

Kazetta termohidraulikai modelljének (ASHYMO) fejlesztése a VERONA zónaellenőrző rendszerhez

Szécsényi Zsolt, Szécsényi Csilla

Paksi Atomerőmű Zrt. Reaktorfizikai Osztály
7031 Paks Pf.71, Tel: +36-75-505 073

Az utóbbi időben a Paksi Atomerőműben végrehajtott fejlesztések, nevezetesen a teljesítménynövelés, a növelt rácsosztású és a kiégő mérget tartalmazó üzemanyagkazetta- típusok alkalmazása, az eddigiektől jelentősen eltérő teljesítmény-eloszlást eredményeztek az üzemanyagkazetták belsejében. Az in-core mérések és az előzetes számítások megmutatták, hogy a kazettákban a hűtőközeg áramlásának modellezésére használt kódok nem elég pontosak és nem eléggé részletesen írják le a folyamatokat. Hasonló problémával kerültek szembe más országokban is a VVER-440 reaktorok üzemeltetői, különösen azok, akik kiégő mérget tartalmazó üzemanyagkazettákat kezdtek használni. A cseh, szlovák, finn és az orosz erőművekben is keresik a megoldást. A Kurcsatov intézetben (Oroszország) valóság-hű mérőberendezésen vizsgálták a kazettán belüli hőmérséklet-eloszlásokat és keveredési viszonyokat. A probléma teljes és a gyakorlatban is alkalmazható megoldása még várat magára. A témával foglalkozó nemzetközi konferenciák tanúsága szerint az általunk alkalmazott modell az egyetlen, amely már gyakorlati eredményeket is szolgáltat, és valós állapotokra tesztelésre került a zónaellenőrző rendszerben.

Az első részben bemutatjuk a problémát és annak okát. A második részben ismertetjük a probléma megoldására kifejlesztett szubcsatorna- és termopár-termohidraulikai kódokat. A kódok kifejlesztésekor erősen támaszkodtunk a Budapesti Műszaki Egyetem által elvégzett háromdimenziós (CFD) kazetta-termohidraulikai számítások eredményeire. A harmadik, befejező részben néhány tesztszámítás eredményét közöljük, mellyel igazoljuk, hogy az első részben felvázolt probléma az új modell használatával megoldásra került.

Előzmények, a probléma ismertetése

A Paksi Atomerőmű üzemeltetésének kezdete óta használják a kazettákban lévő termopárok által mért hőmérséklet-értékeket kazettateljesítmény-egyenlőtlenségi tényező (kq), illetve abszolút kazetta-hőteljesítmény meghatározására. Az eredeti modelleknél alapvető feltételezés volt, hogy a termopárok a kazettaból kilépő hűtőközeg átlaghőmérsékletét mérik ($\bar{T}_{kaz,ki} = T_{termo}$). Ennek megfelelően víz-gőz táblázatok alapján egyértelmű kapcsolat van a kazettaból kilépő hűtőközeg entalpiánövekménye (ΔH_{kaz}) és a termopár által mért hőmérséklet között. Az entalpia és a kazettateljesítmény (Q_{kaz}) között a kazetta-hűtőközeforgalom (f_{kaz}) teremt kapcsolatot.

$$Q_{kaz} = \Delta H_{kaz} (\bar{T}_{kaz,ki} - \bar{T}_{kaz,be}) f_{kaz} \quad (1)$$

ahol $\bar{T}_{kaz,be}$ a kazettaba belépő hűtőközeg átlaghőmérséklete. A kazetta-hűtőközeforgalmat a következő összefüggés adja:

$$f_{kaz} = \Psi_{kaz} F_{reaktor} \left(1 - \frac{\beta}{100}\right), \quad (2)$$

ahol Ψ_{kaz} az adott kazetta zónán belüli forgalomaránya, függ a kazetta helyétől és a hűtő hurkok forgalomarányától, $F_{reaktor}$ a teljes reaktoron mért hűtőközeg-forgalom és β a kazetták

közötti by-pass értéke. A by-pass a hurkok és a kazetták entalpiánövekedésének arányaiból kerül meghatározásra a következő módon:

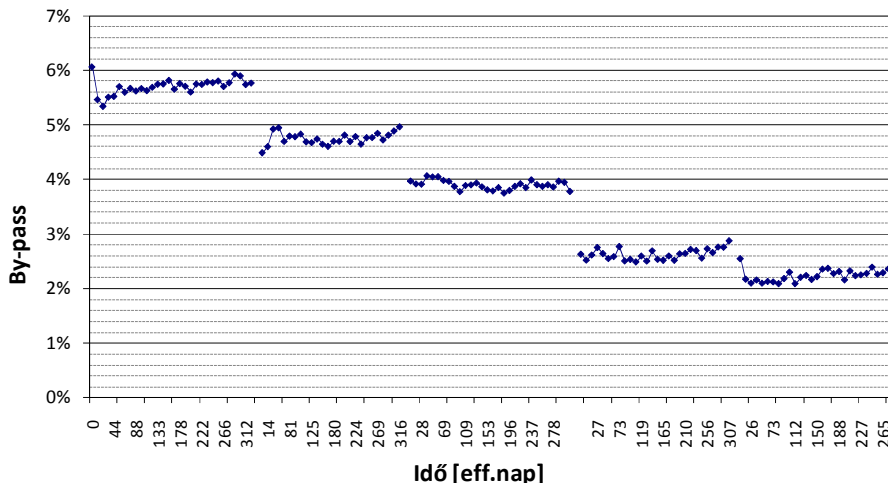
$$\beta = \left(1 - \frac{\Delta H_{hurrok} (T_{hurrokki} - T_{hurrobe})}{\sum_i \Delta H_{ikaz} (T_{ikaz,ki} - T_{ikaz,be}) \Psi_{ikaz}}\right) 100. \quad (3)$$

Ha a termopárok által mért hőmérséklet nem egyezik az átlagos kilépő hőmérséklettel, akkor ez hibát okoz a kazettateljesítmény meghatározásában. A fenti három összefüggésben ez az eltérés két helyen vezet hibás eredményre, a kazettateljesítmény és a by-pass meghatározásánál.

Ha például a termopárok magasabb értéket mérnek, mint az átlaghőmérséklet, akkor az (1) összefüggés szerint a kazetta teljesítmény értéke nagyobbak adódik. Ugyanakkor a by-pass értéke is nagyobbak adódik a tényleges értéknél, amiből az következik, hogy a kazetta-hűtőközeg-forgalom értéke kisebb lesz, mint a tényleges érték, ez pedig a kazettateljesítmény alulbecslését eredményezi.

Látható, hogy az átlaghőmérséklet adott irányú helytelen meghatározása a kazetta- teljesítményeloszlás meghatározására két egymással ellentétes hatást gyakorol. Így az (1) összefüggés alapján meghatározott kazettateljesítmény hibája kevésbé jelentős, mint az entalpiában vagy a by-passban adódó. Az eddigi üzemeltetési tapasztalatból megállapítható, hogy a legtöbb esetben a kazettateljesítményben adódó eltérés összemérhető a meghatározás statisztikus bizonytalanságával.

4. blokk 18-22. kampány



1. ábra: By-pass alakulása a 4. blokk 18-22. kampányaiban

A mérés által okozott szisztematikus hiba nagyobb eltérést okoz a by-pass-ban. Eddigi tapasztalat, hogy a valós by-pass érték 5%-7% között mozog. Ha ettől jelentős eltérést tapasztalunk, akkor felmerül a gyanú, hogy vagy hidraulikai probléma van a blokkon, vagy az átlaghőmérséklet szisztematikusán eltér a termopárokkal mért értéktől. (Ez a scenárió természetesen csak akkor igaz, ha az eltérés iránya minden kazettában szisztematikusán ugyanolyan irányú.)

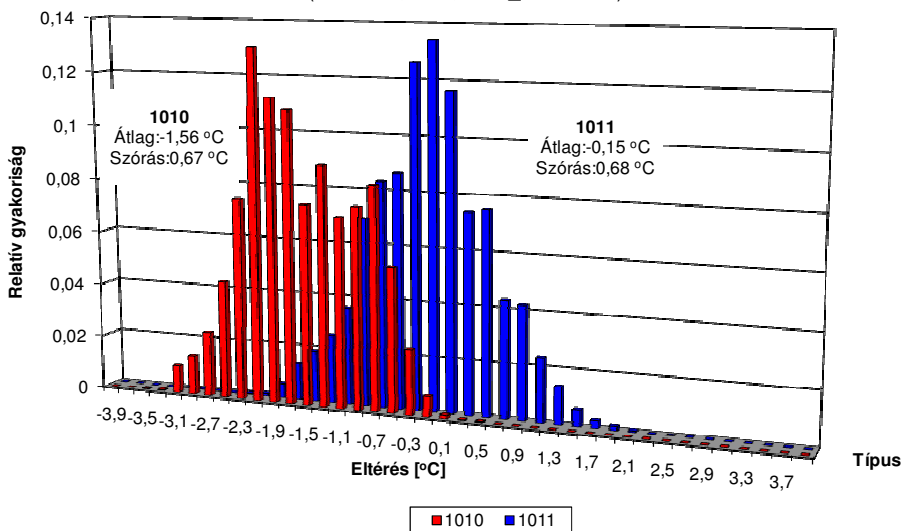
Példaként tekintünk a 4. blokkot, amelynek a 19. kampányába került először berakásra növelt, 12,3 mm rácsoztású üzemanyag. A 19., a 20. és a 21. kampányokban egyszerre volt jelen a 12,2 mm és a 12,3 mm rácsoztású üzemanyag. Az 1. ábrán a 4. blokk 19-22. kampányában a by-pass alakulása látható.

Az 1. ábra tanúsága szerint a by-pass értéke kampányról-kampányra csökken, annak ütemében, ahogy a 12,2 mm rácsoztású kazettákat folyamatosan felváltják a 12,3 mm rácsoztásúak.

Nyilvánvaló, hogy a termopárjel és az átlaghőmérséklet közötti eltérés függ a kazetták típusától. Ennek megfelelően a kevert töltetek esetén, ahol különböző típusú kazetták találhatók egyidejűleg a reaktorban, az entalpia eltérése különböző lesz a különböző típusú kazettákra, de a by-pass eltérése mind a két típus esetén megegyezik, így a kazettateljesítményben is jelentkezni fog típusonként különböző szisztematikus eltérés. A számított átlagos kazetta-kilépőhőmérséklet és a termopár által mért hőmérsékletértékek eltérése tehát típusok szerint különböző. A 2. ábrán a 4. blokk 20. kampányára vonatkozó eloszlást láthatjuk. Jól látszik a két típusra vonatkozó számítás-mérés különbség átlagának az eltérése.

Ezekből egyértelműen adódott a következtetés, hogy a termopárok nem a kazettából kilépő átlaghőmérsékletet mérik, és, hogy a kazettán belüli termohidraulikai folyamatok leírásához új modellt kell kifejleszteni.

Számított és mért kilépő hűtőközeg hőmérsékletek eltérése az 1,22 (1010) és 1,23 cm-es (1011) rácsoztású kazettatípusok esetén
4. blokk 20. kampány
(Radfel=0,00°C; IVEZ_SUBCH=1)



2. ábra: Számított és mért kazetta-kilépőhőmérséklet különbségének eloszlása

Az új modellekkel szemben támasztott követelmények

A modellek több feltételnek kell, hogy megfeleljenek. Az online zónaellenőrző (VERONA) rendszerbe kerülnek beépítésre, ebből több követelmény is adódik. A VERONA két másodperces frissítési ciklusából következően a modelleknek egyszerűeknek és gyorsaknak kell lenniük.

Mivel a termopár (kazettafej) modell számára a fűtőelem pálcák közötti térrészből kilépő hőmérséklet és forgalomeloszlás input, a két modellnek illeszkednie kell egymáshoz.

Minden kazettatípussal létrehozott töltetre, beleértve a vegyes tölteteket is, a termopár modell bizonytalansága nem lehet nagyobb, mint a régi modell bizonytalansága a 12,2 mm-es rácsosztású kazetták esetén. Tehát az új modell alkalmazása esetén mind a 12,2 mm-es, mind a 12,3 mm-es rácsosztású, mind a kiegészítő mérget tartalmazó kazettákra a kazettateljesítmény meghatározásának bizonytalansága nem lehet nagyobb, mint 2,5%.

Mivel a szubcsatorna-kilépőhőmérsékletre nincs mérés, csak egy pontosabb modellel tudjuk összehasonlítani az eredményeit. Ennek megfelelően adhatjuk meg a pontossági követelményeket is. Minden kazettatípusra, egy adott kazettán belül a COBRA kóddal számolt szubcsatorna-kilépőhőmérsékletre képest az eltérések szórása nem lehet nagyobb 0,2 °C-nál.

A modellek ismertetése

A szubcsatorna modell

Mivel a termopár modell inputja a szubcsatorna modell által számított eredmény, az ismertetést a szubcsatorna modellel kezdjük. A gyors számítási igény miatt továbbra sincs mód arra, hogy bonyolultabb modelleket használjunk. Így az eddig használt modellből indultunk ki, és ezt fejlesztettük tovább. A régebben alkalmazott modell egy zártcsatorna modell volt, amelyben a kazettában lévő hűtőközeg-forgalom a csatornák között a teljesítmény- és hőmérsékleteloszlástól függetlenül, a csatornák keresztmetszetének és hidraulikai ellenállási tényezőinek arányában került szétosztásra.

$$\hat{f}_{cs} = f_{kaz} \hat{F}^{-1}, \quad (4)$$

ahol f_{kaz} , az adott kazetta hűtőközeg-forgalma, az \hat{F}^{-1} diagonális mátrix megadja, hogy a kazettán áthaladó hűtőközeg az egyes csatornák között hogyan oszlik meg, az \hat{f}_{cs} szintén diagonális mátrix, az átlós elemeiben az egyes csatornák hűtőközeg forgalomértékei vannak megadva. A csatornaforgalmakból és a csatornába jutó hőtjeljesítményértékből (\bar{P}_{cs}) meghatározható az adott csatorna entalpiainövekménye ($\Delta\bar{H}_{cs}$).

$$\Delta\bar{H}_{cs} = \hat{f}_{cs}^{-1} \bar{P}_{cs} = \frac{\hat{F}}{f_{kaz}} \bar{P}_{cs}. \quad (5)$$

A csatorna-hőtjeljesítményeket a pálcateljesítményekből határozzuk meg egy mátrixszorzással:

$$\bar{P}_{cs} = \hat{A} \bar{P}_p, \quad (6)$$

ahol \bar{P}_p a pálcák adott nóduszára jutó teljesítményekből képzett 126 elemű vektor. A \hat{A} mátrix soraiban lévő elemek megadják, hogy egy-egy pálcánódusz teljesítményének hányad része táplálja az adott csatornát. Az adott modellben az egyes pálcákból egy adott csatornába jutó hőtjeljesítmény a csatorna és a pálcá érintkezési felületével arányos. Az (5) és (6) összefüggéseket összevonva a szubcsatornában az entalpiainövekmény a következő módon írható:

$$\Delta\bar{H}_{cs} = \frac{\hat{F}}{f_{kaz}} \hat{A} \bar{P}_p. \quad (7)$$

Ezt a zártcsatorna modellt fejlesztettük tovább úgy, hogy két szomszédos csatorna között energiaátadást (ΔQ_{i-j}) tételeztünk fel, amely arányos a két csatornában a fenti zártcsatorna modellel számolt hőmérséklet különbséggel:

$$\Delta Q_{i-j} = k_{ij} (T_i - T_j). \quad (8)$$

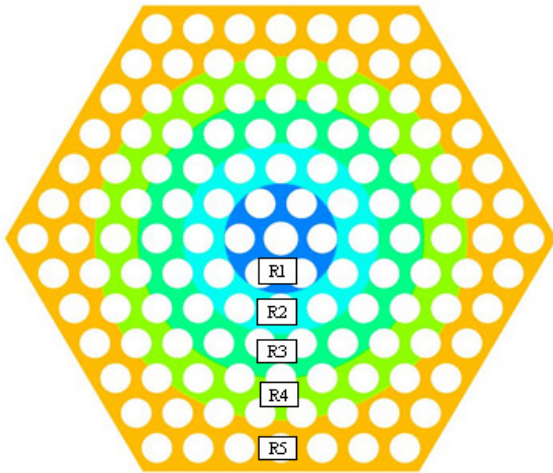
Az arányossági tényező számos paraméter függvénye, például függ a két csatorna közötti érintkező felület méretétől, vagy az áramló közeg sebességétől. Ezek az arányossági tényezők természetesen csatornánként különbözőek lehetnek. A modellben egyelőre csak az érintkező felületek különböző méretét vettük figyelembe. A többi paramétert egy adott kazettán belül konstansnak vettük, és egy paraméterbe sűrítettük. A (8) egyenletben a hőmérsékleteket entalpiával helyettesítve és a zártcsatorna modellel a (7) egyenlettel kifejezve, majd egy adott csatornára összegezve a (8) egyenletnek megfelelő entalpiaváltozásokat, megkapjuk egy adott csatorna entalpiaváltozását a zártcsatorna modellhez képest. Ezt az entalpiaváltozást hozzáadva a zárt csatorna entalpia értékéhez, kis aritmetikai átalakítás után a következő egyenletet kapjuk:

$$\Delta\bar{H} = \frac{\hat{F}}{f_{kaz}} (\hat{A} - \hat{S} \frac{\hat{F}}{f_{kaz}} \hat{A}) \bar{P}_p - \frac{\hat{F}}{f_{kaz}} \hat{S} \bar{H}_{be}. \quad (9)$$

Az így kapott modellben továbbra is \hat{F} a forgalom mátrix. Az (5) összefüggéssel meghatározhatjuk egy adott kazettanóduszban a szubcsatornák entalpiainövekményeit. Az összefüggésben szereplő belépő entalpia (\bar{H}_{be}) az előző szint kilépő entalpiájával lesz egyenlő. Az adott szint kilépő entalpiája pedig a belépő entalpia és az entalpiainövekmény összegeként határozható meg. Így a kazettából kilépő szubcsatorna-entalpiát színtről szintre haladva kaphatjuk meg. Tapasztalatunk szerint az üzemanyagkazetta öt axiális szintre történő bontása elegendő.

A termopár modell

A fent ismertetett szubcsatorna modellhez illesztve, annak forgalom és hőmérséklet outputjait felhasználva fejlesztettük ki termopár modellünket. A modell célja, hogy meghatározzuk a termopár helyén a hűtőközeg átlagos hőmérsékletét.



3. ábra: A kazetta belső régiójának felosztása

A modell megalkotásánál feltételeztük, hogy a keveredési folyamatok a kazetta hosszanti tengelyére vonatkozóan elforgatással szemben invariánsak. A feltételezés egyrészt a kazettákon belüli teljesítményeloszláson, másrészt azon a geometriai tényen alapszik, hogy a kazetta belsejének fűtőelempálcák feletti része hengerszimmetrikus. A legtöbb esetben 60^0 -ra szimmetrikus a pálcák teljesítményeloszlása. CFD-s termohidraulikai számítások pedig megmutatták, hogy a kazettafejen egy ilyen teljesítményeloszlásból hengerszimmetrikus hőmérsékleteloszlás alakul ki. Így henger-koordináta-rendszerben csak a sugár szerinti függés marad meg. Első lépésként körgyűrűkre osztottuk a kazetta belső régióját. A régiók számát és határait a háromdimenziós termodinamikai számításokból vettük át [2]. A régiók kazettán belüli elhelyezkedését a 3. ábra mutatja.

Vegyük a termopár helyén lévő térfogatelemet (V_i), és a termopár metszetében lévő felületet (A_i). A feladat tehát, hogy az adott térfogatelemben lévő, illetve a felületen átáramló hűtőközeg átlagos hőmérsékletét meghatározzuk. Írjuk fel a hűtőközeg entalpiáját (Ht), a felületen átáramló vízforgalom (ft) és az időegységenként átáramló víz belsőenergiájának hányadosaként (Pt):

$$Ht = \frac{Pt}{ft} \tag{10}$$

Ha ismerjük azt, hogy az i . gyűrű forgalmának mekkora hányada áramlik át az A_i felületen (C_i), akkor a felületen átáramló teljes forgalmat a következő módon írhatjuk fel:

$$ft = \sum_{i=1}^6 C_i f_i, \tag{11}$$

ahol f_i az i . gyűrű hűtőközeg-forgalma. Az i index a gyűrűk sorszámát jelöli, esetünkben a központi csővel együtt hat gyűrű van. A gyűrű entalpiájából (H_i) és a gyűrűből származó forgalomrészéből meghatározható, hogy az időegységenként A_i felületen átáramló víz belsőenergiájának mekkora része származik az adott gyűrűből ($P_i = C_i f_i H_i$). Ha a P_i teljesítményeket a gyűrűk száma szerint összegezzük, akkor megkapjuk, hogy mekkora az időegységenként A_i felületen átáramló víz belsőenergiája (Pt):

$$Pt = \sum_{i=1}^6 C_i f_i H_i. \tag{12}$$

A (11) és a (12) egyenletet a (10)-be behelyettesítve kapjuk, hogy:

$$Ht = \frac{\sum_{i=1}^6 C_i f_i H_i}{\sum_{i=1}^6 C_i f_i} \tag{13}$$

Ha a \vec{C} hatdimenziós súlyvektor elhanyagolható mértékben függ a hűtőközeg hőmérséklet-eloszlásától [2, 3, 4], akkor a különböző pálcateljesítmény-eloszlásokhoz megadható egyetlen súlyfüggvény (súlyvektor).

A szubcsatornák entalpiájából és forgalmából a gyűrűk entalpiáját és forgalmát a következő módon határozhatjuk meg:

$$f_i = \sum_{j=1}^{259} G_{ij} f_c j, \tag{14}$$

$$P_i = \sum_{k=1}^{259} G_{ik} f_c k H_c k, \tag{15}$$

ahol G_{ij} egy olyan arányszám, amely megadja, hogy az i . gyűrűnek a j . csatorna milyen arányban része. Behelyettesítve a (13) egyenletbe és kisebb átalakításokat végezve, a következő egyenletet kapjuk:

$$H_t = \frac{\langle \hat{G}\vec{C}, \hat{F}^{-1}\vec{H}_c \rangle}{\langle \hat{G}\vec{C}, \hat{F}^{-1}\vec{E} \rangle}, \tag{16}$$

ahol \vec{E} a csupa egyesből álló vektor.

A súlyvektor komplex 3D-s termodinamikai vizsgálatok alapján lett meghatározva [2, 3, 4]. A 3D-s vizsgálat több lineáris pálcateljesítmény-eloszlásra is meghatározott súlyvektort. Az eloszlásokra elvégzett keresztvizsgálatok megmutatták, hogy a különböző súlyvektorokkal meghatározott termopár-hőmérsékletek között az eltérés nem nagyobb 0,1-0,2 °C-nál [1].

A létrehozott termopár modellel képesek vagyunk a termopár hőmérsékletének meghatározására. A meghatározás feltétele, hogy ismert legyen a szubcsatornák kilépő entalpiája.

A modell teszteredményei

A modellel számításokat végeztünk néhány konkrét állapotra különböző kazettatípusok, és teljesítményeloszlások mellett. Olyan valóságos állapotokat választottunk ki, amelyekben üzemi mérési eredmények is rendelkezésre állnak. Ezekre az állapotokra készültek háromdimenziós termohidraulikai számítások a CFD kód felhasználásával. Az 1. táblázatban foglaltuk össze az eredményeket.

1. táblázat Különböző módon meghatározott termopár-hőmérsékletek különbségei

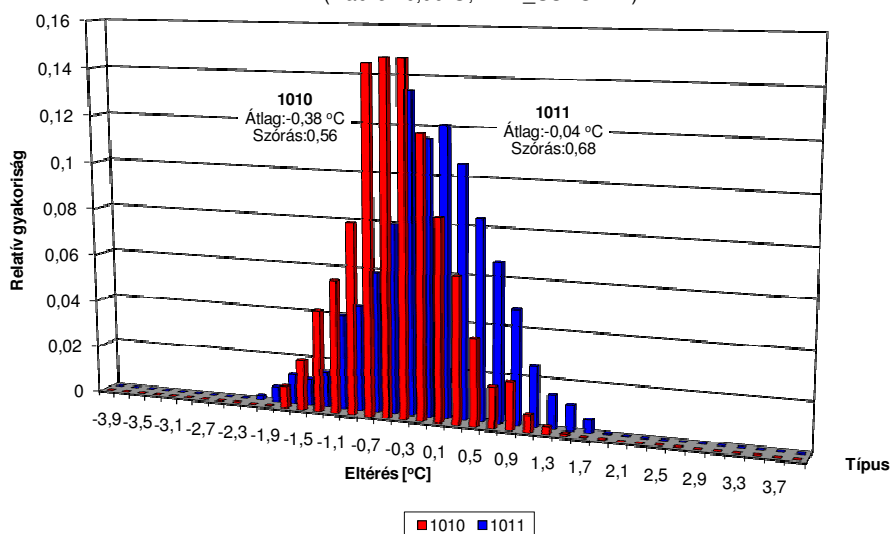
12,3 mm pálcátávolság, 3,82% átlagdúsítás					
Állapot	Mért mínusz számított (CFD) (°C)	Kazetta kilépő átlaghőmérséklet mínusz számított (CFD) (°C)	VERONA modell 1. súlyvektorral mínusz CFD (°C)	VERONA modell 2. súlyvektorral mínusz CFD (°C)	VERONA modell 3. súlyvektorral mínusz CFD (°C)
4. blokk, 20. kampány, 1. szektor, 52. pozíció	-0,9	-0,5	0,1	-0,2	-0,5
4. blokk, 21. kampány, 4. szektor, 34. pozíció	-0,8	0,2	0,8	0,4	0,1
4. blokk, 21. kampány, 5. szektor, 24. pozíció	1,1	-0,2	0,3	-0,1	-0,4
4. blokk, 21. kampány, 6. szektor, 8. pozíció	-0,8	0,0	0,7	0,2	-0,2
4. blokk, 21. kampány, 6. szektor, 12. pozíció	0,6	-0,1	0,6	0,1	-0,3
4. blokk, 21. kampány, 1. szektor, 45. pozíció	-1,0	-0,2	0,5	0,0	-0,4
12,2 mm pálcátávolság, 3,82% átlagdúsítás					
Állapot	Mért mínusz számított (CFD) (°C)	Kazetta kilépő átlaghőmérséklet mínusz számított (CFD) (°C)	VERONA modell 1. súlyvektorral mínusz CFD (°C)	VERONA modell 2. súlyvektorral mínusz CFD (°C)	VERONA modell 3. súlyvektorral mínusz CFD (°C)
4. blokk, 20. kampány, 3. szektor, 44. pozíció	0,9	-1,2	0,6	0,2	-0,3
4. blokk, 20. kampány, 3. szektor, 6. pozíció	0,4	-1,4	0,5	0,0	-0,4
3. blokk, 23. kampány, 6. szektor, 34. pozíció	-0,2	-0,9	0,8	0,4	0,1
3. blokk, 23. kampány, 5. szektor, 47. pozíció	0,1	-0,7	0,8	0,5	0,2
3. blokk, 23. kampány, 3. szektor, 17. pozíció	0,0	-1,3	0,5	0,0	-0,4
3. blokk, 23. kampány, 4. szektor, 14. pozíció	1,1	-1,4	0,5	0,0	-0,4
4,2% átlagdúsítás, kiegészítővel (GD2N)					
Állapot	Kazetta kilépő átlaghőmérséklet mínusz számított (CFD) (°C)	VERONA modell 1. súlyvektorral mínusz CFD (°C)	VERONA modell 2. súlyvektorral mínusz CFD (°C)	VERONA modell 3. súlyvektorral mínusz CFD (°C)	
4. blokk, 32. kampány, 52. pozíció, 100 eff.nap	-0,2	0,3	0,1	0,0	
4. blokk, 32. kampány, 34. pozíció, 5 eff.nap	1,8	0,4	0,1	-0,2	
4. blokk, 32. kampány, 12. pozíció, 100 eff.nap	-0,3	0,5	0,1	-0,1	
4. blokk, 32. kampány, 16. pozíció, 100 eff.nap	-0,4	0,3	-0,2	-0,4	
4. blokk, 32. kampány, 14. pozíció, 100 eff.nap	-0,1	0,5	0,0	-0,4	
4. blokk, 32. kampány, 24. pozíció, 5 eff.nap	2,4	0,9	0,5	0,1	

Az eredményekből látható, hogy a súlyvektorral kapott értékek jól megegyeznek a CFD modellel számolt termopár-hőmérsékletekkel. Az eltérések mind a három súlyvektor esetén 1 °C-alatt maradnak. A legjobb egyezést a 2. súlyvektorral kapott eredmények adják. Ebben az esetben az eltérések 0,5 °C-alatt maradnak. Az is látható, hogy az átlagos kilépőhőmérséklethez képest jelentős eltérés a 12,2 mm rácsoztású üzemanyagkazetták és a gadolíniumos kazetták 5 effektív napos állapotánál tapasztalható. Ezek az eredmények összhangban vannak az üzemeltetési tapasztalatokkal. A mérésekkel törté-

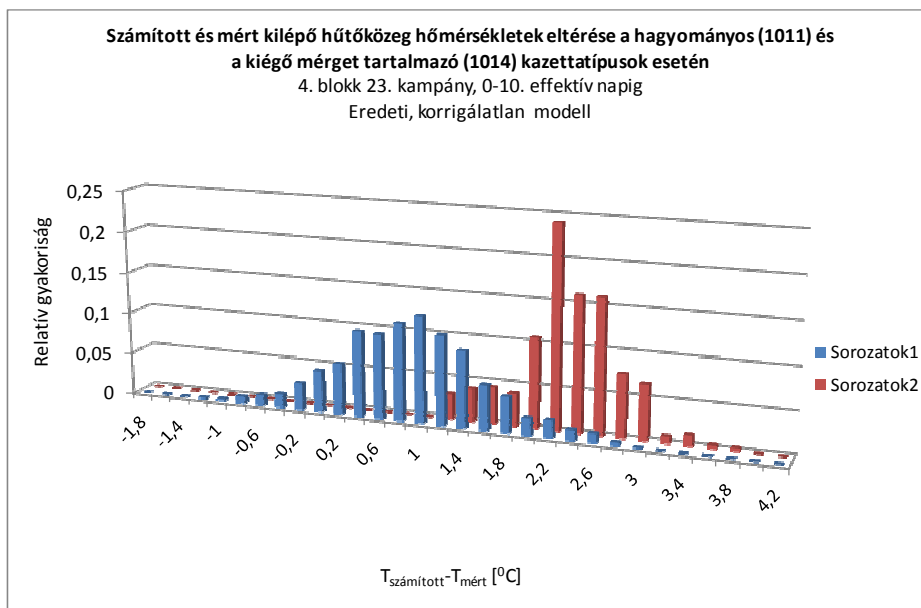
nő összevetés során az egyedi mérésekkel történő összehasonlítás nem ad reális képet, mivel a mérések a keresett effektusokkal összemérhető bizonytalansággal terheltek. Ezekben az esetekben a nagyszámú mérési és számítási eredmény statisztikus összehasonlításából vonhatunk le megfelelő következtetéseket.

Az tanulmány elején bemutatott 4. blokk 20. kampányának statisztikai a korrekció után a következő módon alakulnak (4. ábra):

Számított és mért kilépő hűtőközeg hőmérsékletek eltérése az 1,22 (1010) és 1,23 cm-es (1011) rácsoztású kazettatípusok esetén
4. blokk 20. kampány
(Radfel=0,00°C; IVEZ_SUBCH=2)



4. ábra: Számított és mért kazetta-kilépőhőmérséklet különbségének eloszlása



5. ábra: Számított és mért kazetta-kilépőhőmérséklet különbségének eloszlása

Látható, hogy a két kazettatípus eloszlásfüggvénye nagyobb fedésbe került egymással, és az átlagértékek közötti eltérés is jelentősen lecsökkent, 0,4 °C körüli értékre.

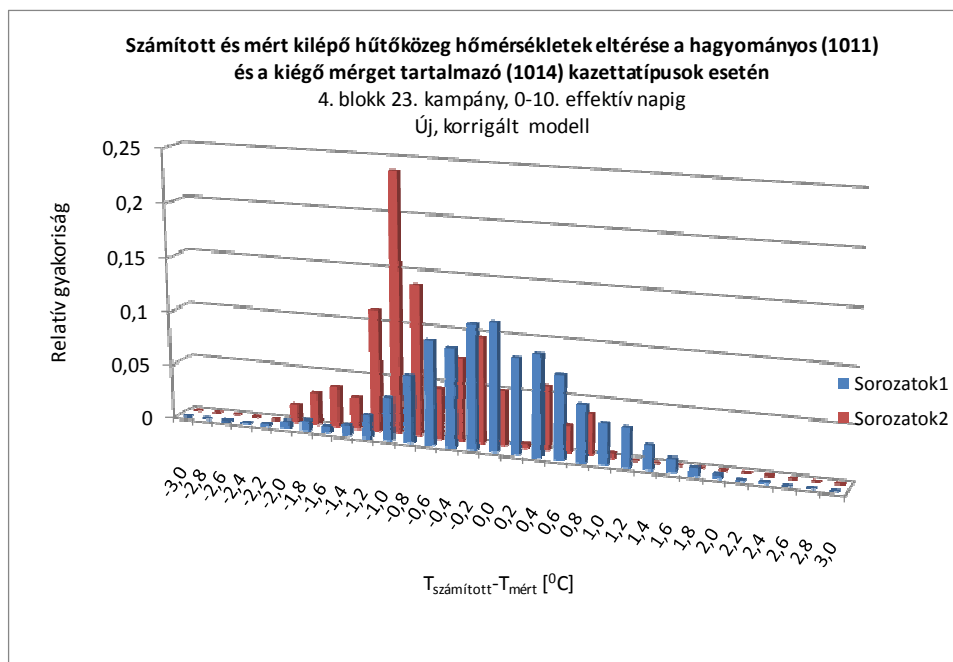
A fenti állapotokra az új szubcsatorna kóddal is végeztünk számításokat, és ezeket összehasonlítottuk a COBRA kód eredményeivel. Az eredmények alapján megállapítható, hogy az eltérések szórása nem nagyobb, mint 0,2 °C, és a maximális eltérések is jóval 1 °C alatt maradnak. A legnagyobb eltérések továbbra is a legnagyobb hőmérsékletgradienssel rendelkező helyeken találhatók.

A kiegészítő mérget tartalmazó kazettákra vonatkozóan is létezik már némi üzemeltetési tapasztalat. A 4. blokk 23. kampányába behelyezett 12 darab tesztkazetta már több mint öt hónapot üzemelt. A tesztkazetták együtt üzemelnek a 3,82% átlagdúsítású 12,3mm rácsosztású kazettákkal. A két

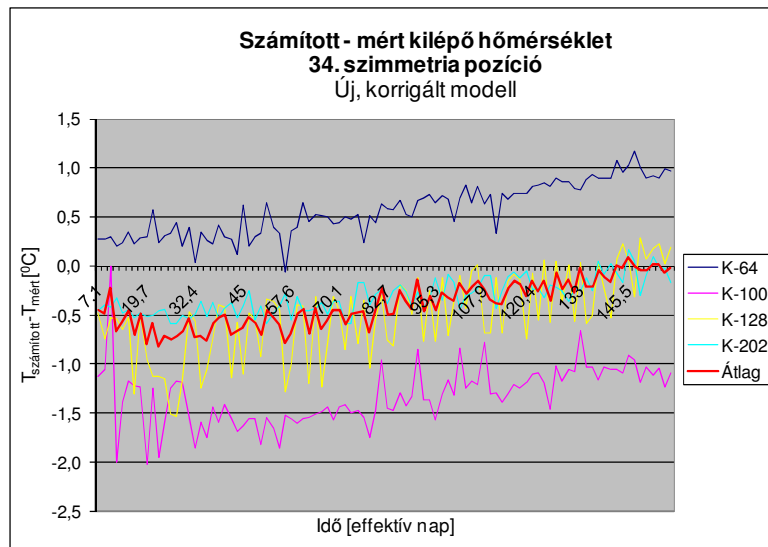
kazettatípusra a 4. blokk 20. kampányához hasonlóan meghatározhatjuk a számított és mért kilépőhőmérsékletek közötti eltérések eloszlását. Az 5. ábrán az eredeti, korrekció nélküli modell által adott eloszlások láthatók: Az ábrán jól látható, hogy a két kazettatípus eloszlása elkülönül. A két típusra vonatkozó átlagos eltérés különbsége 1,5-1,6 °C, ami összhangban van az előzetes CFD elemzésekből kapott eredményekkel. Az új modellt alkalmazva az eloszlások a következő módon változnak (6. ábra):

Látható, hogy a két kazettatípushoz tartozó eloszlások jobban fedésbe kerültek.

Vizsgáljuk meg az egyes szimmetria csoportba helyezett kazettákra vonatkozó eredményeket. Tekintsük a számolt és mért értékek különbségének időbeli alakulását.



6. ábra: Számított és mért kazetta-kilépőhőmérséklet különbségének eloszlása



7. ábra: Számított és mért kazetta-kilépőhőmérséklet különbségének időbeli változása

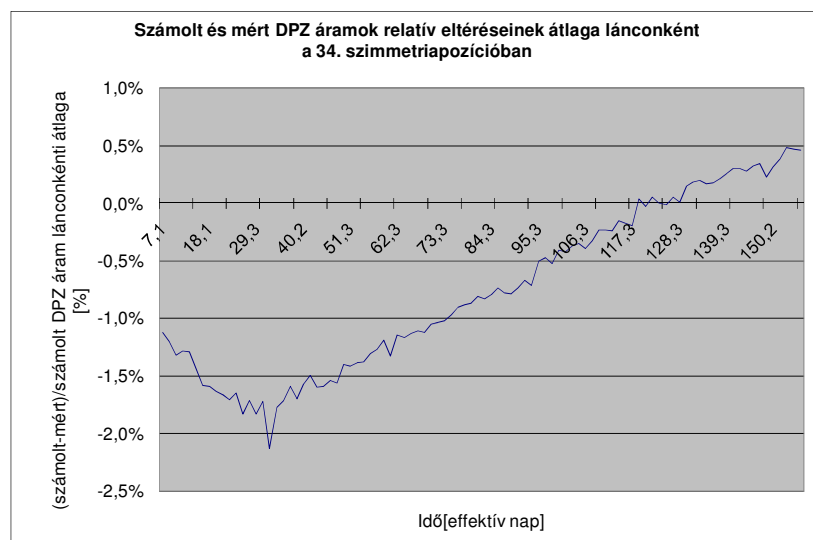
A 7. ábrából jól látható, hogy kampány elején tapasztalható egy negatív eltérés, amely a 150. effektív napra eltűnik. A kampány eleji eltérés iránya olyan, mintha az új modell túlkompenzálná az eredeti modellel meghatározott termopár-hőmérsékletet. A modernizált üzemanyagkazettában azonban nem csak a hűtőközeg belső hőmérséklet-eloszlása változott meg, hanem a magasabb dúsítással és a kiegészítő mérővel neutronfizikai szempontból is különbözik a 3,82% dúsítású üzemanyagkazettáktól. Ebből következően az új modell nem megfelelésének kimondásához meg kell először vizsgálnunk a DPZ-k (a kazettákban elhelyezett neutron-detektorláncok) jeleit is. Az in-core neutrondetektorok jelei nagyon csekély mértékben függnek a hűtőközeg kazettán belüli hőmérsékleteloszlásától. Ezért ezek vizsgálatával külön tudjuk választani a neutronfizikai és a termohidraulikai hatásokat. A 8. ábrán a számított és mért DPZ jelek eltéréseinek időbeli viselkedése látható.

A 8. ábrából jól látható, hogy jellegében jelentős mértékben hasonlít a termopárok jelének viselkedéséhez. Ebből azt a következtetést vonhatjuk le, hogy az új termohidraulikai és a mért termopár-hőmérsékletek közötti eltérés nem a modell hibájából adódik, hanem neutronfizikai okokra vezethető

vissza. Ha részletesebben megvizsgáljuk a fenti ábrákat, akkor azt tapasztaljuk, hogy az anomália a 150. effektív nap körül eltűnik. Ez egybeesik azzal az idővel, amikor a gadolíniumtartalom kiég az üzemanyagból. Tehát feltételezhetjük, hogy a neutronfizikai kódjaink a gadolínium kezelését nem tökéletesen oldják meg. Az eltérések irányából az is kitűnik, hogy a gadolíniumos pálcák teljesítményét a kódjaink alábecslik.

Összefoglalás

A modell alapjait 3 dimenziós termohidraulikai számítások eredményei alkotják. Sikertült egy olyan szubcsatorna és termopár modellt kifejleszteni, amelyek a bevezetőben megfogalmazott kritériumoknak megfelelnek. Elegendően egyszerűek, ezáltal alkalmasak az online rendszerbe történő beillesztésre. Emellett megfelelően pontos eredményeket szolgáltatnak. A kiegészítő mérget tartalmazó kazetták esetén az üzemi mérésektől tapasztalt eltérést nem az új modell okozza, hanem a gadolíniumos fűtőelem pálcák nem megfelelő neutronfizikai kezelése. A probléma megoldása után várhatóan a termopár hőmérséklet meghatározása is megfelelően alacsony bizonytalansággal fog rendelkezni.



8. ábra: Számított és mért DPZ áramok különbségének időbeli változása

Irodalomjegyzék

- [1] S. Tóth, A. Aszódi: *Determination of Weight Factors for VVER-440 Fuel Assemblies with Burnable Poison*, Budapest University of Technology and Economics, 19th SYMPOSIUM of AER on VVER Reactor Physics and Reactor Safety, September 21 – 25, 2009, Varna, Bulgaria
- [2] Tóth S., és mások: *12,3 mm rácsoztású kazetta in-core termoelemre vonatkozó súlyfaktorainak meghatározása, érzékenységvizsgálatok*, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest, 2008. október 1., K+F jelentés a Pa ZRt. részére
- [3] Tóth S., és mások: *12,2 mm rácsoztású kazetta in-core termoelemre vonatkozó súlyfaktorainak meghatározása*, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest, 2008. december 1., K+F jelentés a Pa ZRt. részére
- [4] Tóth S., és mások: *Gd kazetta in-core termoelemre vonatkozó súlyfaktorainak meghatározása*, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest, 2009. május 15., K+F jelentés a Pa ZRt. részére