

**PHD ÉRTEKEZÉS TÉZISEI**

**SUGÁRVÉDELMI BETONOK KOMPLEX RADIOLÓGIAI  
VIZSGÁLATAI**

*Készítette:*

**Hajdú Dávid**

Vegyésmérnöki- és Anyagtudományok Doktori Iskola

*Témavezetők:*

**Dr. Zagvai Péter és Dr. Somlai János**

**Pannon Egyetem**

Radiokémiai és Radioökológiai Intézeti Tanszék

**Energiatudományi Kutatóközpont**

Környezetfizikai Laboratórium

**2024**

## **Bevezetés**

A dolgozat a sugárvédelmi szerepet betöltő betonokban ionizáló sugárzások hatására (elsősorban neutronsugárzás) végbemenő változásokkal, és ezek hatásaival foglalkozik. Jelentős neutronsugárzás atomerőművekben és különböző kísérleti létesítményekben fordul elő. Mivel a rendelkezésre álló infrastruktúra folyamatos megújulását biztosítani kell a kutatások fenntartása és az energiabiztonság szavatolása érdekében, így szükség van új létesítmények építésére, az üzemben lévők karbantartására, üzemidőhosszabbítására, illetve az élettartamuk lejártát követően e létesítmények biztonságos leszerelésére.

A felsorolt folyamatok meghatározó anyaga a beton, hiszen ez a rendkívül népszerű építőanyag a neutronsugárzást keltő létesítményeknek is alapvető, nagy mennyiségben használt anyaga. A nukleáris létesítményekben használt betonoknak számos sugárvédelmi követelménynek kell megfelelniük, melyek tisztán kísérleti vizsgálata meglehetősen költséges, és olykor kivitelezhetetlen is. Emiatt napjainkban egyre szélesebb körben használnak szimulációs kódokat az anyag-sugárzás kölcsönhatások vizsgálatára. A dolgozat is ezen kölcsönhatásokkal, az anyagösszetételre és -szerkezetre gyakorolt hatásaival foglalkozik, és konkrét példákon keresztül mutatja be a mérések és szimulációk szinergiáinak kiaknázásában rejlő lehetőségeket.

## **Célkitűzések**

Betonok neutronsugárzás hatására történő felaktiválódásának két fő negatív következménye van: a keletkező radioizotópok egyrészt az üzemeltetés során radioaktív sugárzásnak teszik ki a környezetükben dolgozó személyzetet, másrészt leszerelés során radioaktív hulladék-tárolóba történő elhelyezést tehetnek szükségessé. Az egyik cél így betonok felaktiválódásának minél pontosabb és hatékonyabb becslésére vonatkozó eljárások kidolgozása volt. Az eljárások hitelességének érdekében fontosnak tartottam a mérések és szimulációk együttes használatát, hiszen így a mérések bemenő- és validációs adatként egyaránt szolgálhatnak a kevésbé erőforrásigényes, így hosszútávon használni kívánt szimulációkhoz.

A felaktiválódással kapcsolatos kutatások mellett betonok neutronsugárzás hatására történő degradációját, öregedését is tanulmányoztam a dolgozatban. Ezen a kevésbé vizsgált területen az egyik nagy probléma, hogy kevés és pontatlan mérési eredmény áll rendelkezésre. Emiatt célként tűztem ki a Budapesti Kutatóreaktor beton öregedési kísérletek kivitelezésére való alkalmasságának vizsgálatát, a kísérletekhez szükséges főbb paraméterek meghatározását.

# Új tudományos eredmények

A disszertáció új tudományos eredményei a következő tézispontokban összegezhetők:

1. Felaktiválódási vizsgálatokat végeztem a Budapesti Kutatóreaktorban (BKR) három, az Európai Neutronkutató Központban (European Spallation Source – ESS) felhasználásra szánt beton mintán: a Referencia betonon, a Skanska betonon és a PE-B4C-betonon. A vizsgálatok elsődleges célja az ESS karbantartó személyzetének külső dózisterhelésének pontosabb becslése volt. A kutatás során igazoltam, hogy a  $^{31}\text{Si}$  és a  $^{32}\text{P}$  intenzív béta-sugárzó radioizotópoknak elhanyagolható a dóziszáruléka a gamma-sugárzó radioizotópokhoz képest. Ezt követően a besugárzás hatására megjelenő gamma-sugárzó aktivációs termékek közül meghatároztam a sugárvédelmi szempontból legfontosabb izotópokat (kulcsizotópok), és azok anyaelemeit. A besugárzási vizsgálatokon kívül a beton mintákon NAA, PGAA és XRF technikákkal teljeskörű elemanalitikai vizsgálatokat is végeztünk. Az összetétel méréseket elemezve kimutattam a beton minták nagymértékű inhomogenitását. Ennek jelentős szerepe volt a 2. és 3. tézispontban részletezett szimulációs eredmények kiértékelésében. [P1] [P2] [P3] [P4]
2. A kulcsizotópokat figyelembe véve összeállítottam mindhárom beton mintára olyan, méréseken alapuló, szimulációk bemenő paramétereként használható anyagösszetételeket (anyagkártyákat), melynek alkalmazásával nemcsak a betonok árnyékoló képessége, hanem az aktivációval összefüggő sugárvédelmi szempontok (bomlási gamma-sugárzás, radioaktív hulladék-kezelés) is figyelembe vehetők a modellezés során. Az anyagkártyák tesztelése céljából elkészítettem a Budapesti Kutatóreaktor (BKR) Termikus és Gyors csatornájának besugárzásokhoz használt részletének MCNP modelljét. A modellt felhasználva reprodukáltam a beton minták besugárzásos vizsgálatait. A mérés és szimuláció közti eltérések a legtöbb izotóp esetén hibahatáron belül voltak, ezzel igazolva az anyagkártyák megfelelőségét. Az összeállított és letesztelt anyagkártyák nemcsak az ESS-ben, hanem más neutronsugárzást keltő létesítményekben is felhasználhatók a pontosabb sugárvédelmi tervezés érdekében. [P2] [P3] [P4]

3. A Referencia beton esetében vizsgáltam az összeállított és letesztelt, mérés alapú anyagkártya hatását a sugárvédelmi szimulációk dózisbecsléseire. Ehhez egy karbantartási forgatókönyvet modelleztem: az ESS Bunkerének (neutronkivezetéseket körülvevő, sugárvédelmi árnyékolásként szolgáló épületrész) egyik beton fala körül kialakuló dózisteret szimuláltam a fal üzem közbeni besugárzását követő 3 napos hűtés után MCNPX és Cinder1.05 kódokkal. Az általam összeállított anyagkártyát alkalmazva 30-70%-kal nagyobb dózisteljesítmény adódott a besugárzott fal környezetében, mint a névleges összetétellel elvégzett szimulációk esetében. A felaktiválódásra hajlamos főkomponensek (pl.: Na, Fe) és nyomszennyezők (pl.: W, Co, Eu) mennyiségének pontos meghatározása a bemutatott személyi dózisbecslésen túl a radioaktív hulladék-index pontosabb becslését is nagyban segítheti. [P3]
  
4. Egy új, egyszerűsített eljárást dolgoztam ki elsősorban reaktortartály körüli sugárvédelmi betonok mélységi felaktiválódásának becsléséhez, mely nem igényel teljes reaktor szimulációt. A bemutatott modell nem jelent általános megoldást, a gyakorlati, mérési tapasztalatok alapján könnyen átalakítható, továbbfejleszhető. A modellezéshez MCNPX és Cinder1.05 kódokat használtam. A modell optimalizálásához összesen 8 különböző modell esetén vizsgáltam 7 aktivációs termék ( $^{152}\text{Eu}$ ,  $^{154}\text{Eu}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{65}\text{Zn}$ ,  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{134}\text{Cs}$  és  $^{133}\text{Ba}$ ) aktivitáskonzentrációját 5-60 cm közötti betonmélység tartományon, és vettem össze mérésekből származó adatokkal. A kutatás számszerűsítette a vizsgált modellek mélységi betonaktivációra gyakorolt hatását a különböző izotópok esetén. Míg a legtöbb aktivációs termék keletkezését jelentősen növelte a mintázott térfogat köré helyezett neutronszóró térfogat és/vagy visszaverő felület elhelyezése,  $^{54}\text{Mn}$  aktivitására elhanyagolható hatással voltak ezek a változtatások a keletkezéséhez vezető gyorsneutron reakciók miatt. [P5]
  
5. Az 4. tézispontban leírt betonaktiváció szimulációk eredményeit felhasználva létrehoztam egy modellt, mellyel a mért és szimulációval becsült aktivitások aránya stabil volt a teljes vizsgált beton mélységben a  $^{54}\text{Mn}$  kivételével minden izotóp esetében. A négy, szimulációk során hasonlóan viselkedő izotóp: a  $^{154}\text{Eu}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{65}\text{Zn}$ , és  $^{133}\text{Ba}$  esetén a mért- és szimulált értékek aránya körülbelül 2-5 közötti volt, ami megfelel a szakirodalomban fellelhető szimulációs eredményeknek. Ez igazolta, hogy a létrehozott

modellel hasonló eredményeket lehet elérni, mint egy teljes reaktormodellen végzett szimulációval, vagyis alkalmas mélységi betonaktiváció modellezésére. A 7 vizsgált radioizotóp eltérő neutronbefogási hatáskeresztmetszete, és a számos modellezett elrendezés arra is rávilágított, hogy a mérési és szimulációs eredmények közti eltérés oka a kiindulási neutronspektrum által a rendszerbe vitt szisztematikus hiba volt. [P5]

# Tudományos publikációk jegyzéke

## Referált publikációk

1. E. Dian, E. Klinkby, C. P. Cooper-Jensen, D. Párkányi, D. Hajdú, J. Osán, G. Patriskov, U. Filges, P. M. Bentley: Preparation for activation measurements of concrete and PE-B4C-concrete to be applied for shielding at the European Spallation Source, *Journal of Physics: Conference Series*, 1021 (2018)
2. D. Hajdú, E. Dian, E. Klinkby, C. Cooper-Jensen, J. Osán, P. Zagyvai: Neutron activation properties of PE-B4C-concrete assessed by measurements and simulations, *Journal of Neutron Research*, vol. 21, no. 3-4, pp. 87-94. (2019)
3. D. Hajdú, P. Zagyvai, E. Dian, K. Gméling, J. Osán, E. Klinkby, C. Cooper-Jensen: Experimental study of concrete activation compared to MCNP simulations for safety of neutron sources, *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 171, 109644 (2021)
4. D. Hajdú, P. Zagyvai, E. Dian, K. Gméling: Betonok felaktiválódásának kísérleti- és szimulációs vizsgálata az Európai Neutronkutató Központ (ESS) sugárvédelmi tervezéséhez, *Sugárvédelem*, vol. 14, no. 1, pp. 58-64, (2021)
5. D. Hajdú, M. Klausz, and P. Zagyvai: Reproduction of shielding concrete activation measurements by simulations, *Radiation Protection Dosimetry*, vol. 199, no. 8–9, pp. 689–697, (2023)
6. D. Hajdú, Sz. Török, V. Sugár, L. Alnatour: The Impact of Neutron Irradiation on Concrete Structures, *Proceedings of the 30<sup>th</sup> International Conference - Nuclear Energy for New Europe*, 1017 (2021)

## Konferenciák

- D. Hajdú, P. Zagyvai, E. Dian, K. Gméling: Beton minták sugárvédelmi célú neutron-aktivációs vizsgálata, *XLIII. Sugárvédelmi Továbbképző Tanfolyam*, Hajdúszoboszló, Magyarország (2018)
- D. Hajdú, P. Zagyvai, E. Dian, K. Gméling: Fémek neutronaktivációs vizsgálata szimulációs számítások validációjához, *Őszi Radiokémiai Napok 2018*, Balatonszárszó, Magyarország (2018)
- D. Hajdú, P. Zagyvai, E. Dian, K. Gméling: Neutron activation experiments of structural materials for the European Spallation Source, *2<sup>nd</sup> Argentinian Congress of Neutron Techniques*, Buenos Aires, Argentína (2019)
- D. Hajdú, P. Zagyvai, E. Dian, K. Gméling, E. Klinkby: Radiation-protection-related measurements of concrete samples in the Budapest Research Reactor, *Tudomány, innováció, versenyképesség*, Budapest, Magyarország (2019)
- D. Hajdú, P. Zagyvai, E. Dian, K. Gméling, J. Osán, E. Klinkby: Betonok neutron aktivációjának kísérleti vizsgálata sugárvédelmi szimulációkhoz, *Őszi Radiokémiai Napok 2019*, Balatonszárszó, Magyarország (2019)
- D. Hajdú, P. Zagyvai, T. Bozsó, J. Somlai: The role of natural radioisotopes in dose calculations of the NMX shutter pit of the European Spallation Source, *VII. Terrestrial Radioisotopes in Environment – International Conference on Environmental Protection*, Veszprém, Magyarország (2020)
- D. Hajdú, P. Zagyvai: Hosszú felezési idejű neutronaktivációs termékek szimulációja betonokban, *XLVI. Sugárvédelmi Továbbképző Tanfolyam*, Zalakaros, Magyarország (2021)
- D. Hajdú, P. Zagyvai: Reproduction of shielding concrete activation measurements by simulations, *6<sup>th</sup> European Congress on Radiation Protection*, Budapest, Magyarország (2022)