



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem  
Nukleáris Technikai Intézet

**Multi-physics számítások és mérések a BME  
oktatóreaktorán**

Ph.D. téziszfüzet

András Szabolcs Ványi

Témavezető: Dr. Szabolcs Czifrus

Budapest  
2023



# Bevezetés

Az atomreaktorok átfogó numerikus elemzése számos tudományágat és területet érint (pl. reaktorfizika, a termohidraulika, hűtőközeg-kémia). A múltban ezeket a területeket külön kezelték különálló, egyedi fizikai kódokkal, amelyek közül néhányat egymáshoz gyengén csatoltak [1, 2]. A 21. században a biztonsági szempontok előtérbe helyeződésével és az egyre növekvő számítási kapacitással kiegészülve egy új multifizikai szemléletmód alakult ki és nyert teret. A modern multifizikai kódok több szorosan kapcsolt kódot tartalmaznak ugyanazon a platformon belül, aminek következtében nagy felbontású, nagy pontosságú eredményeket kaphatunk. Napjainkban számos új, multifizikai reaktorelemzési kódrendszer található, mint például az Idaho National Laboratory MOOSE programját [3], az École Polytechnique Fédérale de Lausanne GeN-Foam kódját [4] vagy a Consortium for Advanced Simulation of Light Water Reactors VERA projektjét [5]. A kísérleti oldalon ezzel szemben a releváns és elérhető validációs mérések száma alacsony [6]. Ennek oka abban rejlik, hogy csak viszonylag kevés megfelelő paraméterű és rendelkezésre álló reaktor létezik erre a célra. A kutatóreaktorok többsége túlságosan kis teljesítményű, ezért többnyire nem alkalmas termikus visszacsatolásos mérések elvégzésére; míg az erőművi reaktorok és a nagyobb teljesítményű kutatóreaktorok általában nem állnak rendelkezésre ilyen jellegű mérésekre.

A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Oktatóreaktora (BME OR) egy kis méretű, 100 kW nominális teljesítményű, medence típusú reaktor, amely mérésekhez viszonylag könnyen hozzáférhető, a teljesítménye pedig kellően nagy ahhoz, hogy mérhető termikus visszacsatolással járó tranzienseket lehessen benne végrehajtani. A BME OR tehát egy megfelelő berendezés a kódvalidációs célú mérések tervezésére és végrehajtására. A reaktor hűtése elsősorban természetes cirkulációval történik, így akár kis moduláris reaktorok bizonyos normál üzemi és baleseti körülményeihez hasonló feltételek is előállíthatók a reaktorban.

## Célkitűzések

A doktori értekezés a BME Oktatóreaktoron végzett reaktorfizikai és termohidraulikai mérésekből, valamint a Serpent 2, PARCS és TRACE számítási kódokkal végzett modellezésből és szimulációkból áll. Az elvégzett kísérletek célja kódvalidációs célú mérések biztosítása volt olyan számítógépes kódokhoz, amelyeket kis méretű, medence típusú, természetes cirkulációs hűtésű kutató vagy kis moduláris reaktorok modellezésére fejlesztettek ki. Az ismertetett modellező munka és az elvégzett számítások több célt szolgáltak. Kiinduló számítási modelleket biztosítottak az elvégzett kísérletekhez, bemutattak egy hagyományos reaktorfizikai–termohidraulikai csatolást, legvégül hozzájárultak a reaktorfizikai diffúziós számítások és a termohidraulikai rendszerkódos elemzések során szerzett tapasztalatainkhoz.

# Módszerek

Az Oktatóreaktor reaktorfizikai modellezéséhez sztochasztikus és determinisztikus számítási kódokat is felhasználtam. A stationer referenciamodellt a Serpent 2 Monte-Carlo kóddal fejlesztettem ki. A modell kezdeti geometriája és anyagösszetétele a Nukleáris Technikai Intézetben korábban kifejlesztett MCNP modelleken alapult. A végleges modell számos új részletet és geometriával kapcsolatos korrekciót tartalmaz, míg az üzemanyag-összetételt új saját kiegészi számítások szerint frissítettem. A Serpent 2 referenciakódként való kiválasztását az is indokolta, hogy alkalmas csoportállandók előállítására determinisztikus reaktorfizikai zónaszámításokhoz. A Serpent 2 segítségével a full-core és hagyományos two-step módszer szerint is generáltam csoportállandókat.

A reaktor determinisztikus reaktorfizikai modellezése a PARCS háromdimenziós nodális diffúziós kóddal történt. A számítások során az úgynevezett hibrid nodális kernelt alkalmaztam. A zóna nodális geometriája egy üzemanyag- és moderátor blokkok  $8 \times 9$ -es derékszögű rácsából állt, ahol minden radiális nódus egy üzemanyagkazettányi blokknak felelt meg. A Serpent 2 segítségével generált csoportállandókat a GenPMAXS kóddal dolgoztam fel, amely a könyvtárakat PARCS által közvetlenül olvasható formátumba alakította át.

Az Oktatóreaktor termohidraulikai modellezése a TRACE rendszerkóddal történt. A kód komponens alapú megközelítést alkalmaz, ahol a reaktor fizikai elemei egy megfelelő TRACE komponenssel modellezhetők. A komponensek igény szerint nodalizálhatók és paramétereizhetők. A BME OR TRACE modellje főként a reaktortartályt szimuláló háromdimenziós VESSEL komponensből és az ehhez kapcsolódó 24 CHANNEL komponensből áll, amelyek mindegyike egy-egy üzemanyagkazettának felel meg. A légköri nyomást az egymáshoz csatlakozó SINGLE JUNCTION és BREAK komponensek állítják be, míg a tartályfalat egy HEAT STRUCTURE egység modellezi. A zónakosár falait és szerkezeti elemeit átáramlási felületet korlátozó faktorok és cellatérfogató-tényezők segítségével modelleztem. A csatolatlan modellben a radiális teljesítményeloszlás Serpent 2 számításokból, a teljesítmény-idősorok pedig a mérésekből származtak, míg a csatolt modellben az összes reaktorfizikai vonatkozású adatot a PARCS kód adta át az egyes iterációs lépések során.

A reaktorfizikai mérésekhez számos különböző detektort felhasználtunk. A relatív axiális neutronfluxus méréseket aktivációs módszerrel, Dy(5%)-Al ötvözet huzal segítségével hajtottuk végre. A reaktivitás-értékesség méréseket a reaktor beépített ex-core CFUL08 hasadási kamráival végeztük el, és az inverz kinetika módszerével értékeltem ki. A reaktor teljesítményét KNK-53M típusú, bóros bevonatú, gamma-kompenzált ionizációs kamrákkal rögzítettük.

A termohidraulikai mérések során több K típusú, 1. osztályú pontosságú, nyitott melegpontú és egy J típusú, 1. osztályú pontosságú, zárt, földeletlen melegpontú termoelemet használtunk fel. A mérések során a hőelemeket egy National Instrument NI-9213 kártyához csatlakoztattam. A kísérletekhez a NI LabVIEW 2020 szoftverben egy grafikus felületet hoztam létre, amely grafikonban megjelenítette a termoelemek jeleit, valamint az egyes érzékelőkre számított átlaghőmérséklet-értékeket és azok szórását.

# Új tudományos eredmények

- I. Eljárást dolgoztam ki, amely a vízzel moderált, kis zónájú, nagy kiszökésű reaktorok diffúzióelmélettel történő modellezéséhez szükséges diffúziós állandókat az adott közegre jellemző neutronspektrum figyelembevételével állítja elő. A víz moderátort tartalmazó üzemanyagrégiók esetében a diffúziós állandók generálásánál a régióra jellemző áramspektrummal súlyozott in-scatter vagy a skalárfluxussal súlyozott fluxuslimited közelítés, míg a könnyűvíz reflektor régiók esetében a régióra jellemző áramspektrummal súlyozott in-scatter közelítés alkalmazása javasolt. Az áramspektrumok egydimenziós üzemanyag-reflektor rendszerek Monte-Carlo szimulációjával határozhatók meg. A módszerrel végzett számítások a szakirodalomban széles körben fellelhető eljárásokhoz képest pontosabb teljesítményeloszlásokra vezettek a vizsgált esetekben. [P2, P3]
- II. Megmutattam, hogy a BME kis zónájú, nagy kiszökésű oktatóreaktora statikus esetben determinisztikusan jól modellezhető a PARCS nodális diffúziókóddal, melynek csoportállandóit a Serpent 2 Monte-Carlo kóddal állítottam elő. A full-core csoportállandókkal történt számításoknál a referenciának tekintett Monte-Carlo megoldáshoz képest az így számított kazettateljesítmények maximális eltérése 2,93%, míg az átlagos eltérése 1,01% volt. A hagyományos two-step csoportállandókkal történt számításoknál a referencia megoldáshoz képest a számított kazettateljesítmények maximális eltérése 8,82%, míg az átlagos eltérése 1,71% volt. [P1, P3, P5]
- III. Megmutattam, hogy a BME kis zónájú, medence típusú oktatóreaktorában kialakuló természetes cirkuláció hőmérsékletviszonyai jól modellezhetők egyszerűsített háromdimenziós tartálymodullal kiegészített TRACE termohidraulikai rendszerkóddal. Kollégákkal közösen, különböző típusú, hosszúságú (20-90 perc) és teljesítményű (1-100 kW teljesítmény) méréseket terveztünk és végeztünk a reaktortartályban kialakuló, időben változó hőmérséklet-eloszlás meghatározására. Kiértékeltem és összehasonlítottam a mért és számított hőmérséklet-eloszlás profilokat, melyek kvalitatívan jó egyezést mutattak, míg kvantitatívan jellemzően 1 °C-on belül megegyeztek. [P4]
- IV. Különböző típusú, hosszúságú és teljesítményű visszacsatolásos méréseket terveztünk és végeztünk a kis zónájú, nagy kiszökésű, medence típusú, természetes cirkulációval hűtött BME Oktatóreaktoron, melyek során több üzemanyagkazetta kilépő hőmérsékletét és a reaktor teljesítményét mértük. A végrehajtott tranzienseket a csatolt TRACE/PARCS és TRACE/Pontkinetika kódrendszerekkel szimuláltam és elemeztem. Az eredmények összehasonlításánál azt tapasztaltam, hogy a számítások valamennyi esetben jelentősen felülbecsülték a mért maximális reaktorteljesítményt. Az eltérések okát a TRACE kód hőátadási korrelációiban azonosítottam, melyek nem validáltak az Oktatóreaktor rácsosztása, illetve teljesítmény és hűtőközeg-sebesség tartományában. [P5]

V. Fóliaaktivációs méréseken és reaktorfizikai számításokon, illetve egy kalorimetrikus becslésen alapuló új teljesítménykalibrációt végeztem a BME Oktatóreaktorán. A fóliaaktivációs mérési eredményeket egy korábbi intézeti tanulmányból vettem át, míg a reaktorfizikai számításokat az Oktatóreaktor Serpent 2 modelljének segítségével végeztem el. A kalorimetriás becsléshez három hosszú, nagy teljesítményű, állandó teljesítményszinten végzett mérés adatait használtam fel, amelyek során a tartálybeli hűtőközeg hőmérsékletét számos radiális és axiális pozícióban elhelyezett termoelemmel rögzítettem. A becsült tényleges és kijelzett teljesítmények aránya  $1,44 \pm 0,03$  a fóliaaktivációs, illetve  $1,43 \pm 0,08$  a kalorimetrikus módszer alapján. [P6]

# Tudományos közlemények listája

- [P1] A. Sz. Ványi, B. Babcsány, Z. I. Böröczki, A. Horváth, M. Hursin, M. Szieberth, Sz. Czifrus, „Steady-state neutronic measurements and comprehensive numerical analysis for the BME training reactor”, *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 155, 2021.
- [P2] A. Sz. Ványi, M. Hursin, Sz. Czifrus, „Investigation of Recently Introduced Diffusion Coefficient Generation Methods”, *Proceedings of NENE2021*, Bled, Slovenia, September 6–9, 2021.
- [P3] A. Sz. Ványi, M. Hursin, Sz. Czifrus, „Analysis of diffusion coefficient correction methods applied for small-core, high-leakage reactors”, *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 174, 2022.
- [P4] A. Sz. Ványi, M. Hursin, A. Aszódi, L. Adorján, B. Biró, B. Magyar, P. Mészáros, T. Bozsó, Sz. Czifrus, „Thermal-hydraulic measurements and TRACE system code analysis performed on the natural circulation cooled BME Training Reactor”, *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 189, 2023.
- [P5] A. Sz. Ványi, M. Hursin, Sz. Czifrus, „Analysis of transient measurements with thermal feedback and coupled TRACE/PARCS calculations performed on the BME Training Reactor”, *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 194, 2023.
- [P6] Ványi András Szabolcs: A BME oktatóreaktor háromdimenziós Monte-Carlo reaktorfizikai számításokon és fóliaaktivációs méréseken alapuló teljesítménykalibrációja, BME-NTI-1007/2023 kutatási jelentés, BME NTI, 2023.

# Hivatkozások

- [1] W. A. Rhoades and R. L. Childs, „TORT: A Three-Dimensional Discrete Ordinates Neutron/Photon Transport Code,” *Nuclear Science and Engineering*, vol. 107, no. 4, pp. 397–398, 1991.
- [2] U. Grundmann and U. Rohde, „DYN3D - A 3-dimensional core model for steady state and transient analysis in Thermal reactors,” *Proc. Int. Conf. On the Physics of Reactors "PHYSOR 96", Mito (Japan)*, 1996.
- [3] D. Gaston, C. Newman, G. Hansen, and D. Lebrun-Grandié, „MOOSE: A parallel computational framework for coupled systems of nonlinear equations,” *Nuclear Engineering and Design*, vol. 239, pp. 1768–1778, 2009.
- [4] C. Fiorina, I. Clifford, M. Aufiero, and K. Mikityuk, „GeN-Foam: a novel OpenFOAM based multi-physics solver for 2D/3D transient analysis of nuclear reactors,” *Nuclear Engineering and Design*, vol. 294, pp. 24–37, 2015.
- [5] R. Schmidt, K. Belcourt, R. Hooper, R. Pawlowski, K. Clarno, S. Simunovic, S. Slatery, J. Turner, and S. Palmtag, „An approach for coupled-code multiphysics core simulations from a common input,” *Annals of Nuclear Energy*, vol. 84, pp. 140–152, 2015.
- [6] T. Valentine, M. Avramova, M. Fleming, M. Hursin, K. Ivanov, A. Petruzzi, U. Rohatgi, and K. Velkov, „Overview of the OECD-NEA Expert Group on Multi-physics Experimental Data, Benchmarks and Validation,” *PHYSOR2020 – International Conference on Physics of Reactors: Transition to a Scalable Nuclear Future*; Cambridge, UK, March 28 - April 2, 2020.