

A LÉGUTAK RADONLEÁNYELEMÉK BOMLÁSÁBÓL SZÁRMAZÓ SUGÁRTERHELÉSÉNEK EGYÉNI ADOTTSÁGOKTÓL VALÓ FÜGGÉSE

Füri Péter

Energiatudományi Kutatóközpont, 1121. Budapest, Konkoly-Thege M. út. 29-33.

furi.peter@ek-cer.hu

A kézirat beérkezett: 2023.02.17.

Közlésre elfogadva: 2023.06.21.

Fontos területe a sugárvédelemnek, hogy az adott egyén adottságai miképpen befolyásolják a légutak sugárterhelését. A Sztochasztikus Tüdőmodellel és az ahhoz kapcsolt dozimetriai modellel végzett számítások eredményei alapján kijelenthető, hogy a bazális és elválasztó sejtek radonleányelemek bomlásából származó sugárterhelése nagymértékben függ az olyan egyéni adottságoktól, mint a légzési mintázat, a nyákvastagság vagy a magasság. A nagyobb légzési térfogat növeli az elnyelt dózisokat, hiszen ekkor több radonleányelemet lélegzünk be. A nagyobb átmérőjű és hosszabb légutaknak – a célsejtekig megtett hosszabb alfa-részecske út miatt – dóziscsökkentő hatása van. Mindezek miatt a radonleányelemek bomlásából származó dózisteljesítmény becsléséhez a humán légutakban személyre kell szabni a dózisszámítást.

Kulcsszavak: légutak sugárterhelése, radon, sztochasztikus tüdőmodell, egyéni adottság

The effect of the individual characteristics of the subjects on the radiation burden of the airways originating from the decay of radon progeny

How the individual characteristics of a person affect the radiation burden of the airways is an important question of radiation protection. Calculations with the Stochastic Lung Model and a dosimetry model showed, that the absorbed doses in the nuclei of the basal and secretory cells – originating from the decay of the radon progeny– depend significantly on the individual characteristics of the subjects. Smaller amount of inhaled air and longer distance between the alpha-emitter and the target cells –caused by bigger body height – reduces the dose. These result show, that radon dosimetry must be personalized as much as possible.

Keywords: radiation burden of the airways, radon, stochastic lung model, individual characteristics of the subject

BEVEZETÉS

A radon nemesgáz, mely jellemzően nem kapcsolódik a környezeti levegőben lévő aeroszolokhoz, így nem ülepedhet ki a légutakban. Felezési ideje (3,8 nap) a légzési periódushoz viszonyítva hosszú (5 másodperc ülő egészséges felnőtt férfi esetén), ezért kicsi a valószínűsége, hogy éppen akkor bomlik el, ameddig a tüdőben van. Leányelemei, mint a 218-as és 214-es tömegszámú polónium, a 214-es tömegszámú ólom és bizmut nagy valószínűséggel tapadnak ki aeroszolok felszínére. A kitapadt, de a ki nem tapadt radonleányelemek is kiülepedhetnek a légutakban, így aztán – a kiülepedési helytől és a légutak tisztulási mechanizmusainak sebességétől függően – órákat vagy napokat is eltölthetnek a tüdőben, mely során nagy valószínűségű akár a 218-as, akár a 214-es tömegszámú polónium alfa-bomlása.

A kibocsátott alfa-részecskék hatótávolsága rövid, de LET (Linear Energy Transfer) értékük jelentős. Amennyiben eltalálják a DNS-t, nagy valószínűséggel okoznak sérülést az

örökítőanyagban. A javítás sok esetben nem tökéletes, mutációk keletkeznek, melyek a későbbiekben akár rákhoz is vezethetnek. A radonleányelemek egészségre gyakorolt jelentőségét mutatja, hogy kiülepedésük és bomlásuk a légutakban a dohányzás után a második legfontosabb oka a tüdőráknak [1].

Az ionizáló sugárzás biológiai hatásának meghatározása igen összetett feladat, hiszen számos más változó mellett a populáció egyes csoportjainak (pl. nők-férfiak, felnőttek-gyerekek) sugárérzékenysége nem azonos. A szolid tumorok kialakulási valószínűsége például nagyobb nők esetén [29]. Gyermekek esetén szintén ismert, hogy azonos dózison kitéve, esetükben nagyobb valószínűséggel alakul ki rákos megbetegedés [30].

Az ionizáló sugárzás okozta károsodás mértékének becslésekor a sugárvédelemben a Hiroshimára és Nagasakira ledobott atombombák túlélőin folytatott epidemiológiai tanulmányok eredményeit veszik alapul. E tanulmányok a károsodást az effektív dózis függvényében adják meg. A sugárvédelemben a radon esetén a konverzió konvenciót alkalmazzák [2]. Ez a gyakorlatban annak vizsgálatát jelenti, hogy az adott radonszintnek megfelelő kockázatot az atombombák túlélőinek vizsgálatából meghatározott „kockázat-effektív dózis” összefüggés mekkora effektív dózissra adná. A radon esetén a fő halálozást okozó hatás a tüdőrák kialakulása. A radontól származó károsodás kockázata ezért közelíthető a radon okozta tüdőrák miatti halálozás kockázatával [3].

Az elmúlt évtizedekben széles körben vizsgálták az uránbányákra és a lakásokra végzett, dózis-hatás összefüggéseket elemző epidemiológiai tanulmányokat. Ezek egy része nagy radonkoncentrációkra tartalmazott adatokat [4]. Később az UNSCEAR 2000 [5] riportban már kisebb radonszintre is közzétettek adatokat.

Az ICRP a 103-as kiadványában $4,2 \times 10^{-5}$ mSv⁻¹ és $5,7 \times 10^{-5}$ mSv⁻¹-es értékeket publikált tüdőrák kockázatra a dolgozók, illetve a lakosság tekintetében [6]. Ebből 9 mSv/WLM (Working Level Month) és 12 mSv/WLM érték számítható dóziskonverziós tényezőkre [2].

Dóziskonverziós tényezők az epidemiológiai vizsgálatok mellett meghatározhatók matematikai modellekkel is, mint az International Commission on Radiological Protection (ICRP) Human Respiratory Tract Modelje (HRTM) [7] vagy a Sztochasztikus Tüdőmodell [8,9,10].

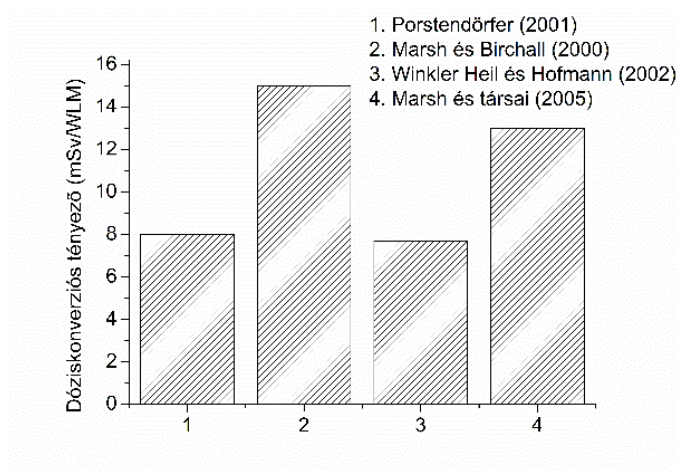
A humán tüdő egyes részeiben – a levegőt csak vezető bronchiális és a gázcserében is résztvevő acináris légutakat alkotó szövetben – lévő sugárérzékeny sejtek magjában elnyelt energia meghatározásához szükséges a légutakban kiülepedett kitapadt és ki nem tapadt radonleányelemek mennyiségének mérése vagy számítása.

A rendelkezésre álló mérési módszerek (pl. gamma-kamera) felbontása nem elegendően finom ahhoz, hogy képet kaphassunk a sok, akár térben átfedő légútban kiülepedett részecskékről. A szimulációk a matematikai aeroszol kiülepedési modellekkel és az azokhoz kapcsolódó radondozimetriai modellekkel egyedülálló lehetőséget kínálnak tehát a légutak sugárterhelésének becsléséhez.

A matematikai tüdőmodellek nagy múltra tekintenek vissza. 1935-ben Findeisen hozta létre az első teljes légúti aeroszolkiülepedési modellt [11]. Findeisen modelljét később Landahl finomította [12]. 1963-ban Weibel egy új morfológiai modellt hozott létre [13]. 1965-ben Beeckmans beépítette a Weibel-féle morfológiát Landahl modelljébe [14]. 1966-ban megjelent az ICRP első tüdőmodellje [15]. 1994-ben az ICRP új tüdőmodellt publikált [7]. Ezek egy része, például az International Commission on Radiological Protection (ICRP) Human Respiratory Tract Model-je (HRTM) [7] csupán a légutak nagyobb részeire (felső légutak, bronchiális és acináris légutak) képes részecske kiülepedési valószínűségeket számítani.

A Koblinger és Hofmann-féle Sztochasztikus Tüdőmodell [8,9,10]. finomabb felbontású, alkalmas tehát a kiülepedés számítására a tüdőt alkotó légúti bifurkációk minden szintjére (légúti generáció). A finom felbontás mellett a Sztochasztikus Tüdőmodell és a hozzá tartozó dozimetriai modell rendkívül flexibilis is, hiszen nagyszámú bemenő paraméter adható meg, mint például a légzési mintázat (a be- és kilégzés hossza, a légzési térfogat (tidal volume), a maradványkapacitás (FRC-Functional Residual Capacity)) és a légúti geometria (a légutak átmérője és hossza, az elágazási és gravitációs szögek).

A HRTM-et alkalmazva a dóziskonverziós tényezők számítására, lakás esetén körülbelül 15 mSv/WLM értéket kapunk [16]. Ez körülbelül háromszorosa az epidemiológiai módszerrel kapott értéknek [3,17]. Néhány, az irodalomban elérhető dóziskonverziós tényező számítás eredménye az 1. ábrán látható.



1. ábra: A radonleányelemek bomlásából származó a tüdőre vonatkozó dóziskonverziós tényezők (DCF) mások által számított értékei

Farkas Árpád és Balásházy Imre 2014-ben [2] a Sztochasztikus Tüdőmodell által számított kiülepedett részecskefrakciót és az ICRP 66 dozimetriai modelljét használva a BB régióra (1-8 légúti generáció) 5,40 mGy/WLM-et, a bb régióra (9-21 légúti generáció) 4,72 mGy/WLM-et, az alveoláris régióra pedig 0,19 mGy/WLM-et kapott. Az ezekből számolt effektív dózis 8,25 mSv/WLM. Ez igen hasonló a Porstendörfer (2001) [18] és a Winkler Heil és Hofmann (2002) [19] által számolt dóziskonverziós értékekhez.

Jelen, a Sztochasztikus Tüdőmodell továbbfejlesztett változatával és az új, saját fejlesztésű tisztulási és dozimetriai modellel azonos bemenő paraméterekre végzett szimulációk során a BB régióra 6,71 mGy/WLM-et, a bb régióra pedig 4,63 mGy/WLM-et kaptunk. Ezek a BB régióban 1,24-szer nagyobbak, de a bb régióban igen jó egyezést mutatnak a Farkas és Balásházy, az ICRP 66-os dozimetriai modellel végzett számításaival.

Mivel az elnyeltdózis-teljesítmények a tüdő alveoláris légútjaiban sokkal kisebbek, továbbá nincs nyáktisztulás a tüdő ezen alsó részén, a dozimetriai modell jelen verziója csupán a bronchiális légutakra számol elnyelt dózis-teljesítményeket.

Az elnyeltdózis-teljesítmények vagy a dóziskonverziós faktorok számításához használt modellek általában alkalmasak a radonleányelemek aktivitáskoncentrációjának figyelembevételére. Csupán igen korlátozott mértékben alkalmasak azonban e modellek a vizsgált személy olyan egyéni adottságainak a sugárterhelésre gyakorolt hatásának vizsgálatára, mint a légzési mintázat vagy a légutak hossza, átmérője. Nem vizsgálták tehát azt, hogy adott aktivitáskoncentrációra (pl. 40 Bq/m³) a vizsgált személy egyéni adottságai hogyan befolyásolják a légutak sugárterhelését.

A Sztochasztikus Tüdőmodell egyedülálló eszköz ennek vizsgálatára. E tanulmány célja annak a bemutatása, hogy a légzési mód, a légúti geometria és a légutakban található nyák vastagsága külön-külön hogyan befolyásolja a légutak sugárterhelését

Eszközök és módszerek

A belélegzett radonleányelemek légúti kiülepedésseloszlásának vizsgálata

A belélegzett kitapadt és ki nem tapadt radonleányelemek légúti kiülepedésseloszlását a Sztochasztikus Tüdőmodellel [8,9,10]. számítottuk. A ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi és a ^{214}Po nyáktisztulás közbeni mozgását, a bomlási valószínűségeket a nyáktisztulás során, illetve a kibocsátott alfa-részecskék pályáját egy saját fejlesztésű tisztulási és dozimetriai modellel szimuláltuk.

A sugárérzékeny bazális és elválasztó sejtek mélységeloszlását a légúti hámszövetben a Mercer és társai [20] által publikált adatok alapján határoztuk meg.

A vizsgált légzési mintázatok az 1. táblázatban találhatók. Mind az öt szimuláció során orrlégzést feltételeztünk. Az orrban kiülepedett részecskefrakciót a Cheng és társai [21] által közzétett empirikus formulával számítottuk.

1. táblázat. A vizsgált légzési módok és testmagasságok

Sorszám	Légzési térfogat (cm ³)	Belégzés és kilégzés hossza (s)	Nyákvastagság	Testmagasság (cm)
1.	750	2,5	vékony	176
2.	750	2,5	normális	176
3.	750	2,5	vastag	176
4.	750	1,5	normális	176
5.	500	2,5	normális	176
6.	750	2,5	normális	150

A nyákvastagságokat normális esetben az ICRP 66-os kiadványból vettük [7]. Vastag esetben a nyákvastagság a normális háromszorosa [22]. Vékony esetben a nyákvastagság a normális vastagság kb. 63%-a. Ez a 176 cm-es, felnőtt férfire jellemző magasság és a 110 cm-es, 5 éves gyerekekre jellemző magasság [7] aránya. Ezt irodalmi adatok hiányában csupán a szemléltetés kedvéért választottam (2. táblázat).

A nyák sebessége 0,55 cm/perc [23] volt a tracheában (1. légúti generáció) minden szimuláció során. A nyáksebesség csökkenése 0,67-szeres volt, ahogy az elsőtől az utolsó bronchiális légúti generáció felé haladtunk [24].

2. táblázat: A nyákvastagságok vékony vastag és normál esetekre

Légúti generáció	Vékony (μm)	Normális (μm)	Vastag (μm)
1	7,96	12,24	36,74
2	7,00	11,00	33,00
3	7,00	11,00	33,00

Légúti generáció	Vékony (μm)	Normális (μm)	Vastag (μm)
4	7,00	11,00	33,00
5	6,87	10,58	31,75
6	6,60	10,16	30,50
7	6,33	9,75	29,25
8	6,06	9,33	28,00
9	5,79	8,91	26,70
10	5,52	8,50	25,50
11	5,25	8,08	24,25
12	4,98	7,66	23,00
13	4,71	7,25	21,75
14	4,44	6,83	20,50
15	4,17	6,41	19,25
16	3,90	6,00	18,00
17	3,62	5,58	16,75
18	3,35	5,16	15,50
19	3,08	4,75	14,25
20	2,81	4,33	13,00
21	2,54	3,91	11,75

A kitapadt és a ki nem tapadt radonleányelemeket leíró adatok

A ^{218}Po , ^{214}Pb és a ^{214}Bi aktivitáskoncentrációinak aránya 0,58:0,44:0,29 [5] volt. A radonleányelemek aktivitáskoncentrációja beltéri levegőben 10 Bq/m^3 -től több száz Bq/m^3 -ig terjedhet [5]. A szimulációkat egy közepesnek mondható, 40 Bq/m^3 -es radonleányelem aktivitáskoncentrációra végeztük el. A kitapadt leányelemek 6%-át képviselték a potenciális alfaenergia-koncentrációnak [25]. A ki nem tapadt leányelemek 0,8 nm-es aktivitás medián termodinamikai átmérőjűek voltak (Geometric Standard Deviation (GSD)=1,3), míg a kitapadt leányelemek 230 nm aktivitás medián aerodinamikus átmérővel és 2,1-es GSD-vel voltak leírhatók [26]. A higroszkopikus növekedési faktor 1 volt a ki nem tapadt és 2 a kitapadt leányelemek esetén.

Eredmények és megbeszélés

Az egységnyi idő alatt kiülepedett részecskeszám függése az adott alany légzési mintázatától és magasságától

A bronchiális légutakban egységnyi idő alatt kiülepedett részecskeszám nagymértékben függ a légzési mintázattól. Az egy légvétellel belélegzett levegőtér fogatnak és a légzési frekvenciának mind a ki nem tapadt, mind a kitapadt radonleányelemek esetében kettős szerepe van:

- meghatározzák a belélegzett részecskeszámot
- hatással vannak a depozíciós mechanizmusokra (gravitációs ülepedés, diffúzió, impakció).

Nagyobb légzési térfogat és a rövidebb be- és kilégzési idő nagyobb belélegzett részecskeszámot jelent. Ugyanakkor, mivel a levegő sebessége ilyenkor nagyobb, a légutakban, a részecskéknek kevesebb idejük van kiüledni. Ez csökkenti a diffúzió és a szedimentáció által kiülepített részecskeszámot, az impakció hatásfokát azonban növeli. A nagyobb levegősebesség mélyebbre sodorhatja továbbá a belélegzett részecskéket a légutakban, kisebb tehát a kilélegzett részecskék aránya.

A ki nem tapadt leányelemek esetén egyértelműen a diffúzió a domináns kiüledési mechanizmus. Nagyobb légzési térfogat és a rövidebb be- és kilégzés csökkenti a kiüledési valószínűséget. A nagyobb méretű kitapadt leányelemeknél már – bizonyos körülmények esetén – a gravitációs üledés és az impakció is jelentős kiülepítő tényezővé válik. Fontos azonban kiemelni, hogy a radonleányelemek tipikus méretére, mely kisebb néhány száz nanométernél, még a kitapadt leányelemek esetén is a diffúzió a fő kiüledési mechanizmus.

A légzési térfogat, valamint a be- és kilégzési idő függ a nemtől, kortól, az egészségi állapottól és a végzett fizikai munkától is. Gyermekek és nők esetén kisebb a légzési térfogat, de rövidebb a be- és kilégzési idő, mint felnőtt férfi esetén. Egészséges alany esetében a fokozott fizikai aktivitás nagyobb légzési térfogattal és rövidebb be- és kilégzési idővel jár (3. táblázat) [7]. Légúti betegség (pl. asztma, bronchitisz) esetén a súlyosságtól függően a légzési térfogat általában nagyobb, és több légvétel történik egy perc alatt, mint egy egészséges személynél.

3. táblázat: A légzési térfogat és a be- és kilégzési idő nemtől és fizikai aktivitástól való függése

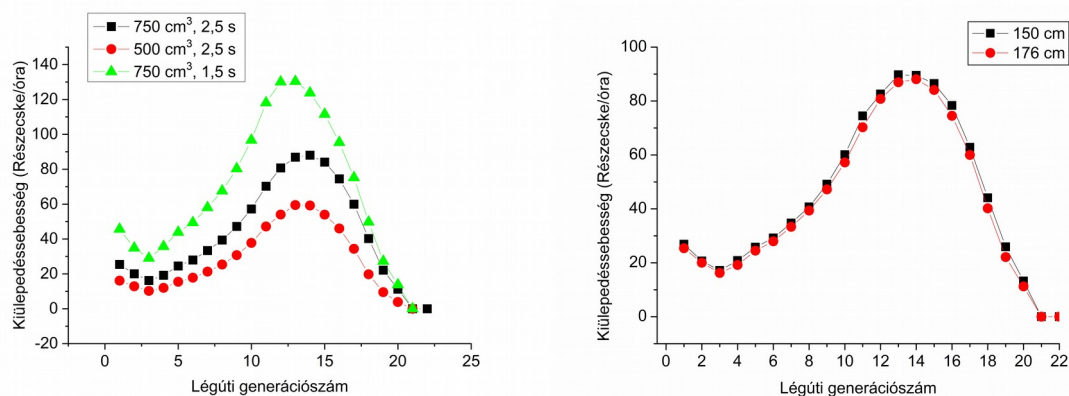
Aktivitás	Férfi légzési térfogat (cm ³)	Férfi be- és kilégzési idő (s)	Nő légzési térfogat (cm ³)	Nő be- és kilégzési idő (s)
Alvás	625	2,5	444	2,5
Ülés	750	2,5	464	2,14
Könnyű fizikai munka	1250	1,5	992	1,42
Nehéz fizikai munka	1923	1,15	1364	0,91

Az egységnyi idő alatt kiüledett részecskeszám (kiüledési sebesség) a nagyobb, 750 cm³-es légzési térfogat és a rövidebb, 1,5 másodperces be- és kilégzési idő esetén a legnagyobb (2. ábra bal oldali panel). Ez annak köszönhető, hogy annyi nagyobb 1,5 másodperces belégzés esetén az egységnyi idő alatt belélegzett levegőtérfogat és radonleányelem szám, hogy ez felülírja a rövidebb belégzési idő miatti kisebb kiüledési valószínűséget. Olyan személyek esetén tehát, akik például asztma miatt sűrűbben vesznek levegőt, nagyobb kiüledett radonleányelem mennyiséggel számolhatunk a légutakban.

500 cm³-es légzési térfogat esetén kisebb a belélegzett levegőtérfogat. A légutak nagy részén kisebb továbbá a részecskék kiüledési valószínűsége is, hiszen a 750 cm³-es belégzési térfogathoz képest kisebb levegősebesség nem tudja olyan mélyre vinni a részecskéket a tüdőben, így nagyobb a kilélegzett részecskék aránya. E két egymást erősítő hatás összegeként tehát 500 cm³-es légzési térfogat és 2,5 másodperces be- és kilégzési idő esetén kapjuk a legkisebb kiüledési sebességeket. Ez az összehasonlítás (500 vs. 750 cm³ légzési térfogat) jól szemlélteti az ülő férfi-nő közötti különbséget (3. táblázat). Nők esetén tehát kevesebb radonleányelem üledik ki adott idő alatt a légutakban.

A gyermekek alacsonyabbak a felnőtteknél. A nők magassága, átlagosan szintén kisebb a férfiak magasságánál. E paraméter, mivel ettől függ a légutak átmérője, hatással van a részecske kiülepedési mechanizmusokra [28]. Phalen R.F. [27] adatai szerint a 150 cm-es magasság esetén, a felnőtt kaukázusi férfire jellemző 176 cm-es magassághoz képest kisebbek a légutak, mely – azonos levegősebesség mellett – növeli a diffúzió és a gravitációs ülepedés által kiülepített részecskeszámot. Azonos belélegzett levegőmennyiség mellett azonban szűkebb csövekben nagyobb a levegősebesség, mely csökkenti a diffúzió és a szedimentáció által kiülepített részecskemennyiséget.

Mint az a 2. ábra jobb oldali paneljén látható, a kiülepedési sebesség körülbelül azonos 150 cm-es és 176 cm-es testmagasság esetén. Ez annak köszönhető, hogy a szűkület kiülepedésnövelő hatását ellensúlyozza a megnövekedett levegősebesség kiülepedéscsökkentő hatása.



2. ábra. Bal oldali panel: a részecske kiülepedési sebességek háromféle légzési mintázatra (176 cm magasságra) Jobb oldali panel: a részecske kiülepedési sebességek kétféle magasságra (750 cm³ légzési térfogat, 2,5 másodperces be- és kilégzési idő)

Az elnyeltdózis-teljesítmények függése az adott alany légzési mintázatától és magasságától

A légúti hámszövet két fő sugárérzékeny sejtípusa a bazális és az elválasztó sejtek. A bazális sejtek Mercer és társai [20] adatai alapján csak a hámszövet mélyebb részén találhatók nagyobb mennyiségben. Az elválasztó sejtek megtalálhatóak a légúti hámszövetnek a légutak felszínéhez közelebbi részén is. A ²¹⁸Po egy 6 MeV-es, míg a ²¹⁴Po egy 7,69 MeV-es alfa-részecskét bocsát ki, melyek hatótávolsága rövid, mindössze körülbelül 47 és 67 μm -es a szövetben. A bazális sejtek sok esetben túl mélyen vannak, hogy ezek az alfa-részecskék elérhessék őket. Az elválasztó sejtek azonban számos esetben elérhető távolságban vannak még a 6 MeV-es alfa-részecskéknek is. E sejtípus esetén sokkal nagyobb tehát mind a találati valószínűség, mind az egy kibocsátott alfa-részecskére eső, a sejtmagban elnyelt energiamennyiség is. Nem meglepő tehát, hogy a sugárterhelés minden légúti generációban nagyobb az elválasztó sejtekre.

Az elnyeltdózis-teljesítmények erősen inhomogének a légutakban. A legnagyobb sugárterhelés mind a hat szimuláció során az első néhány bronchiális légútban (centrális légutak) található. Ez annak köszönhető, hogy itt még kevés légúti cső van kis felülettel, nagy tehát a légutak egységnyi felületére eső alfa-bomlásszám. Egy adott bazális vagy elválasztó sejtet szemlélve átlagosan több alfa-részecske van „hatótávon belül” a nagy bronchiális légutakban.

Ahogy a felső légutaktól lefelé haladunk a tüdőben, egyre nagyobb a légutak száma és felülete. A 6 és 7,67 MeV-es alfa-részecskék a túl nagy távolság miatt nem jutnak át a légutak

közötti szöveten. Egy adott célsejtet szemlélve egyre több alfa-részecske lesz tehát „hatótávon kívül”. Ez csökkenti a dózisteljesítményt.

Egy adott légutat szemlélve viszont az alfa-részecskéknek az egyre kisebb légutakban átlagosan egyre rövidebb utat kell megtennie az elbomló ^{218}Po vagy ^{214}Po -tól a bazális vagy az elválasztó célsejtekig. A nyák vastagsága is csökken, ahogy a felső légutaktól (orr-száj, garat, gége) a tüdő mélyebben fekvő bronchiális légútjai felé haladunk. Egy adott légútban és egy alfa-részecskét szemlélve, a centrális légutaktól lefelé haladva nő annak a valószínűsége, hogy még elérhetik a bazális és elválasztó sejtek magját. Emiatt megnő az egy kibocsátott alfa-részecskére eső, a sejtmagban elnyelt energia mennyisége is, ahogy az egyre rövidebb és kisebb átmérőjű bronchiális légutak felé haladunk. E két hatás, hogy kevesebb ^{218}Po és ^{214}Po fog adott légútba esni, ám azok az alfa-részecskék, amiket ezen atomok kibocsátanak, nagyobb valószínűséggel fogják elérni a célsejteket, egymás ellen hat. A gyakorlatban ezek közül a legtöbbször az első hatás (az adott légútba eső bomlásszám) az erősebb. Ennek hatására a legtöbb esetben az első néhány bronchiális légút sugárterhelése a legnagyobb.

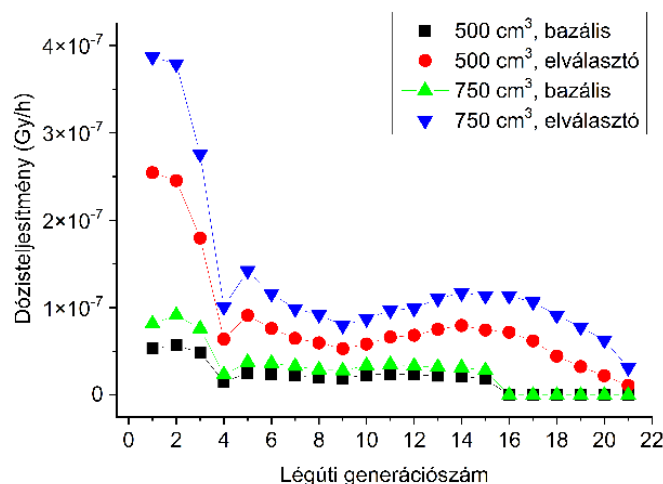
Az adott személy egyéni adottságai jelentősen befolyásolják a bazális és elválasztó sejtek magjában elnyelt energia mennyiségét. A légzési térfogat és a be- és kilégzési idő hatásának figyelembevétele ezért fontos a bronchiális légutak sugárterhelésének számításakor. A fokozott fizikai munka miatti rövidebb be- és kilégzési idő és nagyobb légzési térfogat például a több belélegzett radonleányelem miatt általában nagyobb dózisteljesítményekhez vezet.

A légzési térfogat hatása

A légzési térfogatnak a kiüledési sebességeken túl hatása van a légutak hosszára, átmérőjére is. Amennyiben több levegőt szívunk be, a tüdő jobban kitágul. A Sztochasztikus Tüdőmodell ezt a légutak átmérőjének és hosszának a légzési térfogat felével történő módosításával szimulálja. Nagyobb légzési térfogat esetén nagyobb utat kell tehát általában megtennie a ^{218}Po vagy a ^{214}Po által kibocsátott alfa-részecskéknek. Ez bizonyos mértékben ellensúlyozza a nagyobb belélegzett radonleányelem-szám dózisznövelő hatását.

A 3. ábrán a sugárérzékeny bazális és elválasztó sejtek magjaira vonatkozó elnyeltdózis-teljesítményeket hasonlítottuk össze azonos légzési frekvenciára (12/perc), de eltérő légzési térfogatra (750 cm^3 -re és 500 cm^3 -re).

Mint az a 3. ábrán látható, a kisebb légzési térfogat miatti szűkebb légutak nem képesek teljes mértékben kompenzálni a belélegzett kisebb számú radonleányelem dóziscsökkentő hatását. Az elnyeltdózis-teljesítmények azonos be- és kilégzési idő (2,5 s) esetén kisebbek az 500 cm^3 -es légzési térfogatra.

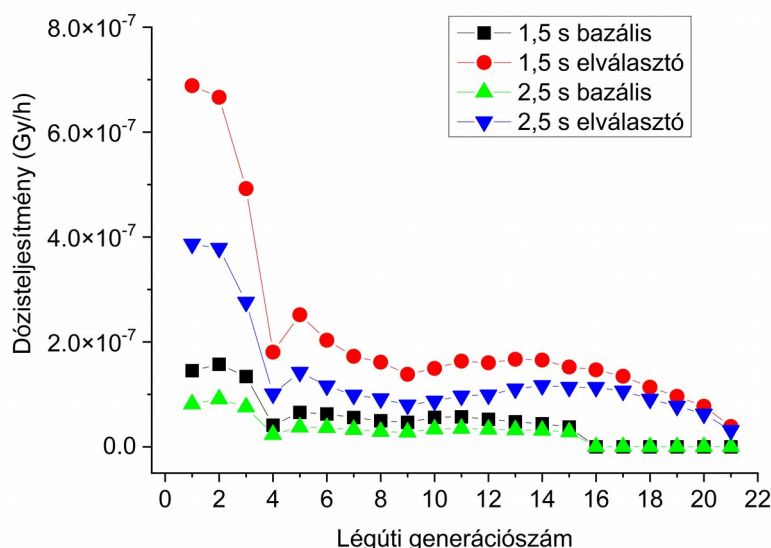


3. ábra. Az elnyeltdózis-teljesítmények légzési térfogattól (tidal volume) való függése

A be-és kilégzési idő hatása

A légzési térfogat mellett egy másik fontos paraméter, ami hatással van mind a belélegzett radonleányelemek légúti kiülepedéseloszlására, mind az azok bomlásából származó sugárterhelésre, az a be- és kilégzési idő.

Mint az a 4. ábrán látható, az elnyeltdózis-teljesítmények nagyobbak a rövidebb, 1,5 másodperces be- és kilégzési időre. Ez egyértelműen a nagyobb belélegzett levegőtérfogatnak köszönhető, hiszen a részecske kiülepedési valószínűség a bronchiális légutak többségében kisebb a rövidebb légzési idő miatt. A fokozott fizikai aktivitás (például futás) során nagyobb a légzési térfogat és rövidebb a be-és kilégzés is. E két egymást erősítő hatás – alváshoz vagy üléshez képest – jelentősen megnöveli a légutak sugárterhelését. Nem biztos, hogy egészséges tehát például alagsorban lévő, nagy radonleányelem aktivitáskoncentrációt tartalmazó levegőjű fitnesztermekben sportolni.



4.ábra: az elnyeltdózis-teljesítmények légzési frekvenciától való függése

A nyákréteg vastagságának hatása

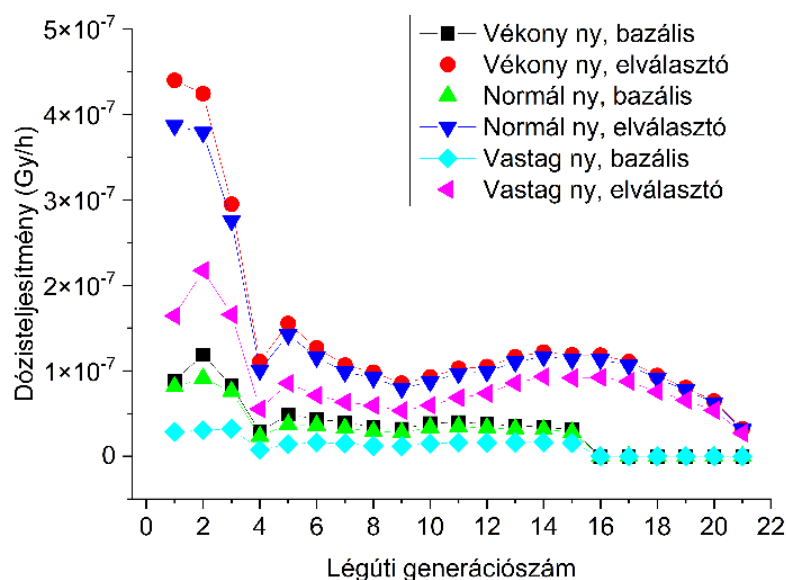
A légúti szövetben elnyelt energia mennyiségét a be- és kilégzési idő és a belélegzett levegőtérfogat mellett jelentősen befolyásolja a légutakat borító nyákréteg vastagsága is.

Ez függ a kortól, a magasságtól és az egészségi állapottól. A légutak számos környezeti tényezőre, mint a fertőzésekre, a pollenekre, vagy a dohányzás során a tüdőbe kerülő káros anyagokra fokozott nyákkiválasztással és/vagy gyulladással reagálnak, mely következtében beszűkülhetnek vagy akár el is záródhatnak a légutak. A vastag nyák forgatókönyv tehát igaz lehet egy légúti fertőzéssel küzdő emberre vagy egy nem túl súlyos asztmával küzdő betegre. A „vékony nyák” forgatókönyv olyan esetekben képzelhető el, mikor egy gyermekről vagy egy alacsony felnőttől van szó. Gyermekek esetén a nyákréteg lassabban mozog [28] és a kisebb méretű légutak miatt valószínűleg vékonyabb is. Sajnos még egészséges felnőttre is igen kevés mérési adat áll rendelkezésre, mely a légutak felszínét fedő nyákréteg vastagságát és sebességét vizsgálja, gyermekekre pedig, mivel az in vivo mérés nem kellemes, szinte lehetetlen mérési adatot találni. Gyermekek esetén tehát csupán a felnőttekre jellemző nyákvastagság magasságfüggő „leskálázása” jöhet szóba.

A nyákréteg egészséges esetben a centrális légutakban a legvastagabb. Az ICRP Human Respiratory Tract Modellje [7] 11 μm -es nyák+csilló (cilia+sol) vastagságot javasol a BB

azaz a nagy átmérőjű bronchiális légutakra, míg a bb régióra, azaz a kis átmérőjű bronchiális légutakra ez az érték már csak 6 μm -es.

„Normál” nyákvastagság esetén még a centrális légutakban is jelentős mennyiségű kibocsátott alfa-részecske tudja elérni mind a bazális, mind az elválasztó sejtek magjait. „Vastag” nyákréteg esetén azonban már sok alfa-részecske előbb veszíti el az összes energiáját, minthogy elérné a célsejteket. Ennek köszönhetően, az elnyeltdózis-teljesítmények kisebbek vastag nyákréteg esetén (5. ábra). Ez jól mutatja, hogy olyan egyének esetén, akiknek valamilyen okból, például légúti megbetegedés miatt vastagabb nyákréteg borítja a légútjait, ugyanazt a levegőt belélegezve - amennyiben ugyanaz a légzési térfogat és frekvencia, kisebb sugárterheléssel számolhatunk.



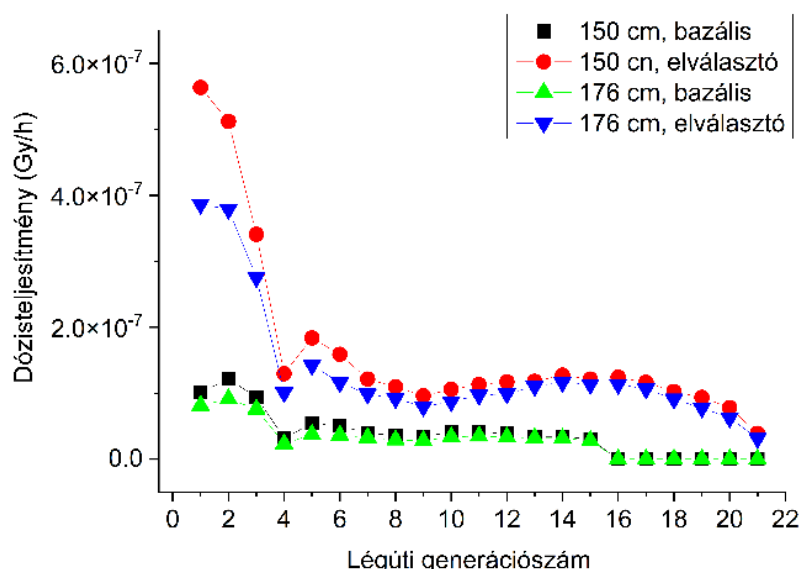
5. ábra: az elnyeltdózis-teljesítmények nyákvastagságtól való függése

A normálisnál vékonyabb nyákréteg esetén a dózisznövelő hatás nem olyan feltűnő, mint a vastag nyákréteg dóziscsökkentő hatása. Ez azzal magyarázható, hogy a normál nyákréteg már elég vékony, hogy ne okozzon jelentős energiavesztést az alfa-részecskének. További vékonyítás csupán az első három légútban okoz számottevő dózisznövelést.

A testmagasság hatása

Az adott egyén magassága, mivel ez jelentősen befolyásolja a légutak méretét, hatással van mind a kiülepedett radonleányelem-számra, mind a kibocsátott alfa-részecskék pályájára is. Alacsonyabb emberek esetén a légutak rövidebbek és szűkebbek. A kiülepedési sebességek, mint az az 2. ábra jobb oldali paneljén látható, körülbelül azonosak a 150 cm-es testmagasság esetén. A kisebb légutak miatt 150 cm-es magasság esetén nagyobb lesz azonban a bazális és elválasztó sejtek találati valószínűsége és egy kibocsátott alfa-részecskét vizsgálva átlagosan nagyobb mennyiségű energiát adnak le e részecskék a célsejtek magjaiban.

E hatások összegeként az elnyeltdózis-teljesítmények, bár ez a bazális sejtek esetén nem igazán látványos mindig, de nagyobbak 150 cm-es magasság esetére minden légúti generációban (6. ábra).



6. ábra: Az elnyeltdózis- teljesítmények magasságtól való függése

A légzési térfogat, a be- és kilégzési idő, a nyákvastagság és a testmagasság hatása a valóságban együtt, egymást erősítve vagy éppen gyengítve jelentkezik. Jó példa erre az asztma, mikor egészséges emberhez viszonyítva megnő a belélegzett levegőmennyiség, illetve összehúzódnak a légutak, mely növeli a dózist, vastagabb azonban a nyákréteg, mely csökkenti a sugárterhelést. Az, hogy ezek közül melyik hatás az erősebb, az adott egyén tulajdonságai határozzák meg. Számításaink szerint – egészséges ülő férfihez viszonyítva – asztmás egyéneknél és gyermekek esetén, a bronchiális légutak sugárterhelése nagyobb azonos kitettség esetén (pl. 40 Bq/m^3 egy órán át). A sugárvédelmi gyakorlat pontosabbá tételéhez érdemes lenne tehát a populáció nagyobb csoportjaira (pl. felnőtt-gyermek, egészséges-légúti megbetegedésben szenvedő alanyok) esetére külön-külön dóziskonverziós tényezők bevezetésére.

ÖSSZEFOGLALÁS

A fenti összehasonlítások jól mutatják, hogy a légúti hámszövet sugárérzékeny sejtjeinek magjára vonatkozó elnyeltdózis-teljesítmények – a levegőben mérhető radonleányelem aktivitáskoncentráción túl – jelentősen függnek az adott személy egyéni adottságaitól, mint a légzési mintázat, a légutakat borító nyák vastagsága vagy a magasság.

A fokozott fizikai munka nagyobb belélegzett leányelemszámot okoz. Ez növeli a dózist. Ezzel ellentétben, a sugárterhelést csökkentő hatású az, hogy a nagyobb légzési térfogat miatt kitágulnak a légutak és a nagyobb levegősebesség miatt kevesebb a kiüledésre rendelkezésre álló idő is. Az utóbbi két tényező (nagyobb légutak és kevesebb idő) általában nem tudják teljes mértékben ellensúlyozni a több belélegzett radonleányelem dózisznövelő hatását. Az ülés helyett végzett könnyű fizikai munka ezért számításaink szerint növeli a légutak sugárterhelését. Azonos kitettség (pl. 40 Bq/m^3 radonleányelem aktivitáskoncentráció 1 órán át) esetén tehát a vizsgált személyek egyéni légzési mintázata jelentősen befolyásolja az elnyeltdózis-teljesítményeket a légutakban.

A nyákvastagság egy további, az adott egyénre jellemző paraméter, ami jelentős mértékben befolyásolja a légutak sugárterhelését. Például a légúti megbetegedés (meghűlés, asztma stb) miatti vastagabb nyákréteg esetén jelentősen csökken az az alfa-részecskeszám,

ami eléri a célsejteket. A normálisnál vékonyabb nyákréteg csupán az első három légúti generációban okoz jelentős dózisznövekedést, hiszen a kis átmérőjű bronchiális légutakban a nyák már normál esetben is elég vékony ahhoz, hogy a ^{218}Po vagy a ^{214}Po által kibocsátott alfa-részecskék ne veszítsenek jelentős mennyiségű energiát, miközben áthaladnak rajta.

A légzési mintázat és a nyákvastagság mellett számottevően befolyásolja az elnyeltdózis-teljesítményeket a magasság is, hiszen alacsonyabb egyének esetén kisebbek a légutak, mely megnöveli a részecske kiülepedési valószínűségeket. Továbbá kisebb testmagasság esetén nagyobb a célsejtek találati valószínűsége, és ennek következtében az egy kibocsátott alfa-részecskére eső, a bazális és az elválasztó sejtek magjában elnyelt energia is több.

Az elvégzett modellszámítások bebizonyították, hogy a vizsgált személy egyéni adottságai jelentős mértékben befolyásolják a bronchiális légutak sugárterhelését. A radonleányelemek bomlásából származó sugárterhelés számításakor tehát lehetőség szerint figyelembe kell venni a légzési mintázatot, a testmagasságot, illetve az egészségi állapotot, ami hatással van a légutakat borító nyák vastagságára. Ez lehetséges lenne külön dóziskonverziós faktorok létrehozásával a populáció egyes nagyobb csoportjaira. Ehhez egyedülálló eszköz a Sztochasztikus Tüdőmodell és az ahhoz kapcsolt dozimetria modell.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] World Health Organization (WHO) handbook on indoor radon: a public health perspective. 2009, World Health Organization, Geneva, Switzerland
- [2] Farkas Á, Balásházy I: Radon és leányelemeihez kapcsolódó dóziskonverziós tényezők számítása komplex numerikus modellek és saját fejlesztésű szoftver segítségével. 2 Sugárvédelem, VII. évf. 1. szám. 10–26. 2014.
- [3] ICRP Publication 60, Risks associated with ionising radiations, Pergamon Press, 1991.
- [4] BEIR VI Report. Health effects of exposure to radon. National Academy Press, Washington, DC. 1999.
- [5] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR): Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. Sources and effects of ionizing radiation. 2000.
- [6] ICRP Publication 103. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Annals of the ICRP 37 (2-4). Ed: J. Valentin, Elsevier, 2007.
- [7] International Commission on Radiological Protection (ICRP) Publication 66 Human respiratory tract model for radiological protection. Pergamon Press, UK; 1994.
- [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. 661–674. 1990.
- [9] Hofmann W, Koblinger. Monte Carlo modeling of aerosol deposition in human lungs. Part II: Deposition fractions and their sensitivity to parameter variations. J.Aerosol Sci. 21/5 675–688. 1990.
- [10] Hofmann W, Koblinger L. Monte Carlo modeling of aerosol deposition in human lungs. Part III: Comparison with experimental data. J.Aerosol Sci. 23/1 51–63. 1992.
- [11] Findeisen, W., Über das Absetzen kleiner in der Luft susperdierten Teilchen in der menschlichen Lunge bei der Atmung. Pflügers Archiv Ges. Physiologie 236, pp. 367–379. 1935.
- [12] Landahl, H.D., On the removal of airborne droplets by the human respiratory tract. I. The Lung. Bulletin of Mathematical Biology, 12, pp. 43–56. 1950.
- [13] Weibel, E.R. Morphometry of the Human Lung. Springer Verlag and Academic Press, Berlin, New York. 1963.

- [14] Beeckmans, J.M., Correction factor for size-selective sampling results, based on a new computer alveolar deposition curve. *Annals Occupational Hygiene*, 8, pp. 221-231. 1965.
- [15] ICRP Publications 9, Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Pergamon Press, Oxford, UK. 1966.
- [16] Marsh JW, Birchall A, Sensitivity analysis of the weighted equivalent lung dose per unit exposure from radon progeny. *Radiation Protection Dosimetry* 87: 167–178, 2007.
- [17] ICRP Publication 65, Protection against radon at home and work. *Annals of the ICRP* 23 (2), 1993.
- [18] Porstendörfer J. Physical parameters and dose factors of the radon and thoron decay products. *Radiation Protection Dosimetry* 94: 365–373, 2001.
- [19] Winkler-Heil R, Hofmann W. Comparison of modelling concepts for radon progeny lung dosimetry. *Proceedings of Fifth International Conference – High Levels of Natural Radiation and Radon Areas: Radiation Dose and Health Effects*, September 2000, Munich. Elsevier, Amsterdam, pp. 169–177, 2002.
- [20] Mercer, R. R., Russell, M.L. and Crapo, J.D. Radon dosimetry based on the depth distribution of nuclei in human and rat lungs. *Health Phys* 61, 117–130. 1991.
- [21] Cheng K.H, Cheng Y.S, Yeh H.C, Guilmette R.A, Simpson S.Q, Yang Y.H, Swift D.L: In vivo measurements of nasal airway dimensions and ultrafine aerosol deposition in the human airways. *J.Aerosol Sci.* Vol.27. No. 5, pp. 785–801, 1996.
- [22] Baias P.F, Hofmann W, Winkler-Heil R, Dului O.G: Chronic smoker lung dosimetry of radon progeny. *Romanian Reports in Physics*, Vol. 61, No. 4, P. 669–675, 2009.
- [23] Cuddihy, R.G, Yeh H.C. Respiratory tract clearance of particles and substances dissociated from particles. *Inhal. Toxicol.* 169-193, 1988.
- [24] Sturm R, Hofmann W. Stochastic modelling predictions for the clearance of insoluble particles from the tracheobronchial tree of the human lung. *Bulletin of Math. Biol.* 69; 395–415. 2007.
- [25] Haninger T, 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. 574–576. 1998.
- [26] Marsh, J. W. et al. Comparative dosimetry in homes and mines. Estimations of K-factors. In: *Proceedings Seventh International Symposium. The Natural Radiation Environment*, Amsterdam, Elsevier, 290–298. 2005.
- [27] Phalen RF, Oldham MJ, Beaucage CB, et al. Postnatal enlargement of human tracheobronchial airways and implications for particle deposition. *Anat Rec.* 212:368-80. 1985.
- [28] Robert Sturm: Theoretical models of carcinogenic particle deposition and clearance in children's lungs. *J Thorac Dis*; 4(4):368-376. 2012.
- [29] BEIR VII: Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation is available from the National Academies Press, 500 Fifth Street, NW, Washington, DC 20001; 800-624-6242
- [30] ICRP Publication 121 Radiological Protection in Paediatric Diagnostic and Interventional Radiology Recommended citation ICRP, 2013.