

## ÖSSZEFOGLALÁS

### 1. Előzmények

A lakótéri radon elsődleges forrása a talaj. A talajból beszivárgó radon a lakások nyílászáróinak egyre jobb szigetelése következtében a lakóterekben nagy aktivitáskoncentrációt érhet el. Epidemiológiai kutatások jelenleg úgy becsülik, hogy  $200 \text{ Bq m}^{-3}$  lakótéri radonszint felett a tüdőrák relatív kockázata 1,33 (Pavia et al., 2003), amely  $100 \text{ Bq m}^{-3}$ -enként 0,15-0,2 értékkel nő (Lagarde et al., 1997).

A 70-es években kezdődtek el a lakótéri radonmérések világszerte. Az egyik legfontosabb cél az volt, hogy megtalálják azokat a paramétereket, amelyek az átlagosnál több magas radonszintű lakást valószínűsítene. A másik cél, a paraméterek alapján kijelölt lakáscsoportokban megtalálni azokat a lakásokat, amelyekben valóban magas a radonszint. Ezeket túlmenően néhány reprezentatív mintavétellel történő felmérést is találhatunk.

Az elmúlt évek lakótéri toronmérései azt mutatták, hogy bizonyos esetekben (ha a lakás tóriumban gazdag kőzetre épült, vagy tóriumtartalmú a falfesték), akár a radonhoz hasonló nagyságrendű toronszintek is előfordulhatnak. Ezért az utóbbi időben a lakótéri toronmérések is előtérbe kerültek.

Magyarországon az első kiterjedtebb radonvizsgálatok Tóth Árpád nevéhez fűződnek (Tóth, 1972; Tóth, 1978). Később az egész országot érintő méréseket az ATOMKI és az OSSKI végzett hazánkban (Somogyi et al., 1989; Nikl, 1996). Az elmúlt tíz évben a magyar radonméréssel foglalkozó kutatóintézetek (ATOMKI, Eötvös Egyetem, OSSKI, Veszprémi Egyetem) elsősorban nem országos lakótéri felméréseket végeztek. Kutatási területeik inkább a barlangok mérése (Hakl et al., 1997a; Kávási et al., 2003), ivóvizek, forrásvizek és termálvizek radontartalmának meghatározása (Hakl et al., 1996; Hakl et al., 1997b; Vásárhelyi et al., 1997; Baradács et al., 2002a; Szerbin és Köteles, 1999; Kasztovszky et al., 2000; Kovács et al., 2003), lokális lakótéri radon-anomáliák alapos feltérképezése, értelmezése (Somlai et al., 1997; Németh et al., 2000; Somlai et al., 2005; Gorjánáczy et al., 2006), radonméréstechnika fejlesztése (Csige, 1997; Csige és Csegzi, 2001; Hunyadi et al., 1999; Baradács et al., 2002b) voltak.

A RAD Labor, amely 1992-ben alakult, az első két évben a mátraderecskei lakásokban végzett radonméréseket. 1994-ben indította el az országos radonmérő hálózatát, amely azóta is működik. 2004-ig több, mint 15 ezer magyarországi hálósoba éves átlagos radon aktivitáskoncentrációját, azaz radonszintjét határozta meg (Hámori et al., 2004; Hámori et al., 2006a).

Magam 1997 óta veszek részt a RAD Labor munkájában. Az első évben főleg a detektorok kiosztása, beszedése és kiértékelése volt a feladat. Később részt vettem a radonméréssel kapcsolatos ismeretterjesztő előadások megszervezésében, megtartásában, valamint saját diákjaink labormunkájának irányításában is. 2004 nyarán kezdődött az a munka, amely az addig mért lakások radonszintjeinek elemzésével foglalkozott. Ennek a munkának az eredményeként jött létre többek között a jelen Ph.D. dolgozat.

A nemzetközi ajánlások alapján (ICRP 65) Magyarországon a munkahelyeken éves átlagban  $1000 \text{ Bq m}^{-3}$ -ben határozták meg a „*cselekvési szint*”-et, amely felett be kell avatkozni (EüM rendelet, 2000). A rendelet azonban sem a lakótéri, sem az ivóvízben lévő radonnal kapcsolatban nem foglal állást. A lakóterekre és az ivóvízre vonatkozó cselekvési szintet meghatározó rendelet azóta sem született meg.

## 2. Célok

A költséghatékony cselekvési szint megállapításához a döntéshozóknak tudniuk kell, hogy Magyarországon hány lakás várható adott radonszintek felett. Ha ugyanis nagyon alacsony cselekvési szintet határoznak meg, akkor indokolatlanul sok lakást kell mentesíteni. Ha pedig túl magasat, akkor még mindig sokan kaphatnak tüdőrákot a radon miatt (Kanyár et al, 2004).

Az egészségügyi hatóságoknak pedig azt érdemes tudniuk, hogy mely területeken várható az átlagosnál nagyobb arányban magas radonszintű lakás.

A RAD Laborban végzett munkámnak a magyarországi lakótéri radonszint mérések és elemzések során a következő céljai voltak:

1. Minél több magyarországi lakás radonszintjének meghatározása. A vizsgált tájegységek, települések, lakások kiválasztásánál törekedtünk arra, hogy méréseinkkel az országot minél jobban lefedjük.

2. Megtalálni azokat a területeket Magyarországon, amelyeken magas lakótéri radonszint az átlagosnál nagyobb arányban fordul elő.

3. Az országos kumulatív eloszláshoz vezető matematikai statisztikai eljárások alkalmazhatóságának, illetve a kapott eredmények megbízhatóságának vizsgálata.

4. Országos kumulatív eloszlás meghatározása, amelyből leolvasható bármely radonszintet meghaladó lakások várható számaránya illetve száma.

További célok a lakótéri radonmérések és elemzések mellett:

5. A toron viselkedésének vizsgálata kísérletekkel.
6. Lakótéri toronmérés megkezdése.

## 3. Módszerek

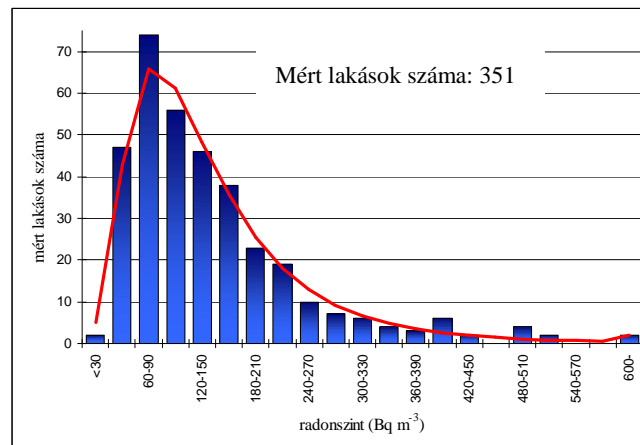
*Mérés:* A RAD Laborban a lakótéri radonméréseket zárt CR-39 nyomdetektorral végeztük. A vizsgált szobában összesen három detektort osztottunk ki, három különböző évszakban: ősszel, télen és tavasszal. A szobára jellemző radonszintet a három aktivitáskoncentráció értékéből határoztuk meg. (Nem számítottunk radonszintet azokra a szobákra, ahol nem állt rendelkezésünkre legalább két évszak mérési eredménye).

*Mintavétel:* A detektorok kiosztását, beszedését, adminisztrációját a mért települések iskoláinak tanárai és diákjai végezték. Szintén ők értesítették a lakókat a lakásokban mért eredményekről.

*Csoportosítás:* Ha a lakások geológiailag, házszerkezet szempontjából, illetve a lakók életmódja szerint közel homogén sokaságból származnak, akkor eloszlásuk a radonszinteken jól közelíthető lognormális eloszlással (Nero et al., 1986; White et al., 1992; Miles, 1998a; Miles 1998b). Az adott radonszintek fölött várható lakások számarányát megbecsülhettük a lognormális eloszlás segítségével, ha a mért lakásokat homogén csoportokra osztottuk. A csoportosítás szempontjai mindig valamilyen geológiai, házszerkezeti háttérrel takartak. Külön vizsgáltuk az emeleti lakások radonszintjeit, mert a radon lényegesen sűrűbb a levegőnél. A földszinti lakásokat népességnagyság szerint csoportosítottuk. Így kívántuk figyelembe venni a városi és falusi házak között meglévő házszerkezeti különbségeket. Harmadik csoportosítási szempontunk a geológia-geográfia volt. Kezdetben nagy tájegységeket választottunk. Ha egy adott területen a lognormális eloszlás alkalmazását a hipotézis tesztek elutasították, akkor a térséget további kisebb egységekre bontottuk. Ezt mindaddig végeztük, amíg nem tudtuk az

országot lefedni olyan tájegységekkel, amelyekben a lakások radonszintek szerinti eloszlására lognormális eloszlás volt illeszhető  $\alpha = 0,05$  szignifikancia szinten. (1. ábra).

*Statisztika:* Az eredményekhez legjobban illeszkedő lognormális eloszlás paramétereit maximum likelihood módszerrel határoztuk meg (1. ábra). Azt a feltevést, miszerint a eredmények eloszlása jól közelíthető lognormális eloszlással,  $\chi^2$ -próbával ellenőriztük. Csak azon adathalmazok esetében alkalmaztunk lognormális illesztést, ahol a  $\chi^2$ -próba  $\alpha = 0,05$  szignifikanciaszinten nem utasította el a lognormális modellt. Azokat a csoportokat, amelyek esetében a lognormális modell alkalmazható, strá-tumoknak nevezzük.



**1. ábra** A Bükk tájegység 10 ezer főnél kisebb településein mért lakások eloszlása a radonszinteken. Az oszlopok a mért lakásokat, a piros görbe pedig a maximum likelihood módszerrel illesztett lognormális eloszlást mutatja. A  $\chi^2$ -próba  $\alpha = 0,05$  szignifikanciaszinten nem utasította el a lognormális modellt.

*Területi és országos eloszlások:* Az illesztett lognormális eloszlások segítségével minden strátumban megbecsültük, hogy mennyi lakás várható adott radonszintek felett. A strátumok megfelelő adatainak felösszegzésével pedig megkaptuk az országra jellemző kumulatív eloszlást.

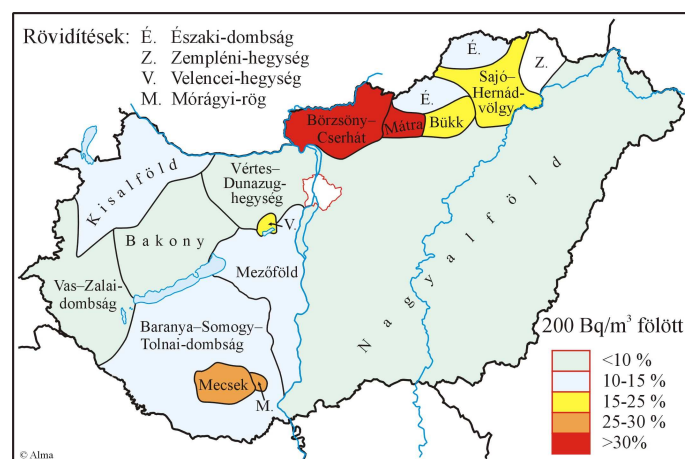
*Toronkísérlet:* A toron viselkedését Th(B+C) emanációval vizsgáltuk. A minták aktiválását a Debreceni Egyetem Kísérleti Fizikai Tanszékének emanáló-berendezésével végeztük. Az aktivitásokat az SBSi  $\alpha$ -spektrometrián kívül CR-39 nyomdetektorral is megmértük.

*Lakótéri toron:* A lakótéri toronméréseket a Radosys kft. Raduet elnevezésű radon-toronmérő detektorával végeztük. A két detektor két CR-39 nyomdetektor, különböző típusú dobozokba zárva. Az egyik doboz főként a radont engedi be, míg a másik radont és a toront is. A Raduetekeket egy évszakra helyeztük ki olyan szobákba, ahol korábbi radonméréseink alapján a toron jelenlétét is valószínűsíthető lehetett.

## 4. Eredmények

Tudományos munkám során kapott eredmények az alábbi pontokban foglalhatók össze:

1. 1997 és 2004 között közel 8 ezer magyarországi lakás radonszintjének meghatározásában vettem részt. Ezen munka során körülbelül 25 ezer detektort helyeztünk ki, szedtünk be és értékeltünk. Jómagam minden munkafolyamatban tevékenyen közreműködtem.
2. Létrehoztunk egy adatbázist, amely a RAD Labor által 1994 és 2004 között mért több, mint 15 ezer lakóter radonszintjét tartalmazza. Az első öt mérési év adatainak ellenőrzését és adatbázishoz csatolását magam végeztem. A munka eredménye egy megbízható, könnyen átlátható és kezelhető adathalmaz, amely 15619 magyarországi lakóter radonszintjét tartalmazza.
3. A 15619 magyarországi lakóteret geológiai és házszerkezeti szempontok alapján homogén csoportokra osztottam annak érdekében, hogy az egyes csoportokba tartozó radonszintekre a lognormális eloszlást alkalmazni lehessen. A csoportosítás szempontjai a települések lélekszáma, illetve a geográfia volt. Azt a hipotézist, hogy egy csoportban a lakóterek radonszint szerinti eloszlása lognormális eloszlást követ, matematikai statisztikai módszerekkel vizsgáltam. Azokat a csoportokat, amelyekben a hipotézistesztek nem utasították el a lognormális hipotézist, strátumoknak nevezem.
4. Az egyes strátumokhoz tartozó illetett lognormális eloszlás, valamint a strátumok lakásszámának segítségével minden strátumban megbecsültem azon lakások számát, amelyekben a radonszint egy-egy adott értéket meghalad. Jelen dolgozatban ezek közül a 200, a 400 és a 600  $\text{Bq m}^{-3}$ -re vonatkozó értékeket mutatom be területenként.
5. A vizsgálataink megmutatták azokat a területeket Magyarországon, ahol a lakások több, mint 30 %-ában várható 200  $\text{Bq m}^{-3}$ -t meghaladó radonszint. Ezen területek a Mátra és a Börzsöny-Cserhát (1. ábra), valamint egyes települések: Kővágószőlős és még két, anonimitást kérő község.



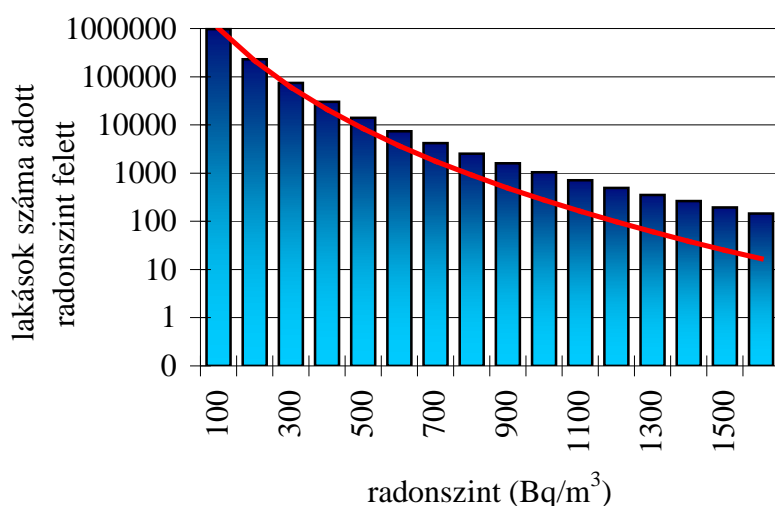
**1. ábra** A 200  $\text{Bq m}^{-3}$ -t radonszintet meghaladó lakások aránya Magyarország különböző tájegységein. A térkép csak a 10 ezer főnél kisebb lélekszámú településekre vonatkozik.

6. Az egyes strátumokban kapott, adott radonszinteket meghaladó lakások számát végül strátumonként összeadtam. Az így kapott kumulatív eloszlás Magyarország lakásainak 95 %-ára vonatkozóan megadja hány lakás várható adott radonszint fölött (1. táblázat).

**1. táblázat** A magyarországi lakások kumulatív eloszlása radonszintjük szerint

Radonszint (Bq m <sup>-3</sup> )	Lakások becsült száma az adott radonszint fölött	Lakások becsült aránya* az adott radonszint fölött	Megtaláltak száma
200	228985	5,92 %	2733
300	74763	1,93 %	1136
400	30144	0,78 %	534
500	14118	0,36 %	269
600	7373	0,19 %	155
700	4175	0,11 %	80
800	2515	0,07 %	53
900	1590	0,04 %	33
1000	1045	0,03 %	24
1100	709	0,02 %	19
1200	494	0,01 %	15
1300	352	< 0,01%	13

7. A hipotézistesztek elutasították azt a hipotézist, hogy a felösszegzéssel kapott empirikus kumulatív eloszlás lognormális eloszlást követ. Számos szerzőhöz hasonlóan (Nero et al., 1986; White et al., 1992; Gunby et al., 1993; Bochicchio et al., 2004) azt tapasztaltam, hogy az illesztett lognormális eloszlás a magasabb tartományban alábecsüli az empirikus értékeket (2. ábra, 2. táblázat).



**2. ábra** A magyarországi lakások empirikus kumulatív radonszint-eloszlása. Az oszlopok az empirikus kumulatív eloszlást, a folytonos vonal pedig a súlyozott, Nero-féle GM és GSD alapján illesztett lognormál eloszlást mutatják.

**2. táblázat** Az empirikus kumulatív eloszláshoz illesztett eloszlás

Radonszint (Bq m <sup>-3</sup> )	Lakások száma	
	Empirikus eloszlás	NonlinearFit 95 % CI
100	964011	967570 – 982380
200	228985	223206 – 231913
300	74763	68936 – 73008
400	30144	25796 – 27764
500	14118	11028 – 12037
600	7373	5200 – 5747
700	4175	2644 – 2956
800	2515	1428 – 1612
900	1590	810 – 923
1000	1045	479 – 551
1100	709	293 – 340
1200	494	185 – 216
1300	352	120 – 141
1400	262	79 – 94
1500	194	54 – 64
1600	146	37 – 44

8. Meghatároztam a Th(B+C) emanáció aktivitásának a begyűjtési feszültségtől való függését az általunk alkalmazott emanáló elrendezésben. A minta aktivitása kezdetben a feszültséggel együtt nő. Egy bizonyos tartományban azonban a minta aktivitása csökken az aktiváló feszültség növelésével. A csökkenő szakasz után egyensúlyi helyzet áll be: a minta aktivitása nem változik a feszültség növelésével. A jelenséget az emanálótérben megjelenő tértöltés hatásával magyaráztam.

7. Kimutattam egyben, hogy az emanálóban történő elszívás jelentősen befolyásolja a minta aktivitását, valamint, hogy az aktiváció csak elszívás nélkül reprodukálható.

## Irodalomjegyzék (bibliography)

- Baradács, E., Dezső, Z., Hunyadi, I., Csige, I., Mócsy, I., Makfalvi, Z., Somay, P., 2002a. Felszínalatti vizek maratottonyom-detektoros eljárással mért  $^{222}\text{Rn}$ - és  $^{226}\text{Ra}$ -tartalma. Magyar Kémiai Folyóirat 108, 492-501.
- Baradács E., Hunyadi I., Csige I., Dezső Z., 2002b. Vízminták  $^{226}\text{Ra}$ - és  $^{222}\text{Rn}$ -tartalmának meghatározására szolgáló maratottonyom-detektoros eljárás kalibrálása. Magyar Kémiai Folyóirat 108, 421-
- Csige I., 1997. Post-irradiation sensitization of CR-39 track detector in carbon dioxide atmosphere. Radiation Measurements 28, 171-176.
- Csige I., Csegi S., 2001. The Radamon radon detector and an example of application. Radiation Measurements 34, 437-440.
- Egészségügyi miniszter 16/2000 (VI. 8.) EüM rendelete az atomenergiáról szóló 1996 évi CXVI. törvény egyes rendeleteinek végrehajtásáról. Magyar Közlöny 2000/55, 3204-3228., 2000. (Regulation by the Hungarian Health Department)
- Gorjánác, Z., Várhegyi, A., Kovács, T., Somlai, J., 2006. Population dose in the vicinity of closed Hungarian uranium mine. Radiation Protection Dosimetry, <http://rpd.oxfordjournals.org/cgi/reprint/nci363v1>
- Hakl, J., Hunyadi, I., Csige, I., Vásárhelyi, A., Somlai, J., Faludi, G., Varga, K., 1996. Determination of dissolved radon and radium content of water samples by track etch method. Environment International 22, 315-317.
- Hakl, J., Hunyadi, I., Csige, I., Géczy, G., Lénárt, L., Várhegyi, A., 1997a. Radon transport phenomena studied in karst caves-international experiences on radon levels and exposures. Radiation Measurements 28, 675-684.
- Hakl, J., Hunyadi, I., Csige, I., Vásárhelyi, A., Somlai, J., 1997b. Vízminták rádium- és radonkoncentrációjának meghatározása nyomdetektoros módszerrel. Magyar Kémiai Folyóirat 103, 224-226.
- Hámori, K., Tóth, E., Köteles, Gy., Pál, L., 2004. A magyarországi lakások radonszintje (1994-2004). Egészségtudomány 48, 283-299.
- Hámori, K., Tóth, E., Pál, L., Köteles, G., Losonci, A., Minda, M., 2006. Evaluation of indoor radon measurements in Hungary. Journal of Environmental Radioactivity 88, 189-198.
- Hunyadi, I., Csige, I., Hakl, J., Baradács, E., Dezső, Z., 1999. Temperature dependence of the calibration factor of radon and radium determination in water samples by SSNTD. Radiation Measurements 31, 301-306.
- ICRP 65 kiadvány, 1993. Radon-222 elleni sugárvédelem lakásokban és munkahelyeken, (OAH, 1995.). Eredeti: Protection Against Radon-222 At Home And At Work. Annals of ICRP, Vol. 23, No. 2.
- Kanyár, B., Katona, T., Somlai, J., 2004. A radontól eredő lakótéri sugárterhelés csökkentésének költségei és a radon cselekvési szint. Egészségtud. 48, 72-80.
- Kasztovszky, Zs., Sajó-Bohus L., Fazekas, B., 2000. Parametric changes of radon ( $^{222}\text{Rn}$ ) concentration in ground water in North-eastern Hungary. Journal of Environmental Radio-activity 49, 171-180.
- Kávási N., Somlai J., Szabó T., Várhegyi A., Hakl J., Kovács T., Gorjánác Z., Jobbágy V., 2003. A radontól származó sugárterhelés meghatározásának és korlátozásának nehézségei föld alatti munkahelyeken. Magyar Geofizika 44, 30-
- Kovács, T., Bodrogi, E., Somlai, J., Jobbágy, V., Patak, V., Németh Cs., 2003.  $^{226}\text{Ra}$  and  $^{222}\text{Rn}$  concentrations of spring waters in Balaton Upland of Hungary and the assessment of resulting doses. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry 258, 191-194.
- Lagarde, F., Pershagen, G., Akerblom, G., Axelson, O., Baverstam, U., Damber, L., Enflo, A., Svartengren, M., Swedjemark, G. A., 1997. Residential Radon and Lung Cancer in Sweden: Risk Analysis Accounting for Random Error in the Exposure Assessment. Health Physics 72, 269-276,
- Miles, J., 1998a. Development of maps of radon-prone areas using radon measurements in houses. Journal of Hazardous Materials 61, 53-58.

- Miles, J., 1998b. Mapping radon-prone areas by lognormal modeling of house radon data. *Health Physics* 74, 370-378.
- Németh, Cs, Somlai, J., Kanyár, B., 2000. Estimation of external irradiation of children due to the use of coal-slag as building material in Tatabánya, Hungary. *Journal of Environmental Radioactivity* 51, 371-378.
- Nero, A. V., Schwehr, M. B., Nazaroff, W. W., Revzan, K. L., 1986. Distribution of Airborne Radon-222 Concentrations in U. S. Homes. *Science* 234, 992-997.
- Nikl, I., 1996. The radon concentration and absorbed dose rate in Hungarian dwellings. *Radiation Protection Dosimetry* 67, 225-228.
- Pavia, M., Bianco, A., Pileggi, C., Angelillo, I. F., 2003. Meta-analysis of residential exposure to radon gas and lung cancer. *Bulletin of the WHO* 81 (10), 732-738.
- Somlai J., Kanyár B., Lendvai Z., Németh Cs., Bodnár R., 1997. Az Ajka környéki szénalakepítőanyagból eredő radioaktív sugárzás lakossági dóziszjáruléka. *Magyar Kémiai Folyóirat* 103, 515-518.
- Somlai, J., Jobbágy, V., Németh, Cs., Gorjánác, Z., Kávási, N., Kovács, T., 2005. Radiation dose from coal slag used as building material in the Transdanubian region of Hungary. *Radiation Protection Dosimetry*, <http://rpd.oxfordjournals.org/cgi/content/abstract/nci323v1>
- Somogyi Gy., Nikl I., Csige I., Hunyadi I., 1989. Radon akti-vitáskoncentrációk mérése és a belélegzésből eredő sugárterhelés meghatározása hazai lakások légtérben. *Izotóptechnika, Diagnosztika* 32, 177-183.
- Szerbin P., Köteles, Gy., 1999. Ivóvizek természetes radioaktivitásának vizsgálata. *Egészségtudomány* 43, 287-296.
- Tóth, Á., 1972. Determining the Respiratory Dosage from RaA, RaB and RaC Inhaled by the Population in Hungary. *Health Physics* 23, 281-289.
- Tóth Á., 1977. Lakószobák levegőjében várható radon valamint toron koncentráció becslése és a számított értékek kísérletes ellenőrzése. *Magyar Fizikai Folyóirat* 25, 95-
- Vásárhelyi, A., Csige, I., Hakl, J., Hunyadi, I., 1997. Spatial distribution of radon content of soil gas and well-waters measured with etched track radon monitors. *Radiation Measurements* 28, 685-690.
- White, S. B., Bergsten, J. W., Alexander, B. V., Rodman, N. F., Phillips, J. L., 1992. Indoor <sup>222</sup>Rn concentrations in a probability sample of 43,000 houses across 30 states. *Health Physics* 62, 41-50.