

DOKTORI (PHD) ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

**ÉPÜLETEK SUGÁREGÉSZSÉGÜGYI
VIZSGÁLATA**

Készítette:

Homoki Zsolt

Vegyésmérnöki és Anyagtudományok Doktori Iskola

Témavezetők:

Dr. Kovács Tibor és Dr. Tóth-Bodrogi Edit

egyetemi docens

Pannon Egyetem

Bio-, Környezet- és Vegyésmérnöki Kutató-Fejlesztő

Központ

Radiokémiai és Radioökológiai Intézeti Tanszék



Veszprém

2026

Bevezetés

Az időnk legnagyobb részét zárt terekben töltjük. Az épületben tartózkodás során külső és belső sugárterhelés egyaránt ér bennünket. Általában az épületben tartózkodás során elszennvedett, radontól és gamma-sugárzástól származó sugárterhelésünk adja az összes természetes sugárterhelésünk legnagyobb részét, kb. háromnegyedét. Nagyságrendekkel nagyobb, mint a környezetünkben lévő mesterséges izotópoktól származó sugárterhelésünk. Emiatt van kiemelt jelentősége az épületekben végzett radiológiai vizsgálatoknak.

Az épületekben a beltéri radon legfőbb forrása az épület alatti talaj, a gamma-sugárzásnak az építőanyag. A beltéri radon aktuális szintjét külső és belső tényezők együtt határozzák meg az épület használati módjával. A beltéri gamma-sugárzás intenzitása az építőanyagok radioaktivitásától függ. Hazánkban az 1800-as évek végétől az 1990-es évekig nagy arányban építettek be főként hőerőművekből, kohókból és kazánokból származó salakot építőanyagként, amelyeknek gyakran nagyobb radioaktivitása volt, mint a többi építőanyag, amiből indokolatlan többletsugárterhelése származik a bent tartózkodóknak. Azonban szabályozás és általánosan elfogadott értékelési módszer nincs az épületek radiológiai vizsgálatára, egyedül a hosszú idejű beltéri radon-koncentráció mértékére van rendeletben rögzített vonatkoztatási szint.

Célkitűzés

Jelen dolgozat célja a hazai épületekben lévő beltéri gamma-sugárzások és radon-koncentrációk nagyságának, valamint térbeli és időbeli eloszlásának vizsgálata és értékelése volt. Továbbá a hazai épületekre jellemző átlagos beltéri gamma-sugárzási szint meghatározása mind salakos, mind alak nélküli épületekben; a gamma-sugárzás nagyságának vizsgálata különböző építőanyagok környezetében; az emelkedett beltéri gamma-sugárzási szintet okozó építőanyagok és építési módok beazonosítása; valamint egy vonatkoztatási szint levezetése a beltéri gamma-sugárzásokra.

További célja volt a radonszint változások tendenciájának elemzéséből nyert információk alapján a rövid idejű radonmérések ajánlott minimális időtartamának meghatározása és egy módszer kidolgozása a beltéri radon-kockázat számszerű becslésére.

Anyag és módszer

Munkám során aktív és passzív mérőeszközökkel végeztem beltéri radon- és gamma-sugárzás vizsgálatokat az egész ország területére kiterjedően. Ezek eredményeiből egyszerű, de részletes statisztikai elemzéseket készítettem.

Kutatásaim során részletes beltéri gamma-sugárzás felméréseket végeztem épületek beltéri szcintillációs elvű, aktív gamma-dózisteljesítmény mérő műszerrel. Vizsgáltam a mért értékek és az épület szerkezeti kialakítások, valamint az építőanyagok kapcsolatát. Irodalmi elemzést végeztem a műszerek által kijelzett operatív dózismennyiségek és a dóziskorlátok megadásánál használatos, biológiai kockázat kifejező dózismennyiségek kapcsolatának meghatározására. Majd elvégeztem az építőanyagok radioaktivitásának korlátozására szolgáló rendelet koncepciójának adaptálását a műszeres mérések eredményeire.

Néhány nap idejű beltéri radonméréseket végeztem jellemzően nem szellőztetett terekben aktív radonmérő műszerekkel. Vizsgáltam a mérések eredményeként kapott értéksorok által mutatott tendenciákat és ezek kapcsolatát a beltéri radonkockázatot kifejező mennyiségekkel.

Az országos beltéri radonfelmérő kampányok keretében CR-39 nyomdetektorok voltak kihelyezve a vizsgálandó épületekbe összesen 1 év időtartamra, a detektorok negyedéves cseréje mellett. Az eredmények statisztikai elemzésével vizsgáltam a radon-koncentrációk térbeli és időbeli változását.

A hazai lakosság természetes forrásokból származó sugárterhelésének újraértékeléséhez a korábbi és újabb országos felmérések eredményeinek összegyűjtése és kiértékelése adta az alapját.

Eredmények

A helyszíni beltéri gamma-sugárzás vizsgálatok megmutatták, hogy a salak nélküli épületekben általában az átlagos külső háttérsugárzási szintet (100 nSv/h) csak csekély mértékben meghaladó, 200 nSv/h-nál nem nagyobb értékek voltak mérhetőek. Az átlagos szint 120 nSv/h volt. Ezen épületekben, a dózistér eloszlásában nem voltak számottevő különbségek. A különböző építőanyagból készült szerkezeti elemek felszínén mért dózisteljesítmény értékek egy-egy jellemző tartományba estek. Az értékük általában 70–180 nSv/h közötti volt és arányos a radioaktivitásukkal. Emiatt a felszínükön mért értékek felhasználhatók a jellemzésükre a beltéri sugárzások értékelése során.

Addig a salakos épületekben mért gamma-sugárzási szint függött a beépített salak mennyiségétől, radioaktivitásától, a beépítés helyétől és módjától. Ezen épületekben a külső háttérszintet akár többszörösen meghaladó értékek voltak mérhetőek. Ugyanakkor a salakos épületek 92%-ában az átlagos szint nem haladta meg a 250 nSv/h-t és 63%-ukban a maximum sem. Vagyis a salakos épületek többségében is csak mérsékelt többletsugárzás volt mérhető. A mérések azt is megmutatták, hogy kisebb arányban voltak 350 nSv/h-t meghaladó, emelkedett értékek mérhetőek, ha a padlóban lévő salakot betonréteg fedte (2,6%), vagy ha a salak a földemben volt (1,7%), azzal szemben, mintha a parkettát közvetlenül a salakra fektették (14%).

Számításaim alapján az 1 mSv/év többlet effektív külső dózisonak 250 nSv/h környezeti dózisegyenérték felel meg, ezért a beltéri gamma-sugárzás vonatkoztatási szintjének 350 nSv/h adódik. Ezt meghaladó szint csak salakos épületek 3%-ában fordult elő.

Vizsgálataim alapján a nem szellőztetett épületekben a radon-koncentráció változás általában egy tipizálható mintázatot, tendenciát követ és a tendencia elemzéséből nyert információk felhasználhatók a beltéri radonkockázat számszerű becslésére. Ezekben az épületekben gyakran stagnáló radonszint, vagy a radonszint korlátos ideig tartó növekedése figyelhető meg, amely egy kvázi telítési szint (plató) elérése után megáll. A telítéshez szükséges idő általában 1-2 nap.

Vizsgálataim szerint a radonszint növekedések kategorizálhatók a növekedési sebességek és az időtartamok alapján. Alacsony radonszintet eredményez, ha a növekedési sebesség $<8 \text{ Bq}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$, és a növekedés időtartama <48 óra. Közepes radonszintet ($150\text{-}300 \text{ Bq}/\text{m}^3$) eredményez, ha a növekedési sebesség $8\text{-}17 \text{ Bq}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$, és az időtartam <24 óra. Ennél nagyobb növekedési sebesség és időtartam emelkedett radonszintet eredményez.

Az Indoor Radon Potential (IRP) index számítása az első 24 órára eső radonszint növekmény, az átlagos és a maximális radonszint meghatározásán alapul, aminek a vizsgálatához szükséges minimális időtartam 3 nap.

A hosszú idejű, nyomdetektoros beltéri radon mérések megmutatták, hogy a földszintiek mellett az I. emeleti helyiségekben is mérhető $300 \text{ Bq}/\text{m}^3$ -es, vonatkoztatási szintet meghaladó éves átlagos radon-koncentráció. A rövid idejű mérések tapasztalataiból az is kiderül, hogy elsődlegesen akkor, ha a padlóban van salakfeltöltés. A II. és a feletti szinteken már nem volt mérhető $200 \text{ Bq}/\text{m}^3$ -t meghaladó átlag érték.

Vizsgálataim alapján a tavaszi, nyári, őszi és téli évszakos radon-koncentráció hányadosok értékei 0,83, 0,56, 1,32 és 1,26 voltak, amely jó egyezést mutat a nemzetközi irodalomban megadott értékekkel. Megállapítottam, hogy a hányadosok átlagértéke nem függött az emeleti szinttől és $100 \text{ Bq}/\text{m}^3$ felett az éves átlagos radonszinttől sem. De minden évszakban a hányadosok értéke széles tartományon belül szóródott, ezért a hányadosok átlagértékei csak általános tendenciát mutatnak, a korrekciós tényezőként való alkalmazásuk jelentős bizonytalanságot eredményezhet az éves átlagérték becslésében.

A lakosság természetes forrásokból származó sugárterhelésének újraértékelésekor a korábbi 4,1 mSv-hez képest, 4,4 mSv-et kaptam, szemben a 2,4 mSv-es világtátlaggal. A korábbitól való eltérés legfőbb oka, hogy a beltéri gamma-sugárzás súlyozott átlaga nagyobbak adódott. A világtátlaghoz képesti eltérés legfőbb oka, hogy hazánkban az átlagos beltéri radonszint közel 4-szerese a világtátlagnak.

A DOKTORI (PhD) ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

1. Az egész országra kiterjedően vizsgáltam épületekben a beltéri gamma-sugárzási tér nagyságát és eloszlását. Megállapítottam, hogy a salakot nem tartalmazó épületekben a gamma-sugárzás egy szűk, alacsony tartományon belül marad (70-180 nSv/h). A padlón vagy földemen mért, az átlagos hazai háttérsugárzási szint kétszeresét (200 nSv/h) meghaladó érték már salak jelenlétére utal. Megállapítottam, hogy az építőanyag típusok jól jellemezhetők és csoportosíthatók a felszínükön mért gamma-dózisteljesítmény értékek alapján. A hagyományos építőanyagok (fa, beton, tégl, mészkő stb.) sugárterhelése alacsony. A felszínükön általában 70-180 nSv/h értékek mérhetők. A radioaktív salak felhasználásával készült falazóelemek felszínén az előbbinél rendszerint nagyobb, 160–290 nSv/h értékek mérhetők, de akár meghaladhatják az 1 μ Sv/h-t is. Ezen eredményeim összhangban vannak az építőanyagok laboratóriumi gamma-spektrometriai vizsgálati eredményeivel.

2. Az építőanyagok radioaktivitásának korlátozására vonatkozó előírás közvetlenül nem alkalmazható épületek beltéire. A földemre széles körben beépített salakok radioaktivitása miatti emelkedett beltéri gamma-sugárzások értékeléséhez szükséges volt egy referencia szint levezetése. Ezt a forgalomba kerülő építőanyagok radioaktivitásának értékelésére vonatkozó szabályozásból vezettem le, amelyhez az EC RP 112-es kiadványban leírt modellt vettem alapul. Számításaim szerint az 1 mSv/év effektív dózis 250 nSv/h környezeti dózisegyenértéknek $[H^*(10)]$ felel meg, amely alapján 350 nSv/h adódik a beltéri gamma-sugárzás referencia szintjének. A lakásokban végzett felmérések eredményei alapján igazoltam, hogy a származtatott vonatkoztatási szintet meghaladó radioaktivitás csak salakfeltöltésű épületekben volt mérhető.

3. A radon és leányelemei okozta sugárterhelés meghatározásához általában hosszú idejű mérésre van szükség. A szükséges mérési idő lerövidítése érdekében a rövid idejű, aktív műszeres beltéri radonmérés eredmények idősoraiból statisztikai elemzéseket készítettem. A vizsgált helyszínek többségénél, zárt terekben a radonszint dúsulását figyeltem meg. Ezeknél meghatároztam a radonszintek átlagos növekedési sebességét, a növekedési időket és a radonszint növekményeket. Statisztikai elemzéssel kimutatható, hogy a növekedési sebességek kategorizálhatók a hozzájuk tartozó radonszint növekmények alapján. A 8 Bq/(m³·h) alatti sebességekhez 150 Bq/m³ alatti növekmények tartoznak. A 8 és 17 Bq/(m³·h) értékekhez rendszerint 150 és 250 Bq/m³ közötti radonszint növekmények tartoznak. Az ennél nagyobb növekedési sebességekhez a legtöbbször, a 300 Bq/m³-es referencia szintet meghaladó, radonszint növekmények társíthatók. Megállapítottam, hogy ezek az információk felhasználhatók egy beltéri radon kockázati index (IRP = Indoor Radon Potential) számításához. Az IRP érték meghatározásának alapját az első 24 órára első radonszint növekmény, az átlagos és a maximális radon-koncentráció értékek képezik.

4. A hazai lakosság természetes sugárterhelésének becslése alapjául szolgáló korábbi országos felmérések eredményei nem hozzáférhetők. Azóta sor került új felmérések megszervezésére. Ezek eredményeinek felhasználásával, az UNSCEAR által megadott összefüggéseket alkalmazva újraértékeltem a lakosság természetes sugárterhelését. A mértéke a korábban becsült 4,1 mSv-hez képest valamivel nagyobb, 4,4 mSv-re tehető, szemben a 2,4 mSv-es súlyozott világátlaggal. Ennek elsődleges oka a világátlag 40 Bq/m³-es radonszintjével szemben a hazai súlyozott átlag 112 Bq/m³. A korábbi, hazai becslésekhez képest a legnagyobb eltérés a beltéri gamma-sugárzásnál adódott, amely 73 nGy/h helyett 101 nGy/h-nak becsülhető.

TUDOMÁNYOS PUBLIKÁCIÓK JEGYZÉKE

Értekezés alapját képező tudományos közlemények

Nemzetközi referált folyóiratban megjelent idegen nyelvű publikációk

1. Zs. Homoki, G. Tóth, A. Csordás, E. Tóth-Bodrogi, M. Hegedűs, T. Kovács, Assessment of the residential radon concentrations in the Bakony Region, Hungary, Radiation Medicine and Protection 5 pp 243–247 (2024)
2. M. Novák, Zs. Homoki, G. Tóth, A. Csordás, E. Tóth-Bodrogi, M. Hegedűs, T. Kovács, Radon exhalation and emanation assessments in the Transdanubian Central Mountain in Hungary, Radiation Medicine and Protection, Vol. 5, Issue 4, pp 254-259 (2024)
3. Zs. Homoki, Á. Szigeti, A. Csordás, G. Tóth, M. Hegedűs, T. Kovács, Framework for evaluating legacy high activity building material based on indoor gamma radiation surveys, Applied Radiation and Isotopes 225 (2025)

Hazai lektorált folyóiratban megjelent magyar nyelvű publikációk

4. Homoki Zs., Szigeti Á., Rövid idejű beltéri radon mérések tapasztalatai és javaslat az értékelés módszerére, Sugárvédelem (on-line), XIV. évf. 2. szám, 1–15 (2021)
5. Homoki Zs., Szigeti Á., Beltéri gamma-sugárzás mérések tapasztalatai és javaslat az értékelés módszerére, Sugárvédelem (on-line), XVI. évf. 1. szám, 1–16 (2023)

Konferencia megjelenések

1. Zs. Homoki, Experiences of radiohygiene examinations of buildings in Hungary, V. Terrestrial Radioisotopes in Environment: International Conference on Environmental Protection, Veszprém, Hungary: Social Organisation for Radioecological Cleanliness (2016)
2. Homoki Zs., A hazai Nemzeti Radon Cselekvési Tervről, XLIII. Sugárvédelmi Továbbképző Tanfolyam: ELFT, Hajdúszoboszló, Magyarország (2018)
3. Homoki Zs., Kell-e félnünk a salaktól az épületben?, XLIII. Sugárvédelmi Továbbképző Tanfolyam: ELFT, Hajdúszoboszló, Magyarország (2018)
4. Zs. Homoki, The Hungarian Radon Action Plan (HUN RAP), VI. Terrestrial Radioisotopes in Environment: International Conference on Environmental Protection, Veszprém, Hungary: Social Organisation for Radioecological Cleanliness (2018)
5. Homoki Zs., Fülöp N., A hazai radon program aktualitásai, XLIV. Sugárvédelmi Továbbképző Tanfolyam: ELFT, Hajdúszoboszló, Magyarország (2019)
6. Zs. Homoki, National Radon Action Plan in Hungary, VII. Terrestrial Radioisotopes in Environment: International Conference on Environmental Protection, Veszprém, Hungary: Social Organisation for Radioecological Cleanliness (2020)
7. Zs. Homoki, Á. Szigeti, Gamma dose rate levels and radon concentrations in Hungarian homes, VII. Terrestrial Radioisotopes in Environment: International Conference on Environmental Protection, Veszprém, Hungary: Social Organisation for Radioecological Cleanliness (2020)

8. Zs. Homoki, Á. Szigeti, Methodology of Radiohygiene examination of buildings, XVI. Carpathian Basin Conference for Environmental Sciences, ELTE, Hungary (2021)
9. Homoki Zs., Szigeti Á., Az országos radon program előrehaladása, XLVI. Sugárvédelmi Továbbképző Tanfolyam: ELFT, Zalakaros, Magyarország (2021)
10. Zs. Homoki, Á. Szigeti, Gamma radiation and radon concentration in Hungarian dwellings, 10th. Jubilee Interdisciplinary Doctoral Conference, Pécsi Tudomány Egyetem (PTE), Hungary (2021)
11. Zs. Homoki, Á. Szigeti, Indoor gamma radiation and radon risk assessment in Hungarian dwellings, 6th European Congress on Radiation Protection, IRPA 2022, Budapest, Hungary (2022)
12. Zs. Homoki, Á. Szigeti, A. Csordás, G. Tóth, T. Kovács, The Hungarian Radon Action Plans is going on, VIII. Terrestrial Radioisotopes in Environment: International Conference on Environmental Protection, Vonyarcvashegy, Hungary: Social Organisation for Radioecological Cleanliness (2022)
13. Homoki Zs., Szigeti Á., Osváth Sz., Magyarországi épületek radonfelmérése, Őszi Radiokémiai Napok 2022, Balatonszárszó, Magyarország: Magyar Kémikusok Egyesülete (2022)
14. Homoki Zs., Szigeti Á., A radon program előrehaladása, a számok bővületében, XLVIII. Sugárvédelmi Továbbképző Tanfolyam: ELFT, Gyula, Magyarország (2023)
15. Zs. Homoki, Á. Szigeti, A. Csordás, T. Kovács, Experiences of the radiological survey of Hungarian buildings, PhD hallgatók anyagtudományi napja XXIII., Pannon Egyetem, Veszprém, Magyarország (2023)
16. Homoki Zs., Szigeti Á., Tóth G., Csordás A., Kovács T., A hazai országos radon programról, XV. Környezetvédelmi Analitikai és Technológiai Konferencia, Magyar Kémikusok Egyesülete, Balatonszárszó, Magyarország (2024)
17. Homoki Zs., Szigeti Á., Csordás A., Kovács T., Az országos radon program 2023. évi eredményei, XLIX. Sugárvédelmi Továbbképző Tanfolyam: ELFT, Szeged, Magyarország (2024)
18. Homoki Zs., Szigeti Á., Tóth G., Csordás A., Kovács T., A hazai talajradon potenciál vizsgálatok háttere, gyakorlata és eredményei, Őszi Radiokémiai Napok: Magyar Kémikusok Egyesülete, Balatonszárszó, Magyarország (2024)
19. Zs. Homoki, Á. Szigeti, T. Gergely, A. Csordás, T. Kovács, The background, the method and the results of the soil gas radon potential examinations on the territory of Hungary, PhD hallgatók anyagtudományi napja XXIX., Pannon Egyetem, Veszprém, Magyarország (2024)
20. Homoki Zs., Radon mérésekkel az egészségesebb környezetért, Szimpózium a Metrológiai Világnap alkalmából, BFKH, Budapest, Magyarország (2024)
21. Homoki Zs., Szigeti Á., Csordás A., Kovács T., Radioaktivitás a környezetünkben, az épületekben és a mindennapokban, A Honvédelmi Ágazat Munkabiztonsági, Munkaegészségügyi és Sugárvédelmi Szakembereinek Éves Konferenciája: Honvédelmi Minisztérium, Bálna, Honvédelmi Központ, Magyarország. (2024)
22. Zs. Homoki, Á. Szigeti, A. Csordás, G. Tóth, T. Kovács, Status and achievements of the Hungarian national radon program, IX. Terrestrial Radioisotopes in Environment: International Conference on Environmental Protection, Vonyarcvashegy, Hungary: Social Organisation for Radioecological Cleanliness (2024)

23. Homoki Zs., Szigeti Á., A hazai beltéri radioaktív sugárzások értékelése és lehetséges innovációk a csökkentésére, 10. ÉTE Építéstudományi és Innovációs Konferencia, Építéstudományi Egyesület, Budapest, Magyarország (2024)
24. Homoki Zs., Elek R., Kövendingé K. J., Osváth Sz., Szarkáné N. Á., Szigeti Á., A hazai természetes sugárterhelésünk újraértékelése, L. Sugárvédelmi Továbbképző Tanfolyam: ELFT, Hajdúszoboszló, Magyarország (2025)
25. Homoki Zs., Elek R., Osváth Sz., Szigeti Á., Sugárözönben élünk! De mennyire?!, Magyar Fizikus Vándorgyűlés 2025: ELFT, Pécs, Magyarország (2025)
26. Homoki Zs., Szigeti Á., Osváth Sz., Csordás A., Kovács T., A hazai lakosság radontól származó egészségkockázata az Országos Radon Program eredményeinek tükrében, L. Vándorgyűlés: Magyar Higiénikusok Társasága, Budapest, Magyarország (2025)