

# Üzemanyag-kazetta peremrégiójának CFD vizsgálata

Sárdy Gábor, Tóth Sándor

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Nukleáris Technikai Intézet  
1111 Budapest, Műegyetem rkp. 9. tel.: +36 1 463 1109

A VVER-1200 (vízzel moderált, vízhűtésű energetikai reaktor) egy orosz fejlesztésű, 3+ generációs nyomottvízes atomreaktor. Ezt a reaktortípust tervezik a paksi VVER-440 atomerőmű mellé építeni a kapacitás fenntartása céljából. Jelen munkánkban a keverőfülekkel ellátott VVER-1200 kazetta távtartórács rész hatását vizsgáltuk az áramlásra, és a kialakuló sebesség- és hőmérséklet-eloszlást, illetve keresztáramlásokat értékeltük. A vizsgálatokhoz az ANSYS CFX kódot alkalmaztuk. Három különböző felbontású hálóval érzékenységvizsgálatot végeztünk, majd a kapott eredményekre támaszkodva megépítettük a teljes aktív hosszúságú perem rész modelljét. Végezetül a távtartórács elrendezés változtatásának a kazetták közötti keveredésre gyakorolt hatását vizsgáltuk.

## Bevezetés

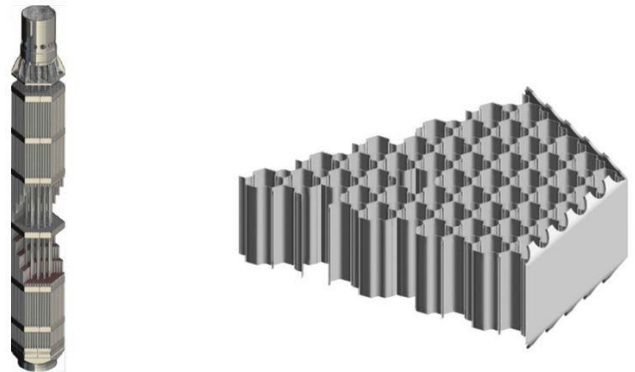
Magyarország villamosenergia-termelésének 54%-át az ország egyedüli atomerőműve, a paksi atomerőmű adta 2014-ben [1]. A 2000 MW összteljesítményű paksi blokkokat azonban körülbelül két évtized múlva le fogják állítani. A blokkok eredetileg tervezett 30 éves üzemideje 2012 és 2017 között járt, illetve jár le. Húsz éves üzemidő-hosszabbítást engedélyezett a hazai nukleáris hatóság az 1., 2. és 3. blokkoknak, amelyek így 2032-ben, 2034-ben és 2036-ban fognak leállni, és hasonló hosszabbításra készül az üzemeltető a 4. blokk esetén is [2]. A négy blokk leállításával körülbelül 2000 MW teljesítmény kiesést kell pótolni, amely más tényezőket is figyelembe véve új kapacitás megépítését teszi szükségessé, ezért egy új atomerőmű építését kezdeményezték.

A tervezett két darab VVER-1200/V491 blokk egyenként kb. 1200 MW villamos teljesítményű lesz. A két új blokk összteljesítménye a négy, 1982-től üzembe helyezett blokk jelenlegi összteljesítményének 120%-át teszi ki, így ez a projekt hozzájárul ahhoz, hogy az ország villamosenergia-szükségletének jelentős részét képesek legyenek előállítani a hazai erőművek. A projekt jelenleg az engedélyeztetés stádiumában van.

Kiemelten fontos az újonnan épülő blokkok ismerete, így azt is fontos tudni, hogy az aktív zónán belül milyen termohidraulikai viszonyok alakulnak ki. Jelen munkánkban a reaktorban elhelyezkedő üzemanyag-kazetták perem régiójában kialakuló termohidraulikai jellemzőket vizsgáltuk. A számításokhoz szükséges belépő peremfeltételek meghatározása után hálófüggetlenség-vizsgálatot végeztünk. Megvizsgáltuk, hogy a távtartórács orientációjának változtatása hogyan befolyásolja a kazetták közötti hűtőközeg-keveredést. A kapott eredmények segítséget nyújtanak a kazettákban lejátszódó termohidraulikai viszonyok megértéséhez.

## Irodalmi áttekintés

A VVER-1200 reaktor aktív zónájában 163 db hatszög keresztmetszetű üzemanyag-kazetta van [3]. Az 1. ábrán látható 4570 mm magas üzemanyag-kazettában 312 db üzemanyag-pálca helyezkedik el háromszögrácsba rendezve. A pálcák külső átmérője 9,1 mm. 11 darab, egymástól 340 mm-re levő távtartórács fogja össze a pálcákat az aktív szakaszon. A kazetta pereménél a távtartórácsokon keverőfülek helyezkednek el. Az üzemanyag-kazettáknak nincsen fala, ezáltal lehetővé téve a kazetták közötti átáramlást. A kazettákban  $\text{UO}_2$  üzemanyag található, mellyel 12-18 hónapig képes megszakítás nélkül üzemelni a reaktor, egy üzemanyagköteg 3-6 évet tölt el az aktív zónában.



1. ábra: A VVER-1200 üzemanyag-kazetta és annak távtartórácsa [3-4]

Nagyon kevés publikáció foglalkozik VVER-1200 vagy VVER-1000 üzemanyag-kazetták CFD (Computational Fluid Dynamics) analízisével. Bukov és társai a távtartórácsok áramlásra való hatásának vizsgálatával foglalkoztak kutatásaik során [4]. Mousavizadeh és társai munkájukban VVER-1000 atomreaktor üzemanyag-pálcájának hőmérsékleti jellemzőit vizsgálták kísérletileg különböző  $\text{TiO}_2$  koncentrációjú hűtőközeg esetén, majd az eredményeket összevetették numerikus számítások eredményeivel [5]. VVER-1000 atomreaktor-tartály különböző aszimmetrikus

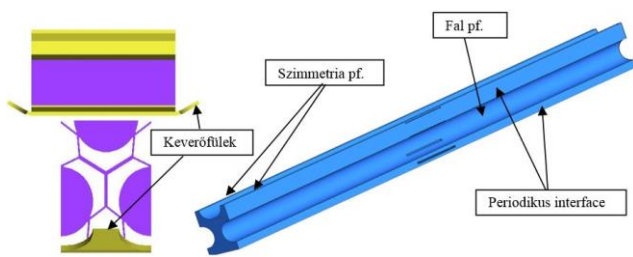
üzemállapotát vizsgálta Böttcher [6]. A számításokban csak a reaktortartályon belüli áramlást modellezték, melyekből a kazettában kialakuló áramlás részletei nem tudhatók meg.

## Távtartórács osztás hosszúságú modellel végzett számítások

### Hálóérzékenység-vizsgálat

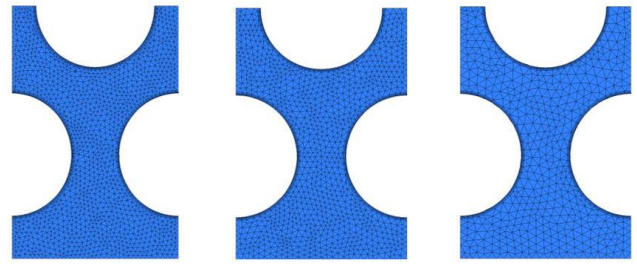
A rács áramlásra gyakorolt hatásának vizsgálata céljából egy kazetta peremrészének távtartórács osztás hosszúságú (340 mm) modelljét építettünk meg első lépésben. A pálcák külső átmérője 9,1 mm. A modell magába foglalja a VVER-1200 rács vizsgált régióba eső részét és az azon levő keverőfület (2. ábra). A modellt strukturálatlan hálóval írtuk le, amely a rács környezetében tetraéder és prizma elemeket tartalmaz. A rács alatt és fölött a szabad pálcaköteg részben a fal mellett hexaéder, a belső régióban prizma elemeket alkalmaztunk az áramlás leírására. Három különböző felbontású hálót hoztunk létre, hogy ellenőrizzük a megoldás hálófüggetlenségét (3. ábra). A hálók maximális elemméretei 0,35; 0,45 és 0,6 mm. A hálók körülbelül 1,24; 2,87 és 4,51 millió elemből állnak.

A modell alsó síkján belépés peremfeltételt adtuk meg, és előírtuk a sebesség, a turbulens kinetikus energia és a disszipáció eloszlását szabad szubcsatornára végzett számítások eredményei alapján. A szabad szubcsatorna számításokhoz 10 mm magas modellt építettünk, melyben az alsó és felső felületet periodikus interface-szel kapcsoltuk össze, és stacionárius számítását végeztünk. A felső határoló síkon kilépés peremfeltételt definiáltunk 0 Pa relatív nyomással. A referencia nyomás értéke 162 bar volt. A modell oldalsó felületeit periodikus interface-szel kapcsoltuk össze, a felső függőleges felületekre szimmetria peremfeltételt írtunk elő. A fizikai falakat csúszásmentes falként modelleztük. Az áramló közeg jellemzőit a zóna belépő paramétereire vonatkoztattuk (162 bar, 298 °C). A stacionárius számításokhoz BSL Reynolds-feszültség turbulenciamodellt alkalmaztunk. A megmaradási egyenletek reziduálisainak RMS értékére (iterációs hiba mérőszámára)  $10^{-6}$  konvergencia kritériumot írtunk elő.



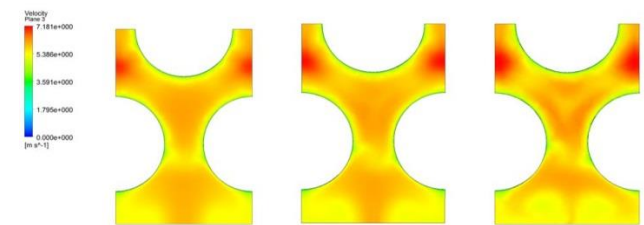
2. ábra: A távtartórács rész és az azt magába foglaló csatorna geometriai modellje

Az ismertett hálókkal ugyanolyan peremfeltételek mellett számításokat végeztünk, hogy megvizsgáljuk a hálófelbontás eredményekre gyakorolt hatását. A hálóvizsgálat során a kazetták közötti határfelületen szimmetria peremfeltételt alkalmaztunk.



3. ábra: A távtartórácsot tartalmazó geometria hálói (T035, T045 és T060) a kilépő síkon

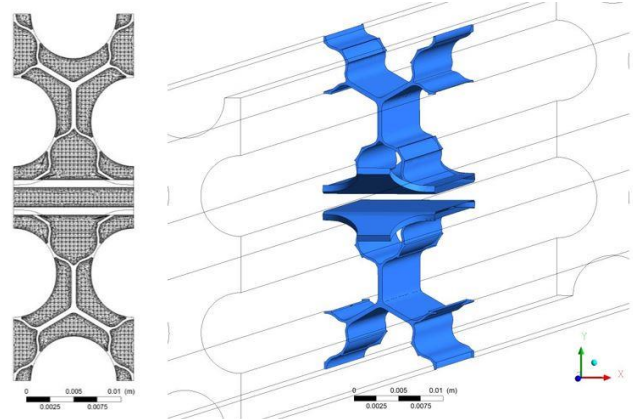
A 4. ábra a rács mögött 10D távolságra (D a pálcák külső átmérőjét jelöli, amely 9,1 mm) mutatja a keresztmetszeti sebesség abszolút értékének eloszlását, amelyen jól kivehető, hogy a különböző hálókkal számított sebességeloszlások jellege között nincs lényegi eltérés, és az értékek is elfogadhatóan egyeznek. A hálóvizsgálat eredményei alapján a további számításokhoz a T045 jelű hálót választottuk, mivel annak eredményei jellegre nem térnek el a T035 jelű hálóval számított eredményektől, és számítási erőforrásigénye lényegesen kisebb.



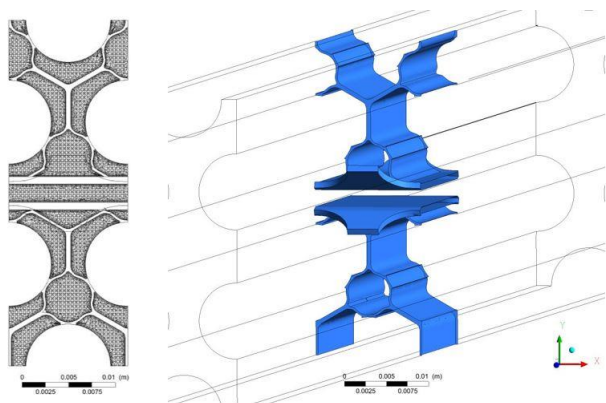
4. ábra: A T035, T045 és T060 hálókön számított sebességeloszlások a rács mögött 10D távolságra

### Távtartórács osztás hosszúságú köteg modellel végzett vizsgálatok

A távtartórács kialakítás termohidraulikai folyamatokra gyakorolt hatásának vizsgálatára két modellt hoztunk létre. A szimmetrikus modell azonos távtartórács részt feltételez a szomszédos kazettákban, ahogy az 5. ábrán látható. A valóságban aszimmetrikus távtartórács elrendezést alkalmaznak, amelyet úgy hoznak létre, hogy a peremnél a távtartórács kialakítása 60 fokként változik. Ennek modellje a 6. ábrán látható, a továbbiakban aszimmetrikus modellként fogjuk nevezni.



5. ábra: A szimmetrikus modell hálózása és felépítése

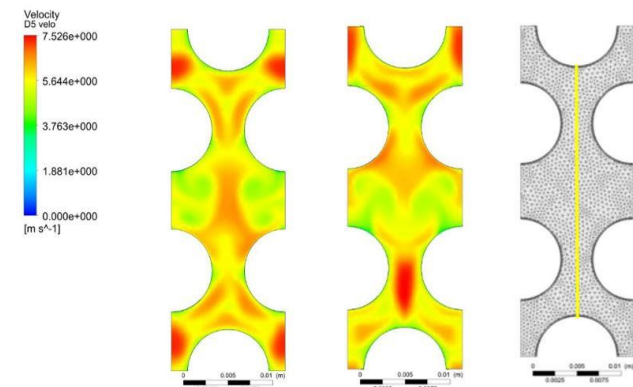


6. ábra: Az aszimmetrikus modell hálózása és felépítése

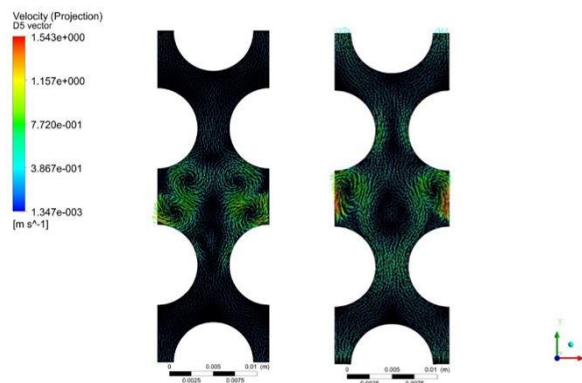
A modell hossza egy távtartórács osztásnyi, azaz 340 mm. A háló kialakítása megegyezik az előző fejezetben ismertetettel. A szimmetrikus modell 6 002 355, míg az aszimmetrikus modell 5 233 572 elemet tartalmaz. A számításokhoz az SST turbulenciamodellt alkalmaztuk a korábbi munkánk keretein belül végzett érzékenység-vizsgálat alapján [7]. A modell peremfeltételei megegyeznek az előző fejezetben bemutatott modellével.

Az eredmények kiértékelése során azt vizsgáltuk meg, hogy a keverőfülekkel ellátott távtartórácsnak milyen hatása van az áramlás sebesség és hőmérséklet eloszlására, illetve milyen keresztmetszeti örvények alakulnak ki. Az eredményeket a rácstól 5D távolságra felvett síkon és a Line1 nevű vonal mentén mutatjuk be. A kiértékelés során a metszet alsó részére alsó régióként, míg a metszet felső részére felső régióként fogunk hivatkozni a könnyebb érthetőség miatt. A felső, ill. alsó régió természetesen a valóságban egy magasságban helyezkednek el, hiszen vízszintes metszetet vizsgálunk.

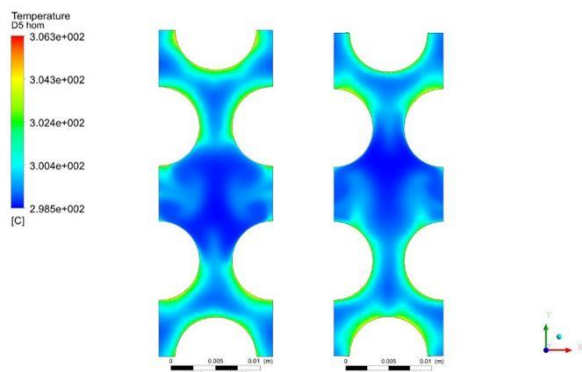
A 7. és 8. ábrán a két modellel számított sebesség abszolút értékének eloszlása látható a távtartórácstól 5D távolságra. Mindkét esetben jól megfigyelhető a távtartórács és a keverőfülek nyoma. A szimmetrikus modell esetén a sebességeloszlás közel szimmetrikus, míg az aszimmetrikus esetén a rácok elrendezésének megfelelően aszimmetrikus. Az aszimmetrikus modell esetén a kazetták között jelentősebb átáramlás alakul ki, azaz jelen esetben áramlás az alsó régióból a felsőbe. A hőmérséklet-eloszlás az átkeveredés következtében megváltozik és aszimmetrikussá válik (9. ábra).



7. ábra: A szimmetrikus és aszimmetrikus modellel számított sebességeloszlás 5D távolságra a rác után, illetve a Line1 vonal elhelyezkedése



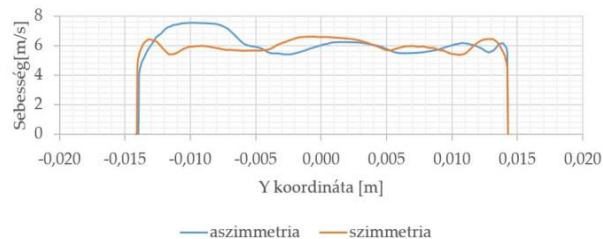
8. ábra: A szimmetrikus és aszimmetrikus modellel számított keresztáramlások 5D távolságra a rác után



9. ábra: A szimmetrikus és aszimmetrikus modellel számított hőmérséklet-eloszlás 5D távolságra a rác után

Megfigyelhető, hogy az alsó régióban lévő két pálcza „felső” részénél a közeg melegebb, míg a felsőbb régióban lévő két pálcza alsó részénél hidegebb az átáramlás miatt. A 8. ábrán észrevehető az is, hogy a szimmetrikus modell esetén is létrejön valamekkora átkeveredés a kazetták között. Ez annak tudható be, hogy a folyamat kissé időfüggő, és az iteráció egy olyan időpillanatban lett leállítva, amikor éppen nem szimmetrikus a keresztáramlás.

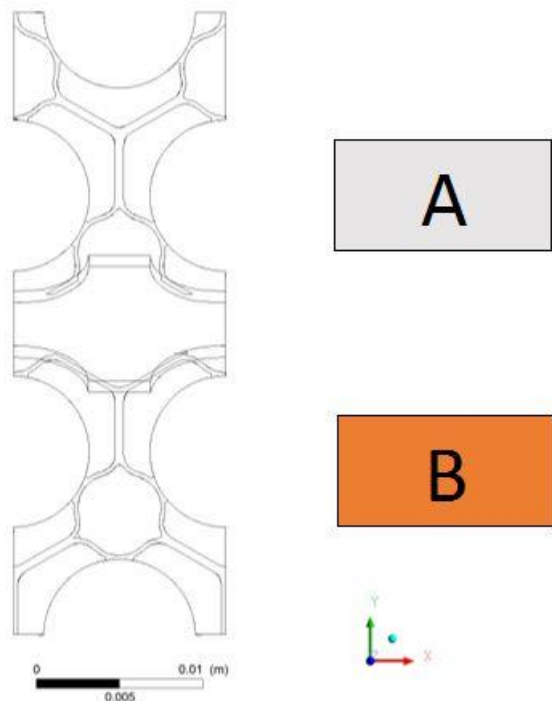
A 10. ábrán megfigyelhető a szimmetrikus és aszimmetrikus modellel számított, a távtartórácstól 5D-re levő Line1 vonal menti sebességeloszlások közötti különbség. Az aszimmetrikus modell esetén a maximális sebesség helye az alsó régióban van, míg a szimmetrikus modell esetén a két régió határán, a kazetták között. A szimmetrikus és aszimmetrikus modellel végzett számítás megmutatta, hogy a kazetták közötti hatékonyabb hűtőközeg-keveredés biztosításához a távtartórácsoknak eltérő kialakításúnak (orientációjának) kell lenniük az egymás melletti kazetták pereménél. A további számításokat az aszimmetrikus modellel felhasználva végeztük, mivel a valóságban is aszimmetrikus rác elrendezést alkalmaznak.



10. ábra: A szimmetrikus és aszimmetrikus modellel számított Line1 vonal menti sebességeloszlás 5D távolságra a távtartórácstól

**Az aktív köteg rész modelljével végzett vizsgálatok**

Az előző fejezetben bemutatott aszimmetrikus távtartórács elrendezést az eddigiekben egy távtartórács-osztás (340 mm) hosszúságú modellel vizsgáltuk. A további számításokhoz a modellt kiterjesztettük a teljes aktív köteghosszra (3740 mm), és figyelembe vettük az ezen a szakaszon levő 11 rácsot.



11. ábra: A távtartórács részek elnevezése

A 11. ábrán látható, hogy a rácselrendezésben melyik rács részt neveztek el A és melyiket B típusúnak. Az aszimmetrikus modellel végzett számítás megmutatta, hogy a kazetták közötti hatékony hűtőközeg-keveredés kialakításához szükséges az, hogy a szomszédos kazetták pereménél elhelyezkedő távtartórács részek alakja különböző legyen. A számítások azt is megmutatták, hogy ebben az esetben létrejön intenzívebb átkeveredés, azonban nem lesz teljesen egyenletes a hőmérséklet-eloszlás: az egyik régióban hidegebb, míg a másikban melegebb a hűtőközeg. A kazetták közötti keveredés módosításának vizsgálata céljából egy további modellt építettünk, amelyben a páratlan számú rácsok az eddigi orientációjukban maradtak, azonban a páros számúakat elforgattuk 180°-kal, hogy az átkeveredés iránya váltakozzon. A két modell szemléltetésére a 12. és 13. ábra szolgál (az A és B távtartórács alakját a 11. ábra mutatja).

M1										
A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B

12. ábra: A számításához használt M1 modell felépítésének szemléltetése

M2										
A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A
B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B

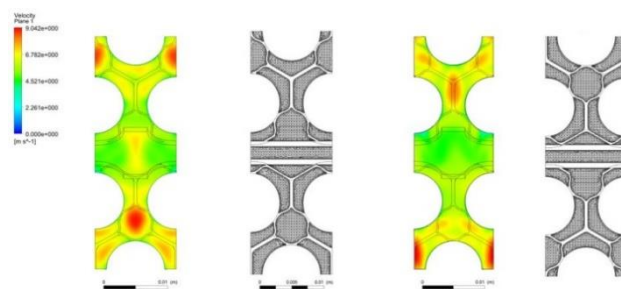
13. ábra: A számításához használt M2 modell felépítésének szemléltetése

A számítást az előző fejezetben bemutatott peremfeltételekkel végeztük. A pálcák felületére közelítő, koszinuszos hőfluxus-eloszlást írtunk elő. A pálcák hőfluxus-eloszlása azonos, és

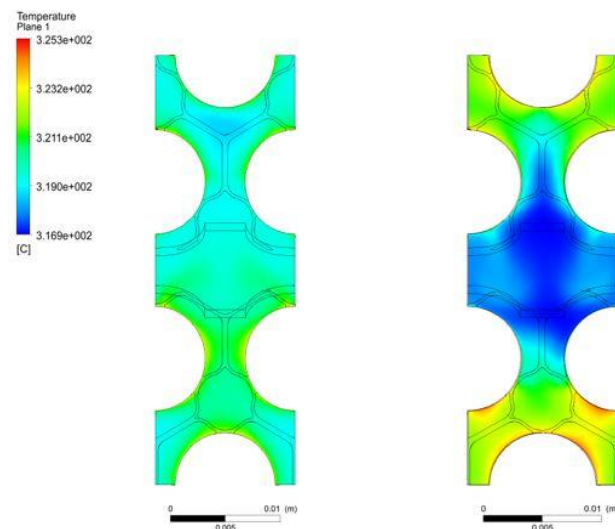
egy teljes pálcá teljesítménye megegyezik a teljes zónára vonatkozó átlagos pálcáteljesítménnyel. A három résszel végzett számítási folyamat egy hetet vett igénybe egy INTEL i7 processzorú, 16 GB RAM-ot tartalmazó számítógépen. A számítás négy szálon futott.

Ahogy említettük, az M2 modell esetében minden második távtartórács orientációját megváltoztattuk 180°-kal, ezáltal megváltoztatva a kazetták közötti átáramlás irányát. A következőkben a tizedik távtartórács után 5D-re hasonlítjuk össze a modellek eredményeit. A tizedik távtartórács a két modellben ellentétes orientációjú, a tizenegyedik távtartórács azonos orientációjú, a következő ábrákon ennek a rácsnak a körvonala látható.

A 14. ábrán megfigyelhető, hogy az M2 modell esetében a sebesség maximum a felső régióban a belső részen, illetve az alsó régió határán alakul ki, 5D távolságra a tizedik távtartórács után. Az M1 modellel számított eloszlás ennek tükörképe a távtartórácsok eltérő elrendezésének megfelelően.



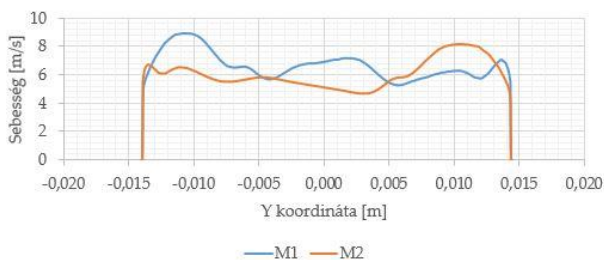
14. ábra: Az M1 és M2 modellel számított sebességeloszlás a tizedik távtartórács után 5D távolságra, illetve a tizedik távtartórács pozíciója



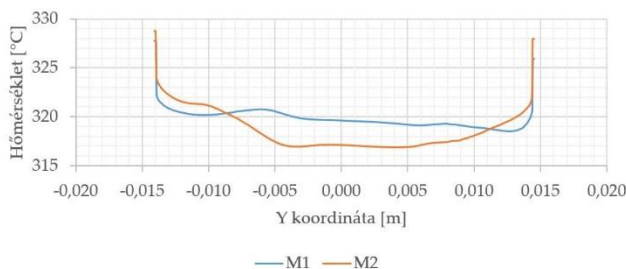
15. ábra: Az M1 és M2 modellel számított hőmérséklet-eloszlás a tizedik távtartórács után 5D távolságra

Az M2 modell esetében a kazetták közötti résben alacsonyabb, míg a pálcák között magasabb a hűtőközeg hőmérséklete (15. ábra). Megfigyelhető, hogy a felső régióból az alsó régióba áramlik át a hidegebb közeg. Mind az alsó, mind a felső régióban az oldalsó pálcák belső részeinél alacsonyabb a közeg hőmérséklete, mint az M1 modell esetén, amelynél a közeg hőmérséklet-eloszlása lényegesen egyenletesebb.

A 16. ábrán látható a sebesség Line1 vonal menti eloszlása a két modell esetében. Az eloszlásokra a korábban leírtak érvényesek. A vonal menti hőmérsékletprofil (17. ábra) jól mutatja, hogy az M2 modellel számított mező nagymértékben eltér a másik modellel számítottól a tizedik távtartórács után 5D távolságra.



16. ábra: Az M1 és M2 modellel számított Line1 vonal menti sebességeloszlás a tizedik távtartórács után 5D távolságra



17. ábra: Az M1 és M2 modellel számított Line1 vonal menti hőmérséklet-eloszlás a tizedik távtartórács után 5D távolságra

A két modellel számított eredmények igazolják a feltevésünket, miszerint a távtartórácsok eltérő elrendezésével a kazetták közötti átáramlás megváltoztatható. Jelen esetben ez úgy valósul meg az M2 kialakításnál, hogy a rács elrendezésétől függően váltakozik az átáramlás iránya. Az

azonos távtartórács orientációjú M1 esetben meg lehet figyelni, hogy a közeg hőmérséklet-eloszlása egyenletesebb a belépéstől távolabb. Ennek oka az lehet, hogy az oldalsó határfelületeken periodikus peremfeltételt alkalmaztunk azonos rács orientáció mellett, így a modellben a felső régióba áramló közeg egy idő után a peremen kilép, majd visszajut az alsó régióba. Ebből kifolyólag célszerűnek tartjuk a számítások sűrűdásmentes fal alsó és felső határoló felülettel történő elvégzését a jövőben.

## Összefoglalás

Jelen munkánkban a VVER-1200 üzemanyag-kazetta perem részében kialakuló termohidraulikai folyamatokat vizsgáltuk. Első lépésben létrehoztunk két különböző távtartórács elrendezésű CFD modellt (szimmetrikus és aszimmetrikus), hogy megvizsgáljuk a rács elrendezés hatását a kazetták közötti hűtőközeg-keveredésre. A valóságot leíró, aszimmetrikus modellt a teljes aktív hosszra kiterjesztettük, illetve építettünk egy további modellt váltakozó orientációjú távtartórácsokkal, melynek célja a kazetták közötti keveredés módosítási lehetőségének vizsgálata volt.

A szimmetrikus és aszimmetrikus modellel végzett számítás megmutatta, hogy a hatékonyabb kazetták közötti hűtőközeg-keveredés biztosításához a távtartórácsoknak eltérő kialakításúnak kell lenniük a szomszédos kazetták pereménél. Az azonos távtartórács orientációjú aktív köteg modellel meg lehet figyelni, hogy az áramló közeg hőmérséklet-eloszlása egyenletesebb. Ennek oka, hogy az alsó-felső határfelületeken periodikus peremfeltételt alkalmaztunk. A folyamat további vizsgálatára számítását végzünk a jövőben sűrűdásmentes fal peremfeltételt alkalmazásával a régiók határain, illetve nagyobb kiterjedésű modellt építünk. A kutatás a jövőben tovább folytatható különböző távtartórács geometriák vizsgálatával.

## Köszönetnyilvánítás

A munka a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alap által támogatott VKSZ\_14-1-2015-0021 azonosító számú projekt keretében zajlott.

## Irodalomjegyzék

- [1] Hogyan készül Paks II? - <http://eszk.org/index.php?l=hu&s=view&p=lecture&lid=219> - Dr. Aszódi Attila előadása - 2015
- [2] MVM Paksi Atomerőmű - Wikipédia  
[https://hu.wikipedia.org/wiki/MVM\\_Paksi\\_Atomer%C5%91m%C5%B1](https://hu.wikipedia.org/wiki/MVM_Paksi_Atomer%C5%91m%C5%B1) - 2016.11.15-ei állapot
- [3] Hogyan készül Paks II? - <http://eszk.org/index.php?l=hu&s=view&p=lecture&lid=219> - Nagy Sándor előadása - 2015
- [4] M. Bukov, A. Shishov, D. Posysaev, O. Kudryavtsev: Investigation of hydrodynamic characteristics of fuel rod bundle (TVS-2M) STAR-CD and ANSYS CFX codes, AER Working Group C and G Joint Meeting, Ráckeve, Hungary, 17-18 May 2007
- [5] S. M. Mousavizadeh, G. R. Ansarifar, M. Talebi: Assessment of the TiO<sub>2</sub>/water nanofluid effects on heat transfer characteristics in VVER-1000 nuclear reactor using CFD modeling, Nuclear Engineering and Technology, Volume 47, Issue 7, 2015
- [6] M. Böttcher: Detailed CFX-5 study of the coolant mixing within the reactor pressure vessel of a VVER-1000 reactor during a non-symmetrical heat-up test, Nuclear Engineering and Design, Volume 238, Issue 3, 2008
- [7] Sárdy G., Tóth S.: Üzemanyag-kazetta perem csatornájában kialakuló áramlás vizsgálata, BME NTI-747/2015 (VKSZ), Budapest, 2015. november 19.