elágazással elérhető része.

Az első légút, azaz a trachea és két leányágának első fele alkotja az első légúti generációt. Ugyanezt a logikát követve az első két leányág második fele és azok leányágainak első fele jelenti a második légúti generációt.

Az első légúttól indulva a tüdő első részében csak „vezető” légutak fordulnak elő, azaz ezek csupán a mélyebben fekvő légutak felé továbbítják a levegőt.

Készült a 30. Magyar Fizikus Vándorgyűlésen (Sopron, 2019. augusztus 21–24.) elhangzott előadás alapján.



Füri Péter 2013 óta dolgozik az Energiatudományi Kutatóközpontban. Fő feladata a Sztochasztikus Tüdőmodell alkalmazása és fejlesztése, amellyel lehetővé tette a légutak radonleányelemek bomlásából származó sugárterhelésének légúti generáció-felbontású szimulálását. Az elmúlt évek során kifejlesztett egy egyénre szabható radondozimetriai tüdőmodellt, amelyért 2019-ben elnyerte a Sugárvédelmi Nívódíjat, illetve a Fermi fiatal kutatói díjat is.

Ez a tüdő bronchiális (szétosztó) része. A tüdő mélyebben fekvő részében az egyre vékonyabb csövekben megjelennek a légzőhólyagok (alveolusok), itt történik a gázcsere. Ez a tüdő acináris (gázcseret végző) része.

A humán légutak tisztulási mechanizmusai

A légutakban még tiszta levegőt belélegezve is nagy mennyiségű szilárd és folyadék halmazállapotú részecske ülepedhet ki.

A felső légutak és a tüdő egészségének védelme szempontjából tehát fontos szerepet játszik a légzőrendszerre jellemző két tisztulási mechanizmus, a nyáktisztulás és a fagocitózis. A tüdő bronchiális légútjainak felszínét nyákréteg borítja, amelyet nagyszámú csilló összehangolt mozgása hajt a garat felé, ahonnan azután a nyelőcsőbe, majd a gyomorba kerülnek a nyák által szállított részecskék. Ez a nyáktisztulás.

A csillók, illetve az azt fedő nyákréteg méretéről érdemes tudni, hogy vastagsága a nagy átmérőjű bronchiális légutakban körülbelül 11 μm (lásd International Commission on Radiological Protection (ICRP) 66-os számú kiadványát), ám a légutakban lefelé haladva ez jellemzően csökken. A kis átmérőjű bronchiális légutak esetén például már csak 6 μm vastag a légutakat fedő nyák és az azt hajtó csillók rétege. A kitapadt radonleányelemeket hordozó aeroszolrészecskék általában sokkal kisebb átmérőjűek ennél.

A fagocitózis során az erre specializálódott sejtek kebelezik be a szennyeződést.

A légutak sugárterhelésének szempontjából kulcsfontosságú a tisztulási mechanizmusok minél pontosabb leírása, hiszen a nyáktisztulás sebessége és a fagocitasejtek által bekebelezett radonleányelemek további sorsa alapvetően befolyásolja a légutakban, illetve a szervezet egyéb részeiben eltöltött időt. A tisztulási mechanizmusok ezáltal hatással vannak a lokális (légútgeneráció-felbontású) bomlási valószínűségekre és az okozott sugárterhelésre is.

A belélegzett radonleányelemek légzőrendszeri kiülepedésseloszlásának vizsgálata

A légutak sugárterhelésének vizsgálatokor szükséges a szervezet vizsgált részének (szerv, szövet, sejt, sejt-mag) egységnyi tömegében elnyelt energiamennyiség vizsgálata.

E folyamat első lépése a légutak egyes részeiben kiülepedett radioizotóp-mennyiség meghatározása. E célra a kísérleti eljárások kézenfekvők lennének, ám a gamma-kamera vagy a SPECT (Single Photon Emission Computer Tomography) felbontása a 2 mm-nél kisebb átmérőjű kis légutak vizsgálatára ma még nem elegendő. Szimulációval, vagyis numerikus modellekkel azonban akár a tüdő gázcseret végző apró léglyagjaiban is vizsgálható a kiülepedett radioizotópok mennyisége.

A kiülepedett radonleányelemeket a belélegzett levegőt szétosztó, bronchiális régióban magával ragadja a mozgó nyákréteg, így az alfa- és béta-bomlások helye általában nem egyezik meg a kiülepedés helyével. A kiülepedett ^{214}Pb és ^{214}Bi felezési ideje elég hosszú ahhoz, hogy jelentős távolságot tegyenek meg a mozgó nyákréteggel mielőtt ^{214}Po -má bomlanak.

A légutak sugárterhelésének modellezésénél kulcsfontosságú tehát a kiülepedett radonleányelemek mozgásának finom, legalább légútgeneráció-felbontású vizsgálata.

Numerikus modellezéssel szerencsére lehetséges nem csupán a kiülepedésseloszlás, hanem a nyáktisztulás hatásának vizsgálata is a tüdőben.

A belélegzett részecskék kiülepedésseloszlásának numerikus modellezése nagy múltra tekint vissza. Az első teljes légzőrendszeri részecskekiülepedési modellt 1935-ben *Findeisen* dolgozta ki [3]. Később *Weibel* egy új morfológiai modellt hozott létre 1963-ban [4]. E modellek még erősen leegyszerűsítették a humán légutak bonyolult, aszimmetrikus elágazásrendszerét.

1966-ban jelent meg az ICRP első tüdőmodellje [5]. E modellt az inhalált radioaeroszolok kiülepedésseloszlásának és tisztulásának meghatározására fejlesztették ki.

Az ICRP egy új tüdőmodellt publikált 1994-ben. Ez az ICRP Human Respiratory Tract Model, azaz az ICRP HRTM [2], a sugárvédelem még ma is ezt a modellt használja leggyakrabban a tüdő radioizotópok bomlásából származó sugárterhelésének becsléséhez. Fontos megemlíteni, hogy bár e modell az egész légzőrendszert képes leírni, de igen durva, regionális felbontású. Mindössze négy, egy felső légúti, egy bronchiális (nagy átmérőjű bronchiális légutak), egy bronchioláris (kis átmérőjű bronchiális légutak) és egy acináris részre osztja a légutakat. Továbbá e modell – regionális felbontása miatt – nem alkalmas a kiülepedett radonleányelemek nyáktisztulás közbeni mozgásának légútgeneráció-felbontású vizsgálatára sem. Tehát a HRTM nem adhat megfelelő felbontású dóziseloszlást a lokális, légútgeneráció-szintű biológiai hatás jellemzéséhez.

A Sztochasztikus Tüdőmodell

A belélegzett részecskék légzőrendszeri kiülepedésseloszlásának jellemzése terén forradalmian új utat nyitott meg a Sztochasztikus Tüdőmodell, amelynek első verzióját *Koblinger László* és *Werner Hofmann* dolgozta ki 1985 és 1992 között [6–9].

E modell – az irodalomban elérhető többi tüdőmodellel szemben – számos előnnyel rendelkezik. A Sztochasztikus Tüdőmodell, mivel le tudja írni a légutak geometriájának egyéni belüli és egyének közötti változékonyságát, gyakorlatilag bármilyen személy tüdejének valósághű létrehozására képes. A Sztochasztikus Tüdőmodellel továbbá az adott egyénre jellemző légzési mód is szimulálható.

E modell a numerikus tüdőmodellek között egyedülállóan finom, légútigeneráció-felbontású kiülepedésseloszlás meghatározására képes.

A Sztochasztikus Tüdőmodellnek további előnye, hogy rendkívül széles körben alkalmazható. Szimulációk végezhetőek nem csak egészséges, de légzőrendszeri megbetegedésben (asztma, emfizéma, krónikus obstruktív tüdőbetegség (COPD)) szenvedő alanyokra is. Ezen esetekben a tüdő geometriai felépítése is megváltozik, amely változások a Sztochasztikus Tüdőmodellben realizisztikusan modellezhetőek.

E modellt létrehozatala óta fejlesztik, Magyarországon az Energiatudományi Kutatóközpontban, illetve a Salzburgi Egyetemen is.

Célunk a HRTM-nél lényegesen jobb felbontású és szélesebb körben alkalmazható radonfiziológiai tüdőmodell létrehozása volt, hogy minél részletesebb képet kaphassunk a tüdő bronchiális régiójának sugárterheléséről, ezért továbbfejlesztettük a Sztochasztikus Tüdőmodellt.

A Sztochasztikus Tüdőmodell Radact változata és a bemenő adatok

A meglévő kiülepedési modellbe egy nyáktisztulási és egy sejtmag dózis modellt fejlesztettünk ki és építettünk be, így tettük alkalmassá a Sztochasztikus Tüdőmodellt a belélegzett radonleányelemek bomlásából származó sugárterhelés pontosabb meghatározására. Ez lett a Sztochasztikus Tüdőmodell Radact változata [12].

E modell segítségével a radonleányelemek légútigeneráció-felbontású kiülepedésseloszlása és nyáktisztulása is meghatározható.

A dózisszámítás első lépése a kiülepedésseloszlás meghatározása. Ezután következik a nyáktisztulás hatásának modellezése, illetve a bomlások valószínűségének számítása a tisztulási modellel. Harmadik, utolsó lépésként a dózisteljesítményt számító modell háromdimenziós részecskepályák létrehozásával szimulálja a kibocsátott alfa-részecskék útját a kibocsátó izotóptól a célsejtek magjáig. Ennek során a modell a sugárérzékeny sejt magjában megtett út alatt leadott energia, illetve a sejtmag tömegének ismeretében kiszámítja a sejtmagokra vonatkoztatott elnyeltdózis-teljesítményeket.

A tisztulási modellben a kiülepedett radonleányelemek azonnal mozogni kezdenek a légutakat fedő nyákréteggel. Amennyiben a kitapadt vagy a ki nem tapadt leányelem ugyanabban a légútban bomlik el, mint ahol elérte a légút falát, kiülepedés eredetű, ha e helynél feljebb történik az alfa-részecske kibocsátása, tisztulás eredetű sugárterhelésről beszélünk.

A nyáksebesség 0,55 cm/perc [13] volt az első légútban (ez a légcső vagy trachea), amely a légzőrendszerben lefelé haladva minden egyes légúti generációban 0,67-os faktorial [14] csökkent. A nyáksebességet egy adott légúti generációban tehát a $0,55 \cdot 0,67^{k-1}$ képlettel határoztuk meg, ahol k a légúti generáció száma volt.

Egy sejtmagot több, az adott légútban kiülepedett ^{218}Po és ^{214}Po által kibocsátott alfa-részecske is eltalálhat, így a sejtmagokra vonatkoztatott átlagos elnyelt-

1. táblázat

Légzési paraméterek			
	FRC* (cm ³)	légzési térfogat (cm ³)	légzési frekvencia (1/perc)
ülő egészséges felnőtt nő	2680	464	14

* Az FRC az angol Functional Residual Capacity rövidítése, amelyet magyarul „maradványkapacitásnak” nevezhetünk. Ez a kilégzés után a tüdőben maradó levegő mennyisége.

dózis-teljesítmények számításakor szükséges az egy átlagos alfa-részecsketalálat során egy sejtmagban elnyelt energia mennyiségének számítása. Ehhez ötven ezer 218-as és 214-es tömegszámú polóniumatomot helyeztünk el véletlenszerűen a légutakat borító nyákréteg tetején.

Minden elhelyezett ^{218}Po atomból egy 6 MeV-es, illetve ^{214}Po atom esetén egy 7,69 MeV-es alfa-részecskét indítottunk el a légutak középe körül elhelyezett sugárérzékeny bazális, illetve kiválasztó célsejtek magja felé.

A bazális és kiválasztó sejtek mélységeloszlását a Mercer és munkatársai [15] által publikált adatok alapján határoztuk meg. Ők humán és patkánytüdőből származó szövetmintákon – több, különböző mélységből vett metszeten – vizsgálták meg a légutak sugárérzékeny sejteinek mennyiségét. E munka során, az adott légút átmérője alapján három részére bontották a légzőrendszert:

- nagy átmérőjű bronchiális légutak,
- kis átmérőjű bronchiális légutak,
- végző bronchiális légutak.

Az 1. táblázatban ismertetett légzési paramétereiket az ICRP 66-os kiadványból vettük [2]. Jelen tanulmányban ismertetett, egészséges, ülő, felnőtt nőre végzett szimulációkat 1 Working Level radonaktivitáskoncentrációra és 1 hónapra, azaz 170 órára végeztük. Ez az 1 WLM (Working Level Month).

A WLM egy régi, ám még ma is használt mértékegység, amelyet az uránbányászok radonkitettsége jellemzésére hoztak létre. 1 Working Level Month 170 óra munkavégzést jelent meglehetősen nagy, 3740 Bq/m³ radonaktivitáskoncentrációjú levegőt belélegezve. Az összehasonlítás kedvéért a World Health Organisation jelentése szerint [1] a lakások világszerte átlagosan 40 Bq/m³ egyensúlyi radonleányelem-aktivitáskoncentrációjával jellemezhetőek.

A WLM önmagában természetesen nem határozza meg a sugárdózist, hiszen számos paraméter, például a ki nem tapadt leányelem-frakció nagysága, az izotóp-összetétel, vagy az adott alany fizikuma és egészségi állapota jelentősen befolyásolja az 1 WLM-re vonatkozó effektív dózist.

E tanulmányban a számításokat $F = 0,4$ -es egyensúlyi tényezővel végeztük, a leányelemek aktivitásának aránya pedig 0,58/0,44/0,29 volt [10]. A kitapadt leányelemek 200 nm aerodinamikai átmérőjűek, a ki nem tapadt pedig 1 nm termodinamikai átmérőjűek voltak [11].

Az elvégzett szimulációkban a 218-as tömegszámú polóniumatomok 6%-a ki nem tapadt, azaz a poten-

ciális alfa-energiakonzentráció 6%-át képviselik a ki nem tapadt 218-as tömegszámú polóniumrészecskék [11]. Kizárólag ezen izotóp alkotja továbbá a ki nem tapadt leányelem-frakciót.

Eredmények

A radonleányelemek és a hordozó aeroszolrészecskék légzőrendszeri kiülepedéseloszlása

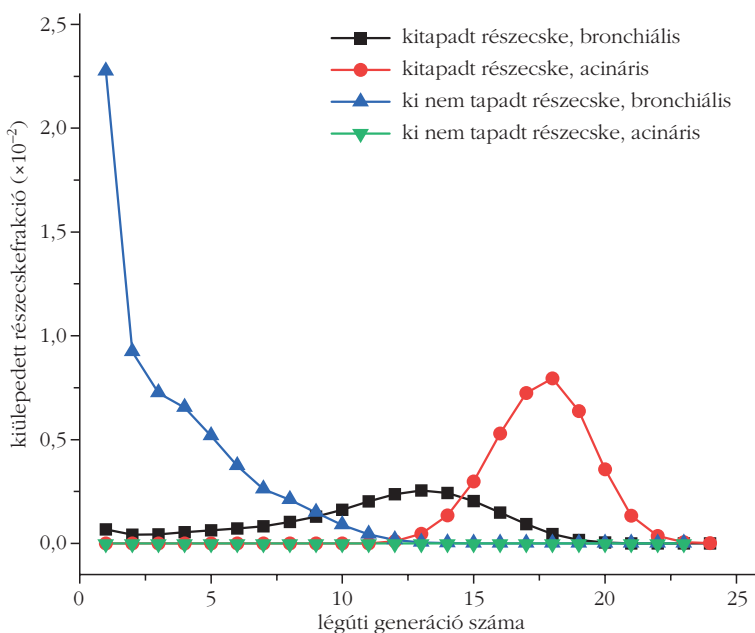
A belélegzett radonleányelemek légzőrendszeri kiülepedéseloszlása az 1. ábrán látható.

A leányelemek nagy része kitapadt, azaz aeroszolrészecskék felszínén utazik. Ezek kiülepedési valószínűsége igen kicsi mind a felső légutakban, mind a tüdőben. Ezen részecskék 7,32%-a ülepszik ki az orrban, 1,74%-a a szájban. A tüdőben a kitapadt leányelemek kiülepedési valószínűségének maximuma az acináris régióban található (1. ábra). Fontos kijelenteni, hogy normál légzésnél (amikor nincs benntartás) e leányelemek 70-80%-át kilélegezzük.

A ki nem tapadt leányelemek a kitapadtaknál jóval kisebb méretűek, így ezekre a részecskékre jelentős mértékben hat a diffúzió. A nagy átmérőjű bronchiális légutakban (1–8. légúti generáció), mint az 1. ábrán is látható, a ki nem tapadt leányelemek kiülepedési valószínűsége sokkal nagyobb, mint a kitapadt leányelemeké. Jelentős továbbá e leányelemek felső légúti kiülepedése is (92% orrlégzés és 44% szájlégzés esetén).

A ki nem tapadt leányelemek tehát nagy valószínűséggel ülepednek ki a légutak e kis felületű részén, ami miatt akár kis mennyiségű belélegzett ki nem tapadt leányelem is nagy kiülepedéssűrűséget (egységnyi felületre vonatkoztatott kiülepedett leányelemszámot) fog eredményezni.

1. ábra. A belélegzett radonleányelemek kiülepedéseloszlása egészséges légzőrendszerben.



A sejtmagokra vonatkozó elnyeltdózis-teljesítmények ülő, egészséges, felnőtt nőre

A légutak sugárterhelése nagymértékben függ a vizsgált egyénre jellemző paramétereiktől, mint amilyenek a légzési mód (orr- vagy szájlégzés, a be- és kilégzés hossza, a légzési térfogat nagysága) és a légutak felépítése (a légutak átmérője és hossza, az egymással és a függőlegessel bezárt szögek stb.). E változók ugyanis jelentősen befolyásolják a dózisszámítás során használt három legfontosabb változót, amelyek:

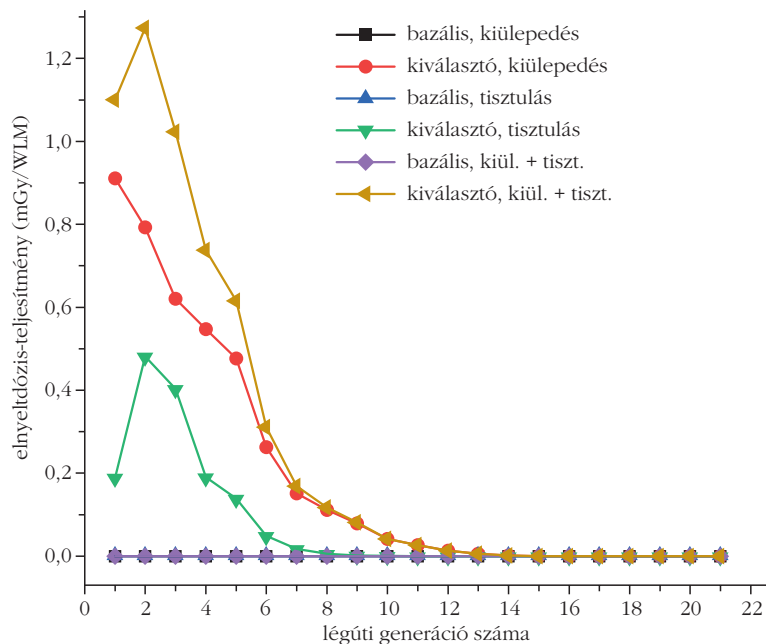
1. az adott légútban elbomló ²¹⁸Po és ²¹⁴Po atomok száma;
2. a célsejtmag találati valószínűsége;
3. az egy alfa-részecske találat során leadott átlagos energiamennyiség.

Az adott légútban – az elsőtől az utolsó felé haladva – elbomló ²¹⁸Po és ²¹⁴Po izotópszám általában csökken, hiszen a légutak száma 2^{k-1} összefüggés szerint nő, ahol k a légúti generáció száma. Itt fontos megemlíteni, hogy mind a 6 MeV-es, mind a 7,69 MeV-es alfa-részecske hatótávolsága túl rövid ahhoz, hogy áthatoljon az azonos mélységben lévő leányágakat elválasztó szöveten. Kizárólag az adott légútban és nem az adott légúti generációban (amely az adott számú elágazással elérhető légutak összessége) lévő radonleányelemek bomlásával kell tehát számolnunk, amikor a bazális vagy kiválasztó sejtek magjában elnyelt dózist vizsgáljuk.

A célsejtmagok találati valószínűsége és az egy alfa-találat során leadott energiamennyiség viszont nő, ahogy lefelé haladunk a tüdőben, ugyanis a légutak egyre kisebbek és az őket fedő nyákréteg is egyre vékonyabb, ahogy nő a légúti generáció száma.

Mind a kitapadt, mind a ki nem tapadt radonleányelemek esetén igaz, hogy a ²¹⁸Po bomlásából származó dózisek nagy részben a helyben kiülepedett izotópok bomlásából származnak, míg a ²¹⁴Po bomlások esetén a mélyebb légutakból érkező részecskék hozzájárulása a domináns. Ez azzal magyarázható, hogy a ²¹⁸Po felezési ideje (3,1 perc) túl rövid ahhoz, hogy elbomlása előtt ezen izotóp számottevő távolságot tegyen meg a légutakban. Ezzel szemben a ²¹⁴Pb és ²¹⁴Bi izotópok felezési ideje (26,8 és 20 perc) elég hosszú ahhoz, hogy egy vagy akár több légúti generációnyi távolságot utazzanak felfelé a légzőrendszerben a mozgó nyákréteggel, mielőtt a polónium 214-es tömegszámú izotópjává alakulnak.

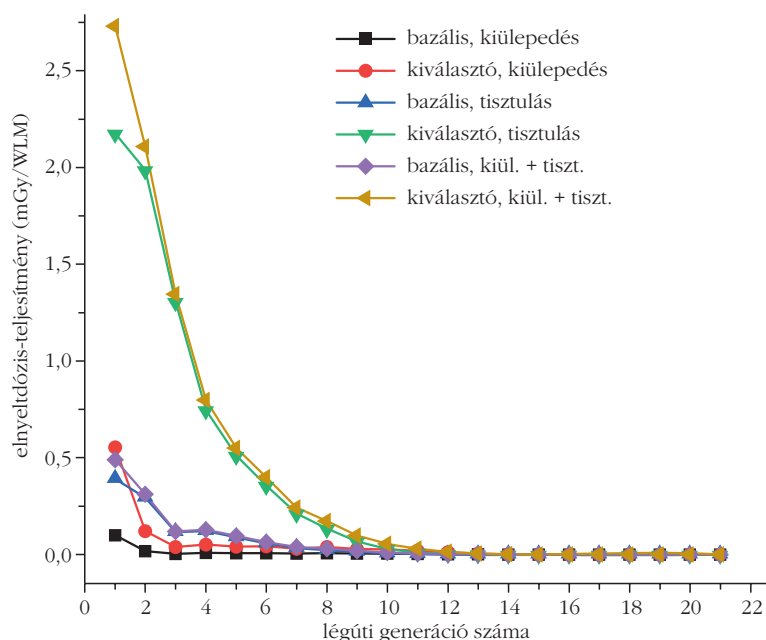
A két vizsgált sejttípus (bazális és kiválasztó) sugárterhelése jelentősen eltér mind a ki nem tapadt, mind a kitapadt leányelemek bomlását vizsgálva. Ez a két sejttípus eltérő mélységeloszlásával magyarázható. A kiválasztó sejtek a légutak felszínéhez közel is megtalálhatók, míg a bazális sejtek jellemzően mélyen fekszenek. Ezért általában kevesebb energia nyelődhet el a bazális, mint a kiválasztó sejtek magjában.



2. ábra. A ki nem tapadt részecskék ^{218}Po bomlásából származó elnyeltdózis-teljesítményeinek eloszlása.

A ki nem tapadt részecskék esetén (2. és 3. ábra) az első vagy a második légúti generációban találjuk a legnagyobb dózisokat. Ezt az okozza, hogy e légutakban jelentős a kiülepedés, illetve hogy itt még kevés, mindössze 1 vagy 2 légút található. Bár a légzőrendszer ezen nagy átmérőjű és hosszú csövekből álló részén kicsi lesz a találati valószínűség, továbbá egy sejtmagtalálat során is csak kevés energiát tudnak leadni az alfa-részecskék, az egy csőben elbomlott izotópok száma olyan tetemes lesz, hogy a légutak sugárterhelése a tüdő e kezdeti részében lesz a legnagyobb.

3. ábra. A ki nem tapadt részecskék ^{214}Po bomlásából származó elnyeltdózis-teljesítményeinek eloszlása.



A kitapadt leányelemek ^{218}Po bomlásból származó elnyelt dózisok maximuma a 14. légúti generációban van (4. ábra). Ezt elsősorban az itt kiülepedett nagyszámú leányelem okozza. Fontos hozzátenni, hogy itt ^{213}Po , azaz 8194 légút található. Igen sok részecskének kell tehát e légúti generációban kiülepednie, hogy az adott légútban elbomlott ^{218}Po és ^{214}Po atomok száma jelentős maradjon.

A kitapadt részecskék ^{218}Po bomlásából származó sugárterhelés-maximumának helyére további magyarázat, hogy a találati valószínűség és az egy találat során leadott energia mennyisége is nagyobb a tüdő e mélyen fekvő részében, mint a bronchiális régió elején, ahol a kibocsátott alfa-részecskéknek általában jelentős távolságot kell megtenniük, mielőtt elérnék a sugárérzékeny sejteket. A bronchiális régió mélyebb részén olyan nagy mértékben csökken a távolság a radonleányelemek és a célsejtek között, hogy még a ^{218}Po által kibocsátott 6 MeV-es alfa-részecskének is

gyakran van elegendő energiája elérni a légúti hámszövetben található bazális és kiválasztó sejteket.

A kitapadt részecskék ^{214}Po bomlásából származó dóziszárulékait vizsgálva (5. ábra) két csúcst látunk, egy kiülepedésből eredő kisebbet a 14. légúti generációban és egy tisztulásból származó nagyobbat a 2. légúti generációban. A nagy átmérőjű bronchusok (1–8. légúti generáció) elején jelentkező csúcs jól szemlélteti, hogy milyen fontos a kibocsátott alfa-részecske energiája a légzőrendszeri dózisszámítás során. A ^{214}Po bomlásakor ugyanis egy 7,69 MeV-es alfa-részecskét bocsát ki, amely energia sokszor elegendő, hogy még a nagy átmérőjű bronchiális légutakban is elérje a sugárérzékeny sejteket.

A Sztochasztikus Tüdőmodell Radact verziójával számított elnyeltdózis-eloszlások alapján kijelenthető, hogy a sugárterhelés rendkívül inhomogén a HRTM bronchiális (1–8. légúti generáció) és bronchioláris (9–21. légúti generáció) régióján belül is, továbbá a nyák tisztulás által felszállított leányelemek bomlásából származó energia jelentős mértékben hozzájárul a dózisteljesítményekhez. Nélkülözhetetlen tehát a kiülepedett radonleányelemek kiülepedésének és nyák tisztulás közbeni bomlásainak légúti generáció-felbontású vizsgálata.

Összefoglalás

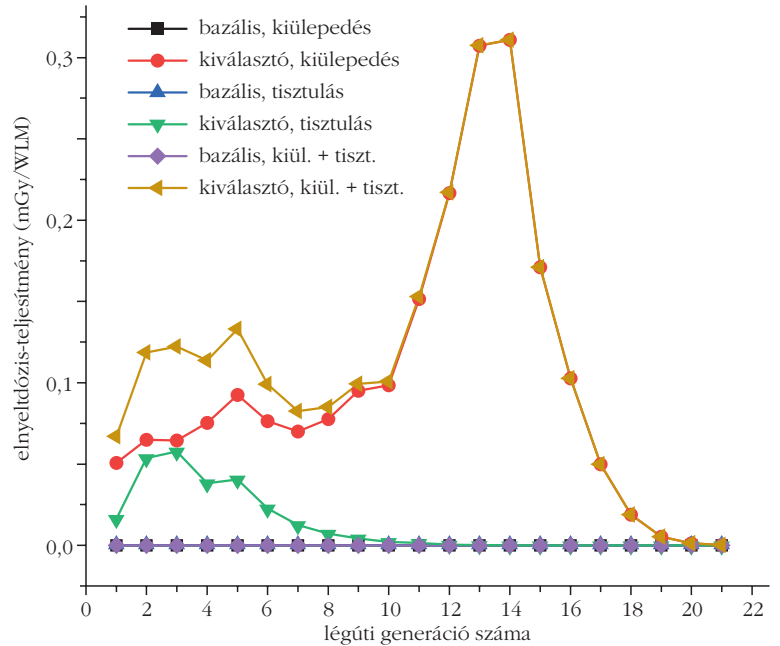
A radonleányelemek légzőrendszeri kiülepedéseloszlását a rendelkezésre álló kísérleti eljárásokkal (gamma-kamera, Single Photon Emission Computer Tomography) még nem mérhetjük meg kellően finom felbon-

tással. Kizárólag numerikus tudómodellekkel határozhatjuk meg tehát a belélegzett radonleányelemek felső légúti és tüdőbeli kiülepedéseloszlását, valamint az ebből származó sugárterhelést is.

A légutakban található bazális és kiválasztó sejtek sugárterhelését számos, az adott egyénre jellemző paraméter befolyásolja. E paraméterek hatásának realisztikus modellezéséhez egyénre szabott tüdő-radonozimetriára van szükség. Számításaink alapján kijelenthető, hogy a sugárterhelés rendkívül inhomogén a tüdő bronchiális régiójában, valamint a nyáktisztulás jelentősen befolyásolja a sejtmagokra vonatkoztatott elnyeltdózis-teljesítményeket. Ezen eredmények jól demonstrálják, hogy a sugárvédelem Human Respiratory Tract Modelje csak korlátozott mértékben alkalmas a radonleányelemek bomlásából származó sugárterhelés meghatározására. A sejtmagokban elnyelt dózistokat valóságghűen szimuláló dozimetriához egy olyan modellre van szükség, amely képes a belélegzett radonleányelemek kiülepedésének, nyáktisztulásának és bomlásának lokális, azaz legalább légútgeneráció-felbontású szimulálására. E cél eléréséhez egyedülálló eszköz a Sztochasztikus Tüdőmodell új, Radact változata.

Irodalom

1. World Health Organisation (WHO): *Handbook on indoor radon*. WHO Press (2009).
2. ICRP Publication 66: *Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection*. Annals of the ICRP 24, Pergamon Press, Oxford, UK (1994).
3. W. Findeisen: Über das Absetzen kleiner in der Luft susperdierten Teilchen in der menschlichen Lunge bei der Atmung. *Pflügers Archiv Ges. Physiologie* 236 (1935) 367–379.
4. E. R. Weibel: *Morphometry of the Human Lung*. Springer Verlag and Academic Press, Berlin, New York (1963).
5. ICRP Publication 9: *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. Pergamon Press, Oxford, UK (1966).
6. L. Koblinger, W. Hofmann: Analysis of human lung-morphometric data for stochastic aerosol deposition calculations. *Phys. Med. Biol.* 30 (1985) 541–556.
7. L. Koblinger, W. Hofmann: Monte Carlo modelling of aerosol deposition in human lungs. Part I: Simulation of particle transport in a stochastic lung structure. *Journal of Aerosol Science* 21 (1990) 661–674.
8. W. Hofmann, L. Koblinger: Monte Carlo modeling of aerosol deposition in human lungs. Part II: Deposition fractions and their sensitivity to parameter variations. *Journal of Aerosol Science* 21/5 675–688.
9. W. Hofmann, L. Koblinger: Monte Carlo modeling of aerosol deposition in human lungs. Part III: Comparison with experimental data. *Journal of Aerosol Science* 23/1 (1992) 51–63.
10. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation: *Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. Sources and effects of ionizing radiation*. (2000).
11. T. Haninger: Size distributions of radon progeny and their influence on lung dose. In: *Radon and Thoron in the human environment*. 7th Tohwa University International Symposium. World Scientific, Singapore (1998) 574–576.



4. ábra. A kitapadt részecskék ^{218}Po és ^{214}Po bomlásából származó elnyeltdózis-teljesítményeinek eloszlása.

12. P. Fűri, Á. Farkas, B. G. Madas, W. Hofmann, R. Winkler-Heil, G. Kudela, I. Balásházy: The degree of inhomogeneity of the absorbed cell nucleus doses in the bronchial region of the human respiratory tract. *Radiation and Environmental Biophysics* (2019). <https://doi.org/10.1007/s00411-019-00814-0>
13. S. K. Chopra: Measurement of tracheal mucociliary transport velocity in human smokers versus nonsmokers, *Am. Rev. Respir. Dis.* 119/Suppl. (1979) 205.
14. R. Sturm, W. Hofmann: Stochastic modelling predictions for the clearance of insoluble particles from the tracheobronchial tree of the human lung. *Bulletin of Math. Biol.* 69 (2007) 395–415.
15. R. R. Mercer, M. L. Russell, J. D. Crapo: Radon dosimetry based on the depth distribution of nuclei in human and rat lungs. *Health Physics* 61 (1991) 117–130.

5. ábra. A kitapadt részecskék ^{218}Po és ^{214}Po bomlásából származó elnyeltdózis-teljesítményeinek eloszlása.

