

EGY EGYÉNRE SZABHATÓ TÜDŐRADONDOZIMETRIAI MODELL LÉTREHOZÁSA ÉS ALKALMAZÁSA

Füri Péter

Magyar Tudományos Akadémia, Energiatudományi Kutatóközpont,
Budapest, 1121, Konkoly Thege-Miklós út 29–33.
furi.peter@energia.mta.hu

A kézirat beérkezett: 2019.07.24.

Közlésre elfogadva: 2019.11.11.

Developing and applying a customizable radon progeny lung dosimetry model

To investigate how the intersubject variability of the airway geometry and breathing mode affects the radiation burden of the airways we created a customizable radon progeny clearance and dosimetry model. The calculations performed in this study showed, that the absorbed cell nucleus dose rates are higher in case of mouth than nose breathing and chronic obstructive pulmonary disease (COPD) significantly increases the radiation burden. According to these results breathing mode and health status considerably affects the dose rates of the airways. The Radact version of the Stochastic Lung model is a unique tool to demonstrate this.

Keywords- radon, absorbed cell nucleus dose, stochastic lung model, intersubject variability

A radon leányelemek bomlásából származó sugárterhelés egyéni adottságoktól való függésének vizsgálatához létrehoztunk a Sztochasztikus Tüdőmodellben egy egyénre szabható nyáktisztulási, illetve dozimetriai modellt. Az elvégzett számítások igazolják, hogy a tüdő bronchiális régiójának sugárterhelése nagyobb száj-, mint orrlégzés esetén, valamint a krónikus obstruktív tüdőbetegség (COPD) jelentősen megnöveli a sejtmagokra vonatkoztatott elnyeltdózis-teljesítményeket. A légutak sugárterhelésének mértéke erősen függ tehát a vizsgált egyén légzési módjától, illetve egészségi állapotától is. Ennek vizsgálatához egyedülálló eszköz a Sztochasztikus Tüdőmodell új, Radact változata.

Kulcsszavak – radon, elnyeltdózis-teljesítmény a sejtmagban, Sztochasztikus Tüdőmodell, egyének közötti variabilitás

BEVEZETÉS

A légzés nélkülözhetetlen életfolyamat. A légzés során azonban számos szilárd részecske, illetve folyadék csepp is a felső légutakba vagy a tüdőbe kerülhet. Ezek okozhatnak asztmát, emfizémát, illetve krónikus obstruktív tüdőbetegséget (COPD) is. A belélegzett radon leányelemek bomlása emellett a természetes eredetű sugárterhelés fő forrása is. Több epidemiológiai vizsgálat igazolja, hogy a belélegzett levegő Rn-aktivitáskoncentrációja és a tüdőrák kialakulásának valószínűsége között szoros összefüggés van [1, 2]. A sugárvédelem fontos feladata tehát a radon leányelemeinek belégzés utáni bomlásából származó sugárterhelés meghatározása.

Lakásokban az UNSCEAR 2000-es jelentése szerint világátlagban 40 Bq/m^3 radonleányelem-aktivitáskoncentráció mérhető [2], de a lakások egy kis részében ennél akár több nagyságrenddel nagyobb értékek is előfordulhatnak.

A humán légzőrendszer

A jelen munka módszereinek és eredményeinek megértéséhez szükséges a humán légzőrendszer egyes elemeinek rövid ismertetése.

A humán légzőrendszer felosztható felső légutakra (extrathorakális rendszer), bronchiális, illetve acináris régióra. Az extrathorakális rendszer (mely az orrot, szájat, a garatot és a géget jelenti) fontos szűrő, nedvesítő és előmelegítő funkciót is ellát.

A bronchiális és az acináris régió bifurkációkból (légúti generációkból) épül fel, azaz minden anyaga két leányágra bomlik.

A bronchiális légutak csövein még nem találhatók léghólyagok (alveolusok), tehát e régió csupán a tüdő mélyebben fekvő része felé vezeti a levegőt. A légzőrendszer bronchiális részére jellemző tisztulási mechanizmus a nyaktisztulás.

A bronchiális légutak után következő acináris légutak felületét már nagy részben alveolusok fedik. A tüdő e nagy felületű (kb. 140 m^2) részében zajlik a gázcsere.

Mivel a legtöbb – az ionizáló sugárzás daganatkeltő hatásához köthető – elváltozást a légzőrendszer bronchiális régiójában írták le, (illetve az elnyelt dózisok is itt a legnagyobbak) a dózisszámítás során a légutaknak csupán e részére koncentráltunk.

A radon és bomlástermékei

A radon nemesgáz, így nem kapcsolódik a levegőben lebegő porszemcsékhez. Nem ülepedhet ki ezért a légutakban. Mivel a radon felezési ideje kb. 3,8 nap, de a légzőrendszerben csupán néhány másodpercet tölt, annak a valószínűsége, hogy a rendelkezésre álló idő alatt elbomoljon, igen kicsi. A belélegzett radon túlnyomó többsége tehát még azelőtt kilégzésre kerül, hogy a polónium 218-as tömegszámú izotópjára bomlana. Nem szükséges ezért a radon gáz bomlásából származó sugárterhelés modellezése.

A radon leányelemek már nem nemesgázok, így jelentős hányaduk tapad meg a levegőben lebegő porszemcsék felületén. A belélegzett porszemcsék diffúzióval, impakcióval, illetve szedimentáció (gravitációs ülepedés) hatására is kiülepedhetnek a légutakban, így a radonnál jóval hosszabb időt, akár órákat is eltölthetnek a légzőrendszerben.

A radon 222-es tömegszámú izotópja először alfa-bomlással a polónium 218-as tömegszámú izotópjává alakul. A 218-as tömegszámú polónium már nem nemesgáz, így számottevő hányada tapad ki a lebegő porszemcsék felületére. Ez az úgynevezett kitapadt frakció. Ennek méreteloszlása természetesen a környezeti részecskék méreteloszlásától függ.

A 218-as tömegszámú polónium atomoknak van ki nem tapadt frakciója is. Ezen részecskék mérete jellemzően sokkal kisebb a kitapadt atomokat hordozó részecskék méreténél. [3].

A polónium 218-as tömegszámú izotópjának bomlásából egy 6 MeV-os alfa-részecske kibocsátásával 214-es tömegszámú ólom keletkezik. Ezután ebből az izotópból béta-bomlással a bizmut 214-es tömegszámú izotópja jön létre, majd újabb béta-bomlást követően a polónium-214-es tömegszámú izotópjához jutunk. A 214-es tömegszámú polónium egy 7,69 MeV-os alfa-részecske kibocsátásával 210-es tömegszámú ólom alakul. Ez az izotóp nem stabil, ám felezési ideje 22,3 év, így annak a valószínűsége, hogy a légutakban töltött idő alatt elbomlik, elhanyagolható.

A radon bomlási sorában alfa- és béta-bomlások is szerepelnek. A béta-bomlások során kibocsátott elektronok ionizáló képessége (így biológiai hatása is) sokkal kisebb, mint a jóval nagyobb tömegű alfa-részecskéké. A sejtmagokra vonatkoztatott elnyeltdózis-teljesítmények számításánál a béta-bomlások dóziszárulékát ezért elhanyagoltuk.

A belélegzett radon bomlástermékek légzőrendszeri kiülepedésseloszlása erősen inhomogén. Adódnak ezért olyan légúti területek, ahol nagy mennyiségű radioizotóp tud kiülepedni akár kis mennyiségű belélegzett radon leányelem esetén is [4, 5, 6].

A belélegzett radon leányelemek biológiai hatásának becslésekor fontos feladat tehát az inhalált radioizotópok kiülepedésseloszlásának minél pontosabb meghatározása.

A belélegzett radon bomlástermékek kiülepedésseloszlása vizsgálható kísérleti úton, gamma-kamerával, illetve Single Photon Emission Computer Tomography (SPECT) technikával is. A kísérleti eljárások azonban erősen korlátozott felbontásuk miatt ma még nem alkalmasak a 2 mm-es átmérő alatti kis légutak vizsgálatára, illetve – mivel jellemzően csupán kétdimenziós képet adnak – nem képesek az egymást térben átfedő légutakban kiülepedett radioizotóp mennyiség meghatározására sem.

A kísérleti eljárások e hiányosságai miatt kiemelkedően fontos szereppel bírnak a numerikus tudómodellek, melyek használatával tetszőleges felbontással jellemezhető a belélegzett radioizotópok kiülepedés- és dóziseloszlása. Numerikus modellezés segítségével szimulálható továbbá a nyáktisztulás hatása is, mely kulcsfontosságú az olyan hosszú felezési idejű izotópok esetén, mint a 214-es tömegszámú ólom és bizmut, melyek jelentős távolságot tehetnek meg a légzőrendszerben a mozgó nyákréteggel, mielőtt elbomlanak.

A Sztochasztikus Tudómodell és az input adatok

Az összes numerikus tudómodell közül a legrészletesebb, legflexibilisebb és legpontosabb teljes légzőrendszeri aeroszol-depozíciós modell a Sztochasztikus Tudómodell, melynek első verzióját Koblinger László és Werner Hofmann dolgozta ki 1985 és 1992 között [7, 8, 9, 10]

A Sztochasztikus Tudómodell a légutak geometriáját Monte-Carlo technikák alkalmazásával az egyik legnagyobb légzőrendszeri adatbázis [11] adatainak statisztikus kiértékeléséből levezetett eloszlás- és korrelációs függvények alapján hozza létre. Az acináris régió leírásához felhasználja továbbá a Haefeli-Bleuer és Weibel féle acináris geometria felépítését és jellemzőit is [12].

E modellt a múltban több területen fejlesztették és használatával számos nemzetközi referált folyóiratban jelent meg publikáció [13, 14, 15, 16].

A Sztochasztikus Tudómodell a felső légutakban empirikus formulák segítségével határozza meg a kiülepedett részecskefrakciót. E szimulációk során a Cheng és munkatársai által 2003-ban publikált formulát alkalmaztuk [17].

A felhasznált légzési paraméterek egészséges felnőtt férfi esetén az ICRP 66-os kiadványából [22] származnak. A COPD-s felnőttre használt légzési paramétereket és a légutak szűkületének mértékét pulmonológusokkal való konzultáció során állapítottuk meg (1. táblázat).

1. táblázat. Légzési paraméterek

Személy	FRC (cm ³)	Légzési térfogat (cm ³)	Légzési frekvencia (1/perc)
Ülő egészséges felnőtt férfi	3300	750	12
COPD-s felnőtt férfi	4000	1200	16

A légzőrendszer -a belélegzett radon leányelemek bomlásából származó sugárterhelését- számos tényező befolyásolja. Ezek közül a légzési mód, illetve a légúti geometria függ a testalkattól, egészségi állapottól, a kortól, illetve a nemtől is.

Jelen munka legfontosabb kérdése, hogy egy kiválasztott személyre jellemző egyéni adottságok (légzési mód és egészségi állapot) hogyan befolyásolják az inhalált radon

leányelemek bomlásából származó – a sejtmagokra vonatkoztatott – elnyeltdózis-teljesítményeket.

A légzési mód hatásának vizsgálatához szimulációkat végeztünk orr- vagy szájlégzést végző ülő egészséges felnőtt férfire. Az egészségi állapot hatásának vizsgálatához számításokat végeztünk továbbá beteg, COPD-s orrlégző felnőttre is.

A lakásra jellemző egyensúly-ekvilans radonleányelem aktivitáskoncentráció minden szimulációnál 40 Bq/m^3 , a leányelemek aktivitásának aránya pedig $0.58/0.44/0.29$ volt [2]. A kitapadt leányelemek 200 nm aerodinamikai átmérőjűek, a ki nem tapadt leányelemek pedig 1 nm termodinamikai átmérőjűek voltak [3].

Az elvégzett szimulációkban a potenciális alfa-energiakoncentráció 6%-át képviselik a ki nem tapadt 218-as tömegszámú polónium részecskék [3]. Kizárólag ezen izotóp alkotja továbbá a ki nem tapadt részecske frakciót.

A leányelemek aktivitáskoncentrációjából, illetve izotóparányából az 2. táblázatban látható izotópszám szerinti koncentrációkat az ICRP 65 [18] által leírt eljárás szerint határoztuk meg.

2. táblázat.: Szám szerinti izotópkoncentrációk

Izotóp	Szám szerinti koncentráció (részecske/ m^3)
^{218}Po	6020 (2360 ki nem tapadt)
^{214}Pb	40177
^{214}Bi	19460

A dozimetriai és a tisztulási modell

A radon leányelemek bomlásából származó sugárterhelés valósághű modellezéséhez egy nyáktisztulási illetve elnyeltdózis-teljesítmény modell került kidolgozásra a Sztochasztikus Tüdőmodell új, Radact nevű változatában [25].

A dózisszámítás első lépése a kiüledéseloszlás meghatározása volt. Ezután következett a nyáktisztulás hatásának modellezése, illetve a bomlások valószínűségének szimulálása a tisztulási modellel.

Harmadik, utolsó lépésként a dózisteljesítményt számító modell háromdimenziós részecskepályák létrehozásával szimulálta 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 kiszámította a sejtmagokra vonatkoztatott elnyeltdózis-teljesítményeket.

A tisztulási modellben a kiülededett részecskék azonnal mozogni kezdtek a légutakat fedő nyákréteggel. A nyáksebesség $0,55 \text{ cm/perc}$ [19] volt a tracheában mely a légzőrendszerben lefelé haladva $0,67$ -es faktorról [20] csökkent minden egyes légúti generációban.

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.

A sejtmagokra vonatkoztatott átlagos elnyeltdózis-teljesítmények számítása során szükséges az egy átlagos alfa-részecske találata során egy sejtmagban elnyelt energia számítása. Ehhez ötvenezer 218-as és 214-es tömegszámú polónium izotópot elhelyeztünk el véletlenszerűen a légutakat borító nyákréteg tetején. Minden elhelyezett ^{218}Po izotópból egy 6 MeV -es, illetve ^{214}Po izotóp esetén egy $7,69 \text{ MeV}$ -es alfa-részecskét indítottunk el a légutak közepe körül elhelyezett bazális, illetve kiválasztó célsejtek magja felé.

A sugárérzékeny (bazális és kiválasztó) sejtek mélységeloszlása a Mercer és munkatársai [21] által publikált adatok alapján lett meghatározva.

EREDMÉNYEK

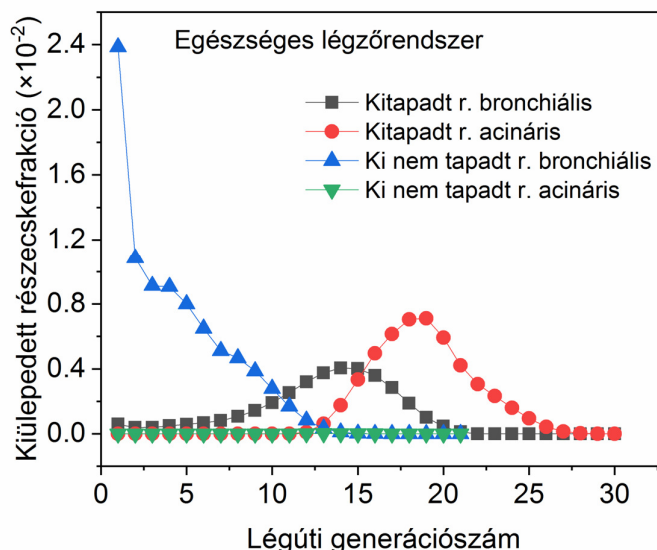
A kiülepedett leányelem részecskefrakciók nagysága kitapadt és ki nem tapadt radon leányelemek esetén.

A dózisszámítás során első lépés a belélegzett részecskék kiülepedésseloszlásának meghatározása. A kiülepedett részecskefrakció a kiülepedett és a belélegzett részecskék számának arányaként adható meg.

A ki nem tapadt és a kitapadt részecskék kiülepedésseloszlása lényegesen eltér egymástól (1. ábra). A felső légutakban nagy valószínűséggel ülepednek ki a ki nem tapadt részecskék (41,8% száj és 90,3% orrlégzés esetén), így a belélegzett leányelemek csupán kis része éri el a bronchiális, illetve acináris régiót. A szájban vagy orrban ki nem ülepedett ultrafinom részecskék azonban nagy valószínűséggel ülepednek ki a bronchiális légutakban is. A ki nem tapadt részecskék kiülepedésseloszlásának maximuma ezért a centrális légutakban, azaz a nagy átmérőjű bronchiális légúti generációkban található.

A kitapadt leányelemek felső légúti kiülepedése nem jelentős (1,74% szájlégzés és 7,32 % orrlégzés esetén). E leányelemek tüdőbeli kiülepedésseloszlása egy bronchiális és egy acináris csúccsal jellemezhető.

A bronchiális csúcs maximuma a 12.-16., az acináris csúcs maximuma a 17.-20. légúti generáció között található.



1. ábra. A kiülepedett leányelem részecskefrakciók nagysága kitapadt és ki nem tapadt radon leányelemek esetén orrlégző, ülő felnőtt férfira

A sejtmagokra vonatkoztatott elnyeltdózis-teljesítmények számítása

A sejtmagokra vonatkozó elnyeltdózis-teljesítmények számítása során a leglényegesebb paraméterek az adott légúti generációban elbomlott 218-as illetve 214-es tömegszámú polónium atomszám, az egy találattal során átlagosan leadott energiamennyiség és az adott célsejt találati valószínűsége. E paraméterek mindegyike függ a vizsgált személy légzési módjától, illetve egészségi állapotától.

Mivel a légutak száma a bifurkációk miatt 2^{k-1} összefüggés szerint növekszik (itt k a légúti generációs szám) az adott légútban kiüledett 218-as és 214-es tömegszámú polónium atomok száma általában csökken a garattól az utolsó légúti generáció felé haladva.

A találati valószínűség, illetve az egy találat során egy bazális, illetve kiválasztó sejt magjában elnyelt energia azonban jellemzően nő az elsőtől az utolsó légúti generációig. Ennek oka, hogy a légutakban lefelé haladva az azt alkotó csövek átmérője, illetve hossza valamint a nyákréteg vastagsága csökken, ami miatt a kibocsátott alfa-részecskéknek egyre kisebb utat kell megtenniük a célsejtig a légúti epitéliumon, illetve a légutakat kitöltő levegőn keresztül.

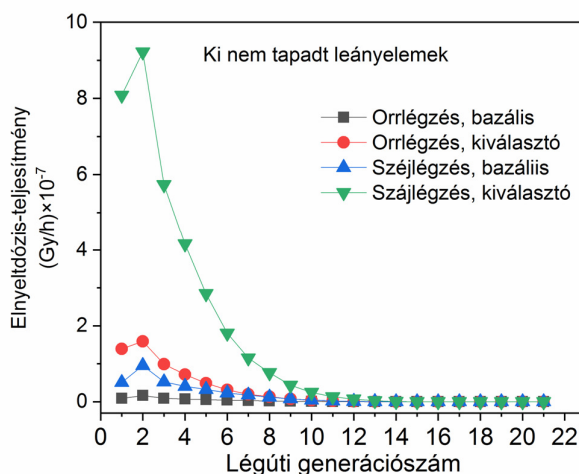
A légzési mód hatása a sejtmagokra vonatkozó elnyeltdózis-teljesítményekre

Fontos kérdés, hogy miképpen befolyásolja a légzési mód (orr vagy szájlégzés) az elnyeltdózis-teljesítményeket a légzőrendszer sugárérzékeny sejtjeiben. Ennek vizsgálatára számításokat végeztünk orr-, illetve szájlégző ülő egészséges felnőtt férfire. Mivel a felső légutak szűrőfunkciót is ellátnak, nagymértékben befolyásolhatják a légutak sugárterhelését.

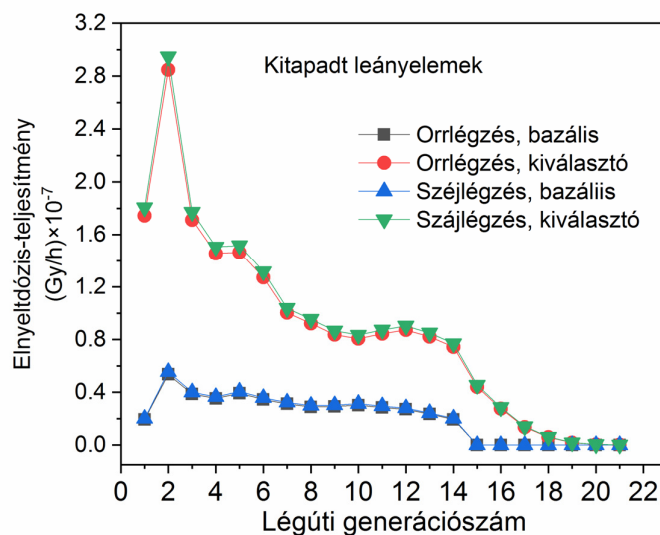
Az orr hatékony, míg a száj kevésbé hatékony szűrő az 1 nm-es mérettartományban.

Amíg orrlégzés esetén a belélegzett ki nem tapadt leányelemek kb. 90%-a már a felső légutakban kiül, addig szájlégzés esetén több, mint 58%-uk eléri a sugárérzékeny sejteket tartalmazó bronchiális régiót. Szájlégzés esetén ezért a légzőrendszerben található kiválasztó sejtek sugárterhelésének jelentős hányada származik a ki nem tapadt 218-as tömegszámú polónium atomok bomlásából (2. ábra). Orron át lélegezve az ezen izotóp bomlásából származó sugárterhelés csupán 20-30%-a a szájlégzés esetén tapasztalható dózisteljesítményekhez képest a nagy átmérőjű bronchusokban (légúti generáció 1-4).

A ki nem tapadt részecskékből származó dózisteljesítmények maximuma a második légúti generációban található. A légúti generációs szám növekedésével ezután gyorsan csökken a bronchiális légutak bazális és kiválasztó sejtjeinek sugárterhelése. Ez elsősorban azzal magyarázható, hogy a ki nem tapadt leányelemek igen nagy valószínűséggel ülepednek ki az első néhány bronchiális légútban (lásd az 1. ábrát).



2. ábra. A légzési mód hatása az elnyeltdózis-teljesítmények nagyságára ki nem tapadt radon leányelemek esetén



3. ábra. A légzési mód hatása az elnyeltdózis-teljesítmények nagyságára kitapadt radon leányelemek esetén

A kitapadt leányelemek bomlásából származó dózisteljesítmények maximuma, akár a ki nem tapadt leányelemek esetén, szintén a második légúti generációban található. A 2. és 3. ábrát összehasonlítva fontos azonban kiemelni, hogy a kitapadt részecskéknél (3. ábra) sokkal lassabb a sejtmagokra vonatkozó elnyeltdózis-teljesítmények csökkenése, mint a ki nem tapadt részecskéknél (2. ábra). Ez annak köszönhető, hogy ezen izotópok kiülepedési valószínűségének maximuma a 14. légúti generációban található (lásd az 1. ábrát). Más lesz tehát a dózisteljesítményeket befolyásoló paraméterek összhatása.

A kitapadt 200 nm-es átmérőjű leányelemek dóziseloszlását csupán kis mértékben befolyásolja az extrathorakális rendszer. Ezen izotópok kis valószínűséggel ülepednek ki a felső légutakban (orr-száj-garat-gége), valamint a bronchiális, illetve az acináris régióban is csekély a kiülepedés valószínűsége. Belégzés után számottevő hányadát lélegezzük ki ezért ezeknek az izotópoknak.

Mivel a kitapadt izotópok között nagyszámú 214-es tömegszámú ólom, illetve bizmut található, jelentős azon atomok száma, amelyek nem abban a légútban bomlanak el, ahol kiülepedtek. Nagymértékben befolyásolja tehát a nyáktisztulás a kitapadt radon leányelemek bomlásából származó dózisteljesítmények eloszlását. Ennek vizsgálatához nem megfelelőek a regionális tüdőmodellek, mint például a sugárvédelem által leggyakrabban alkalmazott Human Respiratory Tract Model [22].

A bemutatott eredmények alapján kijelenthető, hogy a légutak sugárterhelése erősen függ a légzési módtól. Széjlégzés esetén (elsősorban a ki nem tapadt 218-as tömegszámú polónium izotópok miatt) sokkal több energia nyelődik el a légzőrendszer sugárérzékeny bazális, illetve kiválasztó sejteinek magjaiban, mint orrlégzés esetén. Olyan helyeken, ahol nagy radon aktivitáskoncentráció mérhető, nem javasolt tehát szájon át lélegezni.

Erősen inhomogének továbbá a szimulált dózisteljesítmények a bronchiális légúti generációk mentén. A szimulációk szerint a nagy átmérőjű bronchiális légutak (légúti generáció 1-4.) azok, ahol a sejtmagokra vonatkoztatott elnyeltdózis-teljesítmények a legnagyobbak mindkét légzési mód esetén. Az irodalomban található tüdőpatológiai adatok [23, 24] igazolják, hogy a légzőrendszeri daganatok jelentős része éppen ott alakul ki, ahol modellszámításaink alapján legnagyobbak az elnyeltdózis-teljesítmények.

Az elvégzett szimulációk eredményei alapján kijelenthető továbbá, hogy jelentős különbség adódik a két modellezett sejttípus (bazális, kiválasztó) sugárterhelése között.

A bazális sejtek magjában elnyelt energia mennyisége mind kitapadt, mind ki nem tapadt leányelemek esetén kisebb a kiválasztó sejtek magjaiban elnyelt energiamennyiségnél. Ez a két sejttípus eltérő mélységeloszlásával magyarázható. A kiválasztó sejtek megtalálhatóak a légutaknak a kiüledett alfa-bomló izotópokhoz közel eső részén is. A bazális sejtek ezzel szemben jellemzően mélyen fekszenek, így a kibocsátott alfa-részecskék jelentős része előbb fékeződik le teljesen, minthogy elérné ezeket a sejteket.

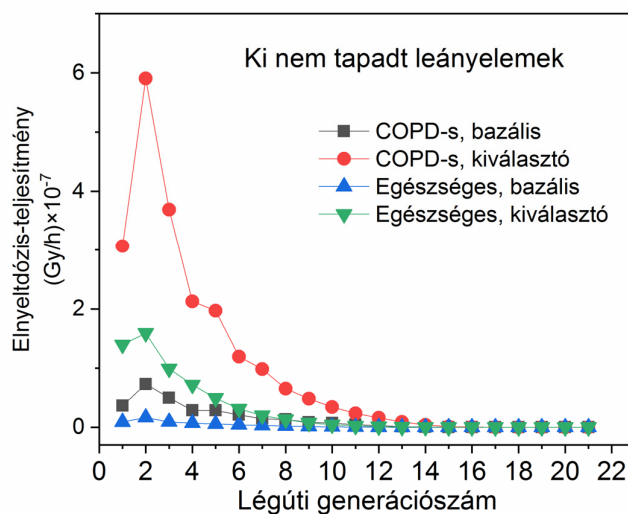
Az egészségi állapot hatása az elnyeltdózis-teljesítményekre

A légzési mód hatásán túl lényeges megvizsgálni, hogy hogyan befolyásolja az egészségi állapot (egészséges vagy légzőrendszeri megbetegedésben szenvedő) a légzőrendszer sugárérzékeny sejtjeinek esetében a sejtmagokra vonatkoztatott elnyeltdózis-teljesítményeket. Ennek vizsgálatára számításokat végeztünk mind egészséges mind krónikus obstruktív légzőrendszeri megbetegedésben (COPD) szenvedő felnőttek.

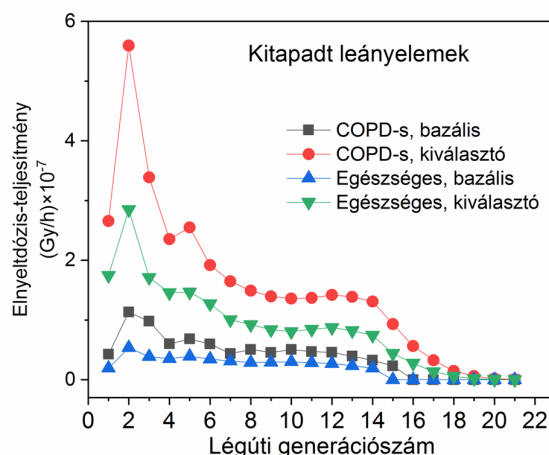
Az adott légútban kiüledett 218-as és 214-es tömegszámú polónium izotópok száma a kiüledett részecskefrakció nagyságán túl függ a belélegzett levegő mennyiségétől is. Ez a szimulált III. súlyossági osztály esetén $1,15 \text{ m}^3$ COPD-s esetben és $0,54 \text{ m}^3$ amennyiben ülő, egészséges alanyt vizsgálunk.

Bár az elnyeltdózis-teljesítmények lefutása hasonló, a sugárterhelés mértéke különböző beteg és egészséges légzőrendszerben (4-5. ábra)

Mivel a beteg, asztmás, illetve emfizémás légutak szűkebbek, beteg légzőrendszer esetén az egészségeshez viszonyítva megnő a kiüledett radonleányelemek száma, a találati valószínűség, továbbá az átlagosan leadott energiamennyiség is. Ez tovább erősíti az egységnyi idő alatti nagyobb belélegzett levegőmennyiség hatását. Ki nem tapadt leányelemek esetén a második légúti generációban körülbelül háromszor akkora az elnyeltdózis-teljesítmény COPD-s, mint egészséges esetben.



4. ábra. Az egészségi állapot hatása az elnyeltdózis-teljesítmények nagyságára ki nem tapadt radonleányelemek esetén



5. ábra. Az egészségi állapot hatása az elnyeltdózis-teljesítmények nagyságára kitapadt radonleányelemek esetén

Kitapadt leányelemek esetén, bár a különbség kisebb, mégis COPD-s esetben körülbelül kétszer nagyobb a sugárérzékeny sejtek magjában szimulált elnyeltdózis-teljesítmény, mint az egészséges alanyok esetében.

Jelentős mértékben eltér tehát az egészséges és a légzőrendszeri megbetegedésben szenvedő egyének légútjaiban található bazális és kiválasztó sejtek sugárterhelése. Eredményeink alapján kijelenthető, hogy ugyanazt a levegőt belélegezve beteg egyének esetén nagyobb lehet a potenciálisan rákhoz vezető elváltozások száma a légzőrendszer bronchiális régiójában, mint egészséges társaik esetében.

ÖSSZEFOGLALÁS

A légzőrendszer radonleányelemek alfa-bomlásából származó sugárterhelése ma még nem határozható meg kísérleti úton (a lokális biológiai hatást leírni képes) légúti generáció szintű felbontással.

A sugárvédelem e területén nélkülözhetetlenek tehát az egész légzőrendszeri tüdődozimetriai modellek.

A sejtmagokra vonatkoztatott elnyeltdózis-teljesítmények a belélegzett levegőben mérhető radonleányelem aktivitáskoncentráción, illetve részecskeméret-eloszláson túl erősen függenek a vizsgált egyén légzési módjától (orr- vagy szájlégzés), illetve egészségi állapotától (egészséges, asztmás, COPD-s) is.

A felső légutak (orr vagy száj, garat, gége) szűrő szerepe lényeges a légzőrendszer sugárterhelése szempontjából. Az orrlégzés a szájlégzéshez képest jelentős mértékben csökkenti a légzőrendszer sugárérzékeny bazális, illetve kiválasztó sejtjei esetében tapasztalható dózisteljesítményeket.

Beteg légutak esetén egészséges légzőrendszerhez képest jelentősen nagyobb továbbá a bronchiális légutak sugárterhelése.

Ezen eredmények jól demonstrálják, hogy a radonleányelemek bomlásából származó sugárterhelés meghatározása összetett feladat a légzőrendszerben, melyet számos -az egyéni adottságoktól függő- paraméter befolyásolhat.

Az elnyeltdózis-teljesítmények, ezáltal a biológiai hatás pontos becsléséhez személyre szabott radonleányelem-dozimetriára van tehát szükség.

E cél eléréséhez egy egyedülállóan finom felbontású és rendkívül flexibilis eszköz a Sztochasztikus Tüdőmodell új, Radact változata, melynek segítségével megvalósítható az egyénre szabott radonleányelem tüdődozimetria.

IRODALOM

- [1] BEIR VI Report. Health effects of exposure to radon. National Academy Press, Washington, DC. (1999)
- [2] UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. Sources and effects of ionizing radiation, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. (2000)
- [3] Haninger T, Size distributions of radon progeny and their influence on lung dose, Radon and Thoron in the Human Environment. Proceedings of the 7th Tohwa University International Symposium, World Scientific Singapore, New Jersey, London, Hong Kong. (1997)
- [4] Balásházy I, Hofmann W, Quantification of local deposition patterns of inhaled radon decay products in human bronchial airway bifurcations. Health Phys. 78, 2: pp.147-158. (2000)
- [5] Farkas Á, Balásházy I, Szöcs K, Characterization of regional and local deposition of inhaled aerosol drugs in the respiratory system by computational fluid and particle dynamics methods. Journal of Aerosol Medicine 19: pp. 329-343. (2006)
- [6] Farkas Á, Hofmann W, Szöke I, Balásházy I, Effect of site-specific bronchial radon progeny deposition on the spatial and temporal distributions of cellular responses. Rad.Env.Bioph. Volume 50, Issue 2: pp. 281–297 (2011)
- [7] Koblinger L, Hofmann, W, Analysis of human lungmorphometric data for stochastic aerosol deposition calculations. Phys. Med. Biol. 30: pp. 541–556. (1985)
- [8] Koblinger L, Hofmann W, Monte Carlo modelling of aerosol deposition in human lungs. Part I: Simulation of particle transport in a stochastic lung structure. J. Aerosol Sci. 21: pp. 661-674. (1990)
- [9] Hofmann W, Koblinger L, Monte Carlo modeling of aerosol deposition in human lungs. Part II: Deposition fractions and their sensitivity to parameter variations. J. Aerosol Sci. 21: 5, pp. 675-688. (1990)
- [10] Hofmann, W, Koblinger, L, Monte Carlo modeling of aerosol deposition in human lungs. Part III: Comparison with experimental data. Journal of Aerosol Science 23, 1: pp. 51- 63. (1992)
- [11] Raabe O G, Yeh H C, Schum G N, Phalen R N , Lovelace Foundation Report LF-53. (1980)
- [12] Haefeli-Bleuer, B, Weibel E.R, Morphometry of the human pulmonary acinus. Anatomical Records 220: pp. 401-414. (1988)
- [13] Salma I, Füri P, Németh Z, Lung burden and deposition distribution of inhaled atmospheric urban ultrafine particles as the first step in their health risk assessment. Atmos Environ 104: pp. 39–49. (2015)
- [14] Füri P, Hofmann W, Jókay Á, Balásházy I, Moustafa M, Czitrovsky B, Kudela G, Farkas, Á, Comparison of airway deposition distributions of particles in healthy and diseased workers in an Egyptian industrial site, Inhal.Toxic, 29(4): pp. 1-13 (2017)
- [15] Farkas Á, Jókay Á, Füri P, Balásházy I, Müller V, Odler B, Horváth A, Computer modelling as a tool in characterization and optimization of aerosol drug delivery. Aerosol Air Qual Res 15: pp. 2466-2474. (2015)

- [16] Farkas Á, Jókay Á, Balásházy I, Füri P, Müller V, Tomisa G, Horváth A, Numerical simulation of emitted particle characteristics and airway deposition of Simbicort® Turbuhaler® dry powder fixed combination aerosol drug. *European Journal Of Pharmaceutical Sciences* 93: pp. 371-379. (2016)
- [17] Cheng YS, Aerosol deposition in the extrathoracic region. *Aer Sci and Tech* 37: pp. 659-671.33. (2003)
- [18] International Commission on Radiological Protection (ICRP) Publication 65. Protection against radon-222 at home and at work. Pergamon Press (1993)
- [19] Chopra S.K, Measurement of tracheal mucociliary transport velocity in human smokers versus nonsmokers, *Am. Rev. Respir. Dis.*, 119, Suppl. 205.(1979)
- [20] Sturm R, Hofmann W, Stochastic modelling predictions for the clearance of insoluble particles from the tracheobronchial tree of the human lung. *Bulletin of Mathematical Biology* 69: pp. 395-415. (2007)
- [21] Mercer R. R, Russell M.L, Crapo, J.D, Radon dosimetry based on the depth distribution of nuclei in human and rat lungs. *Health Phys* 61: pp. 117–130. (1991)
- [22] ICRP Publication 66, Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection, *Annals of the ICRP* 24, Pergamon Press, Oxford, UK. (1994)
- [23] Veeze P, Rationale and methods of early detection in lung cancer. Assen, The Netherlands: Van Gorcum, (1968)
- [24] Garland LH, Beier RL, Coulson W, Heald JH, Stein RL, The apparent sites of origin of carcinomas of the lung. *Radiology* 78: pp. 1–11. (1962)
- [25] Füri P, Farkas Á, Madas B.G. et al. *Radiat Environ Biophys* (2019). <https://doi.org/10.1007/s00411-019-00814-0>

Készült a SOMOS alapítvány támogatásával