

**VVER-440 ÜZEMANYAG-KAZETTÁKBAN LEJÁTSZÓDÓ  
HŰTŐKÖZEG-KEVEREDÉS MODELLEZÉSE A CFX KÓD  
SEGÍTSÉGÉVEL**

**Ph.D. tézisfüzet**

**TÓTH SÁNDOR**

**Témavezető:  
DR. ASZÓDI ATTILA**

**Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem  
Nukleáris Technikai Intézet  
2010**

## A kutatások előzménye

Az atomerőművek normál üzeme során az üzemanyagban felhalmozódó radioaktív anyagok környezetbe történő kikerülése nem megengedhető, ezért a fűtőelemek burkolatának integritását meg kell őrizni. A fűtőelemek épségének biztosítása érdekében különböző hőtechnikai jellemzőkre üzemi korlátot írnak elő. A korlátozott jellemzőket a kampány során folyamatosan monitorozni kell, és az üzemeltetést úgy kell megvalósítani, hogy határértéksértés ne következzen be. A limitek teljesülésének feltétele egyrészt az, hogy a fűtőelem-kötegeket és a töltetet megfelelően tervezzék meg, másrészt, hogy a reaktort megfelelően üzemeltessék.

A reaktorok biztonságosabb tervezéséhez és üzemeltetéséhez a fűtőelem-kazettákban lezajló termohidraulikai folyamatok ismerete szükséges. Nyomottvizes reaktorok esetén a kazettában áramló hűtőközeg térfogati forrása nem megengedhető, ezért a szubcsatornákból kilépő hűtőközeg maximális hőmérsékletére korlátot írnak elő. A korlát teljesülésének ellenőrzésére az atomerőművi gyakorlatban szubcsatornakódokat alkalmaznak. A szubcsatornakódok pontosításához és ellenőrzéséhez a pálcakötegen belüli hűtőközeg-keveredési folyamatok kutatása szükséges. A VVER-440/213 atomreaktorok esetén 210 üzemanyag-kazetta fölött mérik a hűtőközeg kilépő hőmérsékletét. A mért hőmérsékletekre alapozva számítási modellekkel határozzák meg a korlátozott jellemzők aktuális értékét, amelyek alapján limitálják a reaktor teljesítményét. A detektált hőmérsékletek megfelelő értelmezése a nukleáris biztonságot érintő fontos kérdés, amelyhez a kazettafejen lezajló hűtőközeg-keveredési folyamatok kellő mélységű ismerete szükséges.

A pálcakötegekben lezajló turbulens hűtőközeg-keveredési folyamatokat a kilencvenes évek előtt főleg kísérleti úton tanulmányozták. Háromszög rácsba rendezett, szabad pálcakötegekben végzett mérések [Trupp és Azad, 1975; Vonka, 1988] rámutattak, hogy az áramlás struktúrája különbözik az egyenes csőben kialakulótól a turbulencia anizotropabb jellege és a szekunder áramlások jelenléte miatt. Vonka mérései szerint  $P/D=1,3$  ( $P$ : rácsosztás,  $D$ : pálcaátmérő) viszonyú háromszögrácsban a szekunder örvények átlagos sebessége az axiális irányú átlagsebesség 0,1 %-a.

A VVER-440 kazettákban kialakuló hőmérséklet-eloszlást részletesen először a Kurcsatov Intézetben vizsgálták [Kobzar és Oleksyuk, 2006]. A méréseket közel üzemi paraméterek mellett végezték. A hűtőközeg keveredésének vizsgálatára a pálcák végénél és az üzemi termoelem szintjén detektálták a hőmérséklet-eloszlást termoelemek segítségével. A mérések rámutattak, hogy a pálcaköteg kilépésénél lévő hőmérsékleti inhomogenitások a termoelem szintjéig nem egyenlítődnek ki.

Az utóbbi időben a számítógépek teljesítményének rohamos növekedése, és az általános célú CFD (Computational Fluid Dynamics) kódok intenzív fejlődése lehetővé tette azok alkalmazását a fűtőelem-kazettákkal kapcsolatos termohidraulikai kutatások területén. A VVER-440 kazetta aktív pálcakötegeinek első CFD modelljeit finn kutatók építették a FLUENT [Gango, 1997], illetve a FINFLO [Rautaheimo et al., 1999] kódok segítségével. Eredményeik szerint a távtartórácsoknak szignifikáns hatása van az axiális sebességre és a nyomásesésre. A Budapesti Műszaki Egyetem Nukleáris Technikai Intézetében a kazetta 240 mm hosszú,  $60^\circ$  szegmensű részére fejlesztettek modellt a CFX kóddal [Aszódi és Légrádi, 2002]. A szerzők az elvégzett vizsgálatokkal hasonló konklúzióra jutottak, mint a finn kutatók. A modellek közös jellemzője, hogy az általuk számított hőmérséklet-eloszlások validálására megfelelő mérési eredmény hiányában nem került sor. A kazetta szabad szubcsatornájában izoterm, kialakult turbulens áramlást rács-Boltzmann numerikus módszerrel is tanulmányozták [Mayer és Házi, 2006]. A 21 000-es Reynolds-szám mellett végzett nagy örvény szimulációval kimutatták az axiális és érintő irányú sebességkomponensek fluktuációját és a szekunder örvényeket.

A kazettafejben kialakuló hűtőközeg-keveredés vizsgálata központi kutatási téma több VVER-440 reaktort üzemeltető országban. A Budapesti Műszaki Egyetemen az elsők között fejlesztettek modellt a kazetták fej részére a CFX kóddal [Légrádi és Aszódi, 2003]. Számítási eredményeik szerint jelentős, akár 4 °C eltérés lehet a termoelem jele és a kazettából kilépő hűtőközeg átlaghőmérséklete között. A számításokból következő nagy eltéréseket azonban blokki mérések nem támasztották alá. A szlovákiai VUJE kutatóintézet munkatársai a FLUENT kóddal tanulmányozták a hőmérséklet-eloszlást a kazetták fej részében [Petényi et al., 2003]. Számításaikkal hasonló konklúzióra jutottak, mint a magyar szakemberek. Finn kutatók szintén a FLUENT kóddal vizsgálták a problémát [Toppila et al., 2004]. Eredményeik szerint a hűtőközeg nem keveredik el teljes mértékben a kazettafejben, és a szubcsatorna csoportoknak eltérő a súlya a termoelem által mért hőmérsékletben. A kutatók súlyfaktorokat határoztak meg szubcsatorna csoportokra. A súlytényezők üzemi adatokkal történő tesztelése alapján úgy értékelték, hogy a tényezők túlbecsülik a nem tökéletes hűtőközeg-keveredés hatását, így azok nem kerültek bevezetésre atomerőművekben. Valamennyi modellről elmondható, hogy kielégítő validálásukra laboratóriumi mérések hiányában nem került sor.

## Célkitűzések

Az üzemanyag-kazettákban kialakuló hűtőközeg-keveredés kutatása az előző fejezetben ismertetett okok miatt fontos kérdés. A jelen kutatás aktualitását az adta, hogy a paksi atomerőműben új típusú, növelt dúsítású, gadolínium kiegészítő mérget tartalmazó üzemanyag-kazettákat vezetnek be a közeljövőben. Az új kazetták geometriája és teljesítmény-eloszlása részben eltér a jelenleg alkalmazott profilírozott kazettákétól, így a bennük kialakuló termohidraulikai folyamatok is különböznek.

A kutatás során célom volt, hogy a különböző típusú, így a kiegészítő mérget tartalmazó VVER-440 kazetták részeire validált CFD modelleket fejlesszek, és a modellek segítségével tanulmányozzam a kazettákban lezajló háromdimenziós, turbulens hűtőközeg-keveredési folyamatokat. A modellekkel vizsgálni kívántam a kazetta távtartórácsának és keverőrácsának hűtőközeg-áramlásra gyakorolt hatását, a különböző típusú kazettákból kilépő hűtőközeg átlaghőmérsékletének és az üzemi termoelem jelének viszonyát, az azt befolyásoló tényezőket és a pálcaköteg-régiók üzemi termoelem jeléhez való hozzájárulásának a mértékét.

A CFD kódok alkalmazása a nukleáris biztonsággal, így a fűtőelem-kazettákkal kapcsolatos vizsgálatokban körülbelül egy évtizednyi múltat tekint vissza, így számtalan eddig egyáltalán nem vagy kellően nem tisztázott modellezéssel kapcsolatos nyitott kérdés van. Vizsgálataimmal ezekre a kérdésekre is kerestem a választ.

Kutatási eredményeimmel a VVER-440 kazettákban kialakuló termohidraulikai folyamatok mélyebb megértéséhez, az atomerőművi gyakorlatban alkalmazott szubcsatornakódok fejlesztéséhez, a paksi atomerőmű zónaellenőrző rendszerének korszerűsítéséhez kívántam hozzájárulni, és útmutatást igyekeztem adni a fűtőelem-kazetták CFD modellezésével kapcsolatos néhány kérdésben.

# Új tudományos eredmények

## I. tézis

**Igazoltam, hogy 1,35 értékű rácsoztás/pálcaátmérő viszonyal jellemezhető szabad pálcakötegben a Reynolds-feszültségek és a szekunder áramlások kellő pontosságú számítására az ún. Reynolds-átlagolt Navier-Stokes szimuláció<sup>1</sup> alkalmas. A térbeli diszkretizáció és a turbulenciamodell helyes megválasztásának tekintetében irányelveket határoztam meg. [1][2]**

Az ANSYS CFX kód alkalmazásával háromdimenziós CFD modellt fejlesztettem a VVER-440 üzemanyag-kazetta  $P/D=1,35$  viszonyával megegyező  $P/D$  viszonyú szabad pálcaköteg elemi csatornájára. A modellel 60 000-es Reynolds-számmal jellemezhető izoterm, kialakult turbulens áramlást vizsgáltam. Számítási eredményeim Trupp és Azad (1975) mérési eredményeivel történő validálásával igazoltam, hogy a RANS szimuláció alkalmas a  $P/D=1,35$  viszonyal rendelkező szabad pálcakötegben a Reynolds-feszültségek és a szekunder áramlások kellő pontosságú számítására. Részletes érzékenységvizsgálatok és a mérési eredményekkel történő összehasonlítás alapján a térbeli diszkretizáció és a turbulenciamodell helyes megválasztásának tekintetében az alábbi irányelveket határoztam meg:

A Reynolds-feszültségek és a szekunder áramlások megfelelő pontosságú számításához a belső cellák élhosszának kisebbnek kell lennie, mint a  $(P-D)/18$  kifejezés értéke, valamint a fali cellák méretére automatikus falkezelés alkalmazása mellett  $y^+ \approx 20 - 40$  vagy  $y^+ \approx 1$  kritériumot célszerű tartani.

A pálcakötegben kialakuló szekunder örvények és Reynolds-feszültségek nagy pontosságú számítására a Reynolds-feszültség modellek közül a BSL Reynolds-feszültség turbulenciamodell alkalmas.

## II. tézis

**Megmutattam, hogy a VVER-440 üzemanyag-kazettában a szubcsatornák közötti turbulens keveredés intenzívebb, mint a közöttük fellépő konvektív keveredés. A kazetta távtartórácsa áramlási irányban kb. 50 mm távolságig fokozza a turbulens keveredést, és kb. 70 mm távolságig okoz intenzívebb konvektív keveredést a szomszédos szubcsatornák között. Két távtartórács közötti távolság fennmaradó háromnegyed részén a szabad pálcakötegre jellemző keveredési folyamatok érvényesülnek, vagyis ezen a szakaszon a szubcsatornák között nincs érdemi konvektív keveredés. [1][2]**

A VVER-440 üzemanyag-kazetta távtartórácsának hűtőközeg-keveredésre gyakorolt hatásának vizsgálata céljából távtartórács nélküli és távtartórácsot magába foglaló pálcaköteg-szakasz CFD modelleket fejlesztettem a szubcsatorna vizsgálatoknál meghatározott irányelvek figyelembevételével. A modellekkel üzemi Reynolds-számmal jellemezhető (230 000) turbulens áramlást vizsgáltam. Eredményeim szerint a távtartórácsot magába foglaló pálcakötegben a szubcsatornák közötti turbulens keveredés intenzívebb, mint a közöttük fellépő konvektív keveredés (az átkeveredés effektív sebessége 130–240 mm/s, illetve 0–50 mm/s). A távtartórács áramlási irányban kb. 50 mm távolságig fokozza a turbulens keveredést, és kb. 70 mm távolságig okoz intenzívebb (az átkeveredés effektív sebessége  $> 5$  mm/s) konvektív keveredést a szomszédos szubcsatornák között. A két

---

<sup>1</sup> Nemzetközi szakirodalomban ismert elnevezése RANS = Reynolds-Averaged Navier-Stokes szimuláció

távtartórács közötti 250 milliméteres távolság fennmaradó háromnegyed részén a szubcsatornák közötti konvektív keveredés mértéke lecsökken (3–4 mm/s), és a szabad pálcakötegre jellemző turbulens átkeveredés (130–145 mm/s) történik. Összhangban mások eredményeivel [Gango, 1997; Rautaheimo et al., 1999] megállapítottam, hogy a távtartórácsnak az axiális sebességprofilra és a szubcsatornák kilépő átlaghőmérsékletére is szignifikáns hatása van.

### *III. tézis*

**A VVER-440 pálcaköteg aktív szakaszára fejlesztett, validált CFD modellel megmutattam, hogy a Kurcsatov Intézet pontbeli mérési eredményei közvetlenül nem alkalmazhatóak a szubcsatornakódok kilépő hőmérséklet-eloszlásának ellenőrzésére. A CFD modellt alkalmaztam a COBRA kód által számított maximális szubcsatorna kilépő hőmérséklet verifikációjára. [3][4][5][6]**

A VVER-440 üzemanyag-kazetta kilépő hőmérséklet-eloszlásának számítására háromdimenziós CFD modellt fejlesztettem. A Kurcsatov Intézet által valódi méretű kazettamoddellen végzett mérésekre alapozva igazoltam, hogy a modell képes elfogadható pontosságú becslést adni a pálcaköteg végénél a hűtőközeg hőmérséklet-eloszlására. A mérésekre végzett elemzésekkel felhívtam a figyelmet arra, hogy a mérési eredmények közvetlenül nem alkalmazhatóak a szubcsatornakódok kilépő hőmérséklet-eloszlásának ellenőrzésében, mivel a szubcsatornák kilépő átlaghőmérséklete és a mérési pontokban – azaz a szubcsatornák közepén – érvényes lokális hőmérsékletek között szignifikáns különbségek vannak (0,5-2 °C), így a közvetlen összehasonlítás félrevezető lehet.

A pálcaköteg modellt – megfelelő közelítések felhasználásával – alkalmaztam a COBRA kód által számított maximális szubcsatorna kilépő hőmérséklet ellenőrzésére. A két módszerrel számított maximális hőmérsékletek eltérése nem haladta meg a 0,4 °C-t.

### *IV. tézis*

**A VVER-440 kazettafej modellel végzett részletes érzékenységvizsgálatok, és a mérési eredményekkel történő összehasonlítás alapján irányelveket határoztam meg a kazetta fej részében lezajló hűtőközeg-keveredési folyamatok CFD kódokkal történő számítására a belépő peremfeltételek és a konvektív tagok differenciasémájának megválasztását illetően. [4][5][6][7]**

A VVER-440 üzemanyag-kazetta fej részében lezajló termohidraulikai folyamatok kutatására CFD modellt fejlesztettem, amelyet a Kurcsatov Intézet mérési eredményei alapján validáltam. Érzékenységvizsgálatok és mérési eredményekkel történő összehasonlítás alapján irányelveket határoztam meg a kazettafejben lezajló hűtőközeg-keveredési folyamatok CFD kódokkal történő számításához a belépő peremfeltételek és a konvektív tagok differenciasémájára vonatkozóan.

Vizsgálataim szerint a kazettafej modell a belépő peremfeltételek részletességére kevésbé érzékeny, így azok meghatározásához megfelelő szubcsatornakódot alkalmazni, nem szükséges egy több nagyságrenddel nagyobb hardver- és számítási idő igényű CFD pálcaköteg modellt használni.

A kazettafejben lezajló hűtőközeg-keveredés számítása során a konvektív tagok térbeli diszkretizációjához másodrendű pontosságú differenciaséma alkalmazása szükséges. Az elsőrendű pontosságú differenciaséma (upwind) az erős numerikus diffúzió következtében túlbecsüli a kazettafejben kialakuló hűtőközeg-keveredést, így alkalmazása nemkonzervatív eredményre vezet. Az elsőrendű séma – ugyancsak az erős numerikus diffúzió miatt – nem képes az áramlás instacionárius jellegének visszaadására.

## *V. tézis*

**Numerikus számításokkal megmutattam, hogy különböző típusú VVER-440 üzemanyag-kazetták fej részében a hűtőközeg-keveredés intenzív, de a pálcák végétől a termoelemig tartó körülbelül 360 mm hosszú szakasz rövid ahhoz, hogy a hőmérséklet-eloszlásbeli inhomogenitások kiegyenlítődjenek. A különböző típusú és pálcateljesítmény-eloszlású kazetták felett levő termoelemek jele különböző mértékben tér el a kazetták kilépő átlaghőmérsékletétől, így a termoelemek jelének teljesítményeloszlás-függő korrigálása szükséges. A CFD számításokkal kimutatott eltérések jó összhangban vannak a blokkokon tapasztaltakkal. [8][9]**

Modellt fejlesztettem a 3,82% átlagdúsítású 12,2 mm, illetve 12,3 mm rácsosztású profilírozott és a paksi atomerőműben a közeljövőben bevezetésre kerülő 4,2% átlagdúsítású, kiegészítő mérget tartalmazó VVER-440 üzemanyag-kazetták fej részére, és részletesen vizsgáltam a hűtőközeg-keveredést különböző pálcateljesítmény-eloszlással rendelkező kazetták esetén. Eredményeim alapján a hűtőközeg-keveredés valamennyi típusú kazetta fej részében intenzív – erre utalnak a fokozott hőmérséklet-fluktuációk –, de a pálcák végétől a termoelemig tartó körülbelül 360 mm hosszú szakasz rövid ahhoz, hogy a keveredés tökéletesen végbemenjen, azaz a hőmérséklet-eloszlásbeli inhomogenitások kiegyenlítődjenek. Eredményeim szerint a különböző típusú és pálcateljesítmény-eloszlású kazetták felett levő termoelemek jele különböző mértékben tér el a kazetták kilépő átlaghőmérsékletétől. Kiegészítő mérget tartalmazó kazetták esetén a két hőmérséklet közötti eltérést erősen befolyásolja a kiegészítő mérget is. Az említett okok miatt a termoelemek jelének teljesítményeloszlás-függő korrigálása szükséges. A CFD számításokkal kimutatott eltérések jó összhangban vannak a blokkokon tapasztaltakkal.

## *VI. tézis*

**Meghatároztam a VVER-440 üzemanyag-kazetták gyűrű alakú pálcaköteg régióinak és központi csövének in-core termoelem jeléhez való hozzájárulásának a mértékét, azaz azok súlyfaktorát. A súlyfaktorok felhasználásával a központi cső és az egyes szubcsatornák kilépő entalpiájának ismeretében a termoelem jele lineáris összefüggés alapján becsülhető. [8][9]**

A VVER-440 üzemanyag-kazetták fej részében lezajló hűtőközeg-keveredést részletesen vizsgáltam numerikus nyomjelzőanyagok segítségével. A nyomjelző mennyiségek eloszlása alapján meghatároztam öt pálcaköteg régió és a központi cső üzemi termoelem jeléhez való hozzájárulását, azaz azok súlyfaktorát. Az eredmények alapján a középső négy szubcsatorna gyűrűből és a központi csőből kilépő hűtőközeg befolyásolja döntően a termoelem jelét. A súlyfaktorok felhasználásával, a központi cső és a szubcsatornák kilépő entalpiájának ismeretében a termoelem jele lineáris összefüggés segítségével becsülhető. A becsült termoelem jel és a hőmérlegről meghatározott kilépő átlaghőmérséklet felhasználásával az üzemi termoelem által mért jel teljesítményeloszlás-függő korrekciója meghatározható, így a zónamonitorozás pontossága javítható.

Vizsgáltam a súlyfaktorok érzékenységét a kazetta típusára (3,82% átlagdúsítású 12,2 mm, illetve 12,3 mm rácsosztású profilírozott kazetta, 4,2% átlagdúsítású, kiegészítő mérget tartalmazó kazetta) és a pálcateljesítmény eloszlására. Az eredmények szerint a vizsgált különböző típusú és különböző pálcateljesítmény-eloszlású kazetták súlyfaktorai a termoelem jelének becslése szempontjából nem különböznek szignifikánsan. A súlyfaktorok eltérő típusú és eltérő teljesítményprofilú fűtőelem-kötegekre is alkalmazhatóak a vizsgált határokon belül.

## **VII. tézis**

**A kazettafej modellel végzett elemzésekkel rámutattam, hogy az üzemanyag-kazetta keverőrácsának orientációja dönt teljesítményprofilú kazetták esetén befolyásolja az in-core termoelem jelét, így eddig figyelmen kívül hagyott bizonytalanságot okoz a hőmérsékletmérésben. A vizsgált esetben az orientáció 2,5 százalék bizonytalanságot okoz a kazetta teljesítményének számításában. [9]**

Friss VVER-440 üzemanyag-kazettákon végzett megfigyeléseim alapján a keverőrács orientációja nem egységes, hanem mind a négy lehetséges helyzet véletlenszerűen előfordul. A négy lehetséges keverőrács-orientáció hűtőközeg-keveredésre és az üzemi termoelem jelére gyakorolt hatását egy dönt teljesítményprofilú fűtőelem-köteg esetén részletesen tanulmányoztam CFD modellem segítségével. A vizsgálat eredménye szerint dönt teljesítményprofilú kazetta esetén a rács orientációjának szignifikáns hatása van az üzemi termoelem keresztmetszetében kialakuló hőmérséklet-eloszlásra, így az in-core termoelem által mért hőmérsékletre, azaz áttételesen a kazetta teljesítményének üzem közbeni ellenőrzésére. A vizsgált esetben az eltérő keverőrács-orientáció 0,8 °C, azaz a kazetta hűtőközeg-felmelegedésének (32 °C) 2,5 százalékával egyenértékű bizonytalanságot okoz az in-core hőmérsékletmérésben, illetve 2,5 százalék bizonytalanságot az ez alapján számított kazettateljesítményben. A kazetták összeszerelési utasításának megváltoztatásával, a keverőrács orientációjának rögzítésével az ebből eredő bizonytalanság csökkenthető lenne.

## **Az eredmények hasznosítása**

A 4. blokk korábbi kampányainak adataival végzett, a zónában található összes méréssel rendelkező kazettapozícióra és több kampányra kiterjedő statisztikai vizsgálatok eredménye alapján a súlytényezők használatával a mért és a számított termoelem jelek eltéréseinek kazettatípustól való függése megszüntethető. A 4. blokkon a mért és a számított termoelem jelek különbségének számtani átlaga a jelenleg alkalmazott 12,3 mm rácsosztású profilírozott kazetták esetén a radiációs felmelegedésen alapuló régi modellel számított 0,8 °C-ról körülbelül -0,25 °C-ra csökken az új súlyfaktorokat tartalmazó modell alkalmazásának köszönhetően. A súlyfaktorok VERONA zónamonitorozó rendszerbe történő beillesztése folyamatban van a paksi atomerőműben.

## **A tézispontokhoz kapcsolódó tudományos közlemények**

- [1] S. Tóth, A. Aszódi: CFD analysis of flow field in a triangular rod bundle, Nuclear Engineering and Design, 240, 352–363, 2010, ISSN 0029-5493, Elsevier
- [2] S. Tóth, A. Aszódi: CFD analysis of flow field in a triangular rod bundle, Proc. 12<sup>th</sup> International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, NURETH-12-175, Pittsburgh, PA, USA, 30 September–4 October 2007, ISBN 0-89448-058-8
- [3] Tóth S., Aszódi A.: VVER-440 kazetta pálcakötegére vonatkozó CFD számítások eredményei, Magyar Energetika, 2007/5, 75–79, ISSN 1216-8599
- [4] S. Tóth, A. Aszódi: CFD study on coolant mixing in VVER-440 fuel rod bundles and fuel assembly heads, Nuclear Engineering and Design, doi:10.1016/j.nucengdes.2009.11.022, ISSN 0029-5493, Elsevier
- [5] S. Tóth, A. Aszódi: CFD study on coolant mixing in VVER-440 fuel assembly head, Proc. International Congress on Advances in Nuclear Power Plants, ICAPP '08-8278, Anaheim, CA, USA, 8–12 June 2008, ISBN 0-89448-061-8
- [6] S. Tóth, A. Aszódi: CFD study on coolant mixing in VVER-440 fuel rod bundle and assembly head, Proc. Experiments and CFD code Applications to Nuclear Reactor Safety, MIX-05, OECD/NEA & IAEA Workshop, Grenoble, France, 10–12 September 2008
- [7] Tóth S., Aszódi A.: VVER-440 kazettafej modell előzetes validációs számításai, Nukleon, I. évf., 3, 18, 2008, ISSN 1789-9613
- [8] S. Tóth, A. Aszódi: Investigation of coolant mixing in head parts of VVER-440 fuel assemblies with burnable poison, Kerntechnik, 74, 265–272, 2009, ISSN 0932-3902, Carl Hanser Verlag
- [9] S. Tóth, A. Aszódi: Detailed analysis of coolant mixing in VVER-440 fuel assembly heads, Proc. 18<sup>th</sup> Symposium of AER on VVER Reactor Physics and Reactor Safety, 413–425, Eger, Hungary, 6–10 October 2008, ISBN 978-963-372-637-2

## **További tudományos közlemények**

### **Nyomtatásban vagy CD-n megjelent konferencia cikkek**

1. S. Tóth, A. Aszódi, G. Légrádi: CFD analysis of coolant flow in VVER-440 fuel assemblies with the code ANSYS CFX 10.0, Proc. 14<sup>th</sup> International Conference on Nuclear Engineering, ICONE14-89497, Miami, FL, USA, 17–20 July 2006, ISBN 0-7918-3783-1
2. S. Tóth, A. Aszódi: Detailed analysis of coolant flow in VVER-440 fuel rod bundle, Proc. 16<sup>th</sup> Symposium of AER on VVER Reactor Physics and Reactor Safety, 465–481, Bratislava, Slovakia, 25–29 September 2006, ISBN 978-963-372-633-4
3. S. Tóth, A. Aszódi: Calculations of coolant flow in a VVER-440 fuel bundle with the code ANSYS CFX 10.0, Proc. Workshop on Modeling and Measurements of Two-Phase Flows and Heat Transfer in Nuclear Fuel Assemblies, Stockholm, Sweden, 10–11 October 2006

4. Tóth S., Aszódi A.: VVER-440 kazetta pálcakötegére vonatkozó CFD számítások eredményei, V. Nukleáris Technikai Szimpózium kiadványa, 405, Paks, 2006. november 30.– december 1., ISBN 978-963-420-916-4
5. S. Tóth, A. Aszódi: Analysis of mixing processes in VVER-440 rod bundle with RANS method, Proc. 17<sup>th</sup> Symposium of AER on VVER Reactor Physics and Reactor Safety, 513–528, Yalta, Crimea, Ukraine, 23–29 September 2007, ISBN 978-963-372-634-1
6. S. Tóth, A. Aszódi: Preliminary validation of VVER-440 fuel assembly head CFD model, Proc. 17<sup>th</sup> Symposium of AER on VVER Reactor Physics and Reactor Safety, 499–512, Yalta, Crimea, Ukraine, 23–29 September 2007, ISBN 978-963-372-634-1
7. S. Tóth, A. Aszódi: Determination of weight factors for VVER-440 fuel assemblies with burnable poison, 19<sup>th</sup> Symposium of AER on VVER Reactor Physics and Reactor Safety, 483–496, Varna, Bulgaria, 21–25 September 2009, ISBN 978-963-372-640-2

#### **Egyéb konferencia előadások (nyomtatásban nem publikált)**

1. Tóth S., Aszódi A.: Gőzfejlesztő tápvízszabályozó szelep 3D numerikus modellezése, IV. Nukleáris Technikai Szimpózium, Budapest, 2005. december 1–2.
2. S. Tóth, A. Aszódi: CFD analysis of coolant flow in VVER-440 fuel assemblies with the code ANSYS CFX 10.0, AER Working Group C and G Joint Meeting, Balatonfüred, Hungary, 22–23 May 2006
3. S. Tóth, A. Aszódi: CFD analysis of flow field in a triangular rod bundle, AER Working Group C and G Joint Meeting, Ráckeve, Hungary, 17–18 May 2007
4. Tóth S., Aszódi A.: VVER-440 kazettafej modell előzetes validációs számításai, VI. Nukleáris Technikai Szimpózium, Budapest, 2007. november 29–30.
5. S. Tóth, A. Aszódi: CFD study on coolant mixing in VVER-440 fuel assembly head, AER Working Group C and G Joint Meeting, Siófok, Hungary, 29–30 May 2008
6. S. Tóth, A. Aszódi: CFD study on coolant mixing in VVER-440 fuel assembly head, IAEA Regional Workshop on Application of CFD Codes in Nuclear Safety, Budapest, Hungary, 17–20 June 2008
7. Tóth S., Aszódi A.: VVER-440 kazetta fejrészében kialakuló hűtőközeg-keveredés vizsgálata, VII. Nukleáris Technikai Szimpózium, Budapest, 2008. december 4–5.
8. S. Tóth, A. Aszódi: Coolant mixing in head parts of Gd fuel assemblies, AER Working Group C and G Joint Meeting, Tengelic, Hungary, 11–12 June 2009

#### **Dolgozatok, tanulmányok**

1. Tóth S., Aszódi A.: Gőzfejlesztő tápvízszabályozó szelep 3D numerikus modellezése, Kutatási jelentés, BME NTI-310/2005, Budapest, 2005. november 15.
2. Tóth S., Aszódi A.: Aktív pálcaköteg hatvanfokos szegmensének modell leírása, Kutatási jelentés, BME NTI-323/2006, Budapest, 2006. február 20.
3. Tóth S., Aszódi A.: Növelt rácsosztású kazettára vonatkozó számítások eredményei, Kutatási jelentés, BME NTI-332/2006, Budapest, 2006. április 30.
4. Tóth S., Aszódi A.: Tápvízszabályozó szelep 108%-os blokkteljesítmény melletti üzemére vonatkozó CFD számítások, Kutatási jelentés, BME NTI-373/2006, Budapest, 2006. október 15.

5. Tóth S., Aszódi A.: VVER-440 kazettafej-modell ellenőrzése szubcsatornakódok által számított adatok felhasználásával, Kutatási jelentés, BME NTI-395/2007, Budapest, 2007. augusztus 30.
6. Tóth S., Aszódi A.: VVER-440 pálcaköteg-modell ellenőrzése, Kutatási jelentés, BME NTI-403/2007, Budapest, 2007. november 5.
7. Tóth S., Aszódi A.: VVER-440 kazettafej modell ellenőrzése a CFX kód által számított adatok felhasználásával, Kutatási jelentés, BME NTI-407/2007, Budapest, 2007. november 30.
8. Tóth S., Aszódi A.: 12,3 mm rácsosztású kazetta in-core termoelemre vonatkozó súlyfaktorainak meghatározása, érzékenységvizsgálatok, Kutatási jelentés, BME NTI-445/2008, Budapest, 2008. október 1.
9. Tóth S., Aszódi A.: 12,2 mm rácsosztású kazetta in-core termoelemre vonatkozó súlyfaktorainak meghatározása, Kutatási jelentés, BME NTI-455/2008, Budapest, 2008. december 1.
10. Tóth S., Aszódi A.: Gd kazetta in-core termoelemre vonatkozó súlyfaktorainak meghatározása, Kutatási jelentés, BME NTI-473/2009, Budapest, 2009. május 15.
11. Tóth S., Aszódi A.: A COBRA kód kilépő hőmérsékleteloszlásának ellenőrzése a CFX kód által számított adatok felhasználásával, Kutatási jelentés, BME NTI-480/2009, Budapest, 2009. június 30.

## Irodalmi hivatkozások listája

- Trupp, A.C., Azad, R.S., 1975, The structure of turbulent flow in triangular array rod bundles, Nuclear Engineering and Design, 32, 47–84
- Vonka, V., 1988, Measurement of secondary flow vortices in a rod bundle, Nuclear Engineering and Design, 106, 191–207
- Kobzar, L.L., Oleksyuk, D.A., 2006, Experiments on simulation of coolant mixing in fuel assembly head and core exit channel of VVER-440 reactor, Proc. 16<sup>th</sup> Symposium of AER on VVER Reactor Physics and Reactor Safety, 95–117, Bratislava, Slovakia
- Gango, P., 1997, Application of CFD models for 3D analysis of single phase thermal-hydraulics in the VVER-440 fuel assembly, Proc. 7<sup>th</sup> Symposium of AER on VVER Reactor Physics and Reactor Safety, 967–988, Hörnitz, Germany
- Rautaheimo, P., Salminen, E., Siikonen, T., Hyvärinen, J., 1999, Turbulent mixing between VVER-440 fuel bundle subchannels: a CFD study, Proc. 9<sup>th</sup> International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics, San Francisco, CA, USA
- Aszódi A., Légrádi G., 2003, Detailed CFD analysis of coolant mixing in VVER-440 fuel assemblies with the code CFX-5.5, Proc. 10<sup>th</sup> International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics, Seoul, Korea
- Mayer G., Páles J., Házi G., 2007, Large eddy simulation of subchannels using the lattice Boltzmann method, Annals of Nuclear Energy, 34, 140–149
- Légrádi G., Aszódi A., 2003, Detailed CFD analysis of coolant mixing in VVER-440 fuel assembly heads performed with the code CFX-5.5, Proc. 13<sup>th</sup> Symposium of AER on VVER Reactor Physics and Reactor Safety, 773–790, Dresden, German
- Toppila, T., Lestinen, V., Siltanen, P., 2004, CFD simulation of coolant mixing inside the fuel assembly top nozzle and core exit channel of a VVER-440 reactor, Proc. 14<sup>th</sup> Symposium of AER on VVER Reactor Physics and Reactor Safety, 567–579, Helsinki, Finland
- Petényi, V., Klučárová, K., Remiš, J., Chapčák, V., 2003, Fuel assembly outlet temperature profile influence on core by-pass flow and power distribution determination in VVER-440 reactors, Proc. 13<sup>th</sup> Symposium of AER on VVER Reactor Physics and Reactor Safety, 695–710, Dresden, German