

CFD vizsgálatok az ALLEGRO kerámia kazetta belső szubcsatornájára

Orosz Gergely Imre, Tóth Sándor

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Nukleáris Technikai Intézet
1111 Budapest, Műegyetem rkp. 9.

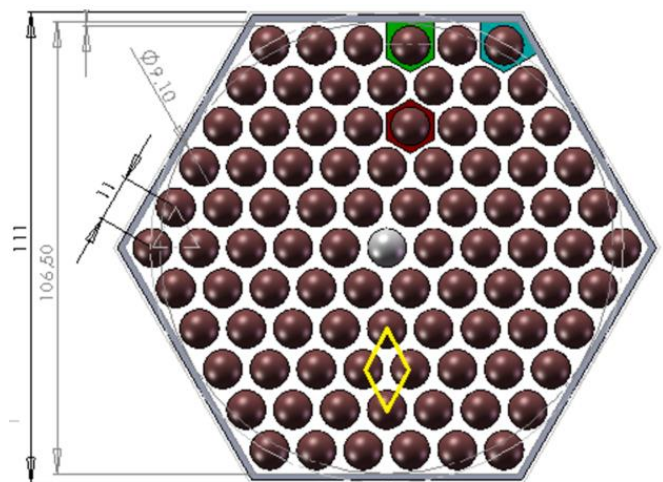
A negyedik generációs reaktorkoncepciók közül az egyik az ún. gázhűtésű gyors reaktor. A típus előnye a gyors neutronspektrum, illetve a zónából kilépő hűtőközeg magas hőmérséklete, amely jobb termikus hatásfokot eredményez a jelenleg üzemelő atomerőművekhez képest. A reaktor energetikai célú fejlesztése érdekében tervezik a 75 MW hőteljesítményű ALLEGRO kísérleti reaktor megépítését. Jelen munkánkban az ALLEGRO kerámia üzemanyag-kazetta két belső szubcsatornájára fejlesztettünk CFD (Computational Fluid Dynamics) modellt az ANSYS CFX kóddal, hogy a kialakuló hőmérsékletviszonyokat vizsgáljuk. Négy különböző felbontású hálót fejlesztettünk egy távtartórács osztás hosszú részre, és vizsgáltuk a hálófelbontás számítási eredményekre gyakorolt hatását. A hálóvizsgálat alapján kiválasztott felbontással építettük meg a teljes hosszúságú pálcaköteg rész modelljét, amellyel a hőmérséklet-eloszlást tanulmányoztuk.

Bevezetés

A negyedik generációs reaktorkoncepciók közül az egyik az ún. gázhűtésű gyors reaktor (GFR, Gas-cooled Fast Reactor). A típus előnye, hogy gyors neutron spektrummal rendelkezik, amely lehetővé teszi az üzemanyag-tenyésztést és a transzmutációt. Továbbá a zónából kilépő hűtőközeg magas hőmérséklete jobb termikus hatásfokot eredményez a jelenleg üzemelő atomerőművekhez képest, illetve olyan alternatív alkalmazásokat is lehetővé tesz, mint a hidrogén-termelés. A jövőben is ilyen, 2400 MW termikus teljesítménnyel rendelkező, villamos energiát termelő GFR atomerőmű megépítését tervezik [1] [2]. A villamos energiát termelő atomerőmű megépítése előtt a reaktor megvalósíthatóságát bizonyítani kell, illetve a szükséges technológiákat ki kell fejleszteni. A fenti célok megvalósítása érdekében egy 75 MW hőteljesítményű kísérleti GFR reaktor építését tervezik 2020 után [3]. A reaktor kezdetben acél burkolatú MOX (Mixed-Oxide) üzemanyagot fog felhasználni, majd áttérnek a magas hőmérsékletnek ellenálló kerámia burkolatú karbid üzemanyagra. A kezdeti zónába bizonyos pozíciókba kísérleti kerámia üzemanyagot lehet helyezni besugárzás és tesztelés céljából. Korábban CFD (Computational Fluid Dynamics) modellt fejlesztettünk a kerámia kazetta hatvanfokos szegmensére, hogy a hűtőközeg hőmérséklet eloszlását vizsgáljuk [4]. Jelen munkánkban a kazetta két belső szubcsatornájára fejlesztettünk nagyobb hálósűrűségű CFD modellt az ANSYS CFX kóddal [5], hogy az azokban kialakuló termohidraulikai folyamatokat részletesebben vizsgáljuk. Négy különböző felbontású hálót hoztunk létre egy távtartórács osztás hosszú részre, és vizsgáltuk a hálófelbontás számítási eredményekre gyakorolt hatását. A hálóvizsgálat alapján kiválasztott felbontással építettük meg a teljes hosszúságú pálcaköteg rész modelljét. A belépő peremfeltételek számításához a szabad szubcsatorna részre is modellt építettünk. A számított eloszlások belépő peremfeltételként történő felhasználásával szimulációt végeztünk az ALLEGRO reaktor kerámia zónájának forró csatornájára.

Az ALLEGRO kerámia kazetta

Az ALLEGRO reaktor kerámia zónájában 87 üzemanyag-kazetta van [3]. Az üzemanyag (U,Pu)C, melyet SiC kompozit kerámia pálcákba helyeznek. A kazetta pálcakötegében 90 darab, 9,1 mm külső átmérőjű üzemanyag-pálca található (1. ábra). A pálcák háromszöggrácsba vannak rendezve, a rácsosztás 11 mm. A pálcák hossza 1350 mm, amelyből 860 mm az aktív hossz. A jelenlegi tervek szerint a pálcákat az aktív hosszban négy darab távtartórács rögzíti, melyek egymástól való távolsága 246 mm. A kazettákat hatszög keresztmetszetű palást határolja. A zónán átáramló hűtőközeg hélium, amelynek tömegárama 36,1 kg/s, nyomása 70 bar, belépő hőmérséklete 400 °C. Jelen munkánkban a pálcaköteg két belső szubcsatornáját vizsgáltuk (1. ábra, sárgával bekeretezve), hogy a bennük kialakuló termohidraulikai viszonyokról képet kapjunk.

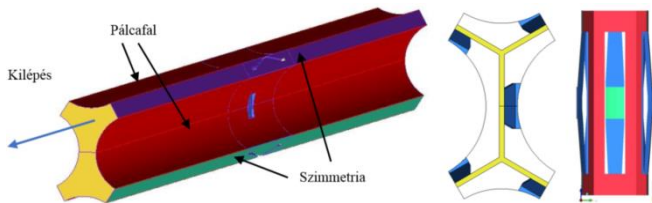


1. ábra: Az ALLEGRO kerámia üzemanyag-kazetta keresztmetszete és a modellezett tartomány [3]

Egy távtartórácsot magába foglaló modellel végzett számítások

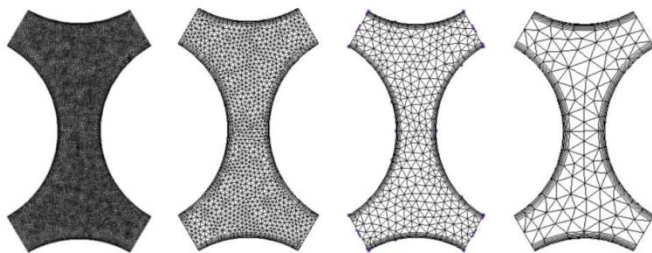
Egy távtartórácsot magába foglaló szubcsatorna CFD modellje

A teljes hosszúságú pálcaköteg modell megépítése érdekében modellt fejlesztettünk a két belső szubcsatorna egy távtartórács osztás (246 mm) hosszú részére (2. ábra). A modell közepén magába foglalja az ALLEGRO kazetta távtartórácsának adott keresztmetszetbe eső részét. A geometriát négy különböző felbontású hibrid hálóval (3. ábra) írtuk le, hogy vizsgáljuk a hálósűrűség számítási eredményekre gyakorolt hatását. A hálók a távtartórács környezetében tetraéder elemeket tartalmaznak, prizma elemekből álló határréteg-hálóval. A tetraédes régió alatt és fölött a szabad pálcaköteg részben prizmatikus elemeket hoztunk létre hexaéder elemekből álló fal rétegekkel. A J1 háló ~19,9; a J2 ~4,8; a J3 ~3,6 és a J4 ~0,8 millió elemből áll.



2. ábra: A szubcsatorna és a távtartórács rész geometriai modellje

A modell alsó felületén belépés peremfeltételt adtuk meg, és előírtuk a sebesség, illetve a turbulens jellemzők eloszlását szabad pálcakötegre végzett külön számítások eredményei alapján. A felső felületen kilépés peremfeltételt definiáltunk 0 Pa relatív nyomással. A referencianyomás értéke a rendszer üzemi nyomásával egyezett meg (70 bar). A párhuzamos oldalsó falakat periodikus interface-szel kapcsoltuk össze, hogy figyelembe vegyük a szomszédos kötegrészek hatását. A távtartórács és a pálcák falát csúszásmentes, sima falként modelleztük. A hélium hűtőközeg jellemzőit üzemi nyomásra (70 bar) és a zóna belépő hőmérsékletére (400 °C) vonatkoztattuk. A számításokhoz a BSL Reynolds-feszültség turbulenciamodelt alkalmaztuk.

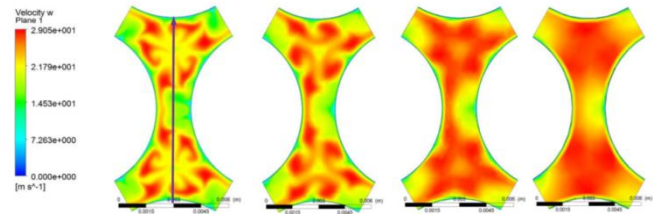


3. ábra: Egy távtartórácsot tartalmazó geometria hálói (J1, J2, J3, J4) a kilépő síkon

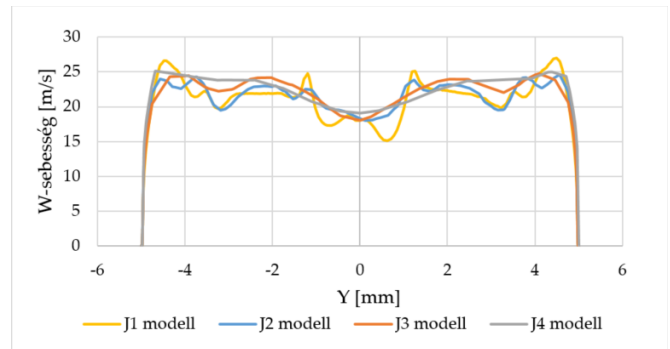
A hálózérékenység-vizsgálat eredményei

A négy különböző felbontású hálóval ugyanolyan peremfeltételek mellett számításokat végeztünk. A 4. ábra az axiális sebesség keresztmetszeti, az 5. ábra vonal menti eloszlását mutatja 1D távolságra a rács mögött. Látható, hogy a hálófelbontás jelentősen befolyásolja az eredményeket közvetlenül a rács mögött. A legdurvább háló (J4) jellegre is rossz eredményt adott. A háló finomításával az áramlás egyre finomabb struktúrája kerül felbontásra. A J1 és a J2 hálón

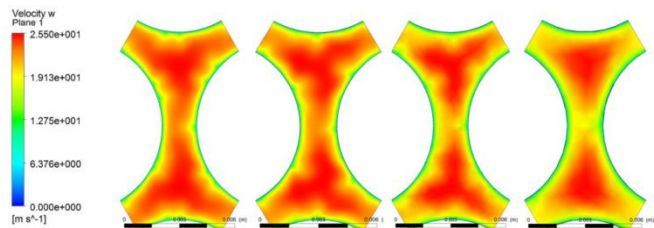
számított eredmény kevésbé tér el, mint a J2 és a J3 hálón számított. Az előbb tárgyalt jellemzőt 10D távolságra a rácsról a 6. és 7. ábrák mutatják. Az axiális sebesség eloszlását kevésbé befolyásolja a hálófelbontás, mint 1D távolságra, azok jellegre jól egyeznek.



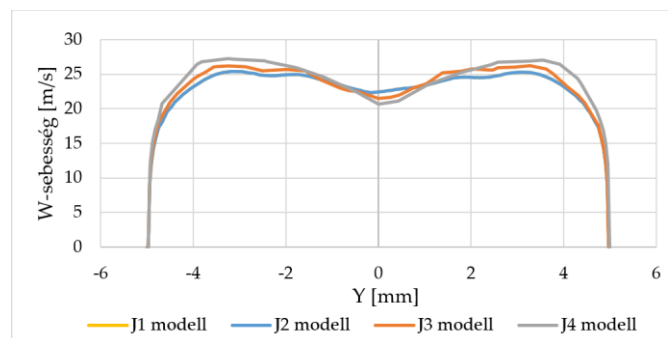
4. ábra: Axiális sebesség eloszlása a távtartórács mögött 1D távolságra a különböző hálókön (J1, J2, J3, J4) számítva



5. ábra: Sebességprofilok a 4. ábrán látható vonal mentén 1D távolságra a távtartórács mögött különböző hálókön számítva



6. ábra: Axiális sebesség eloszlása a távtartórács mögött 10D távolságra a különböző hálókön (J1, J2, J3, J4) számítva



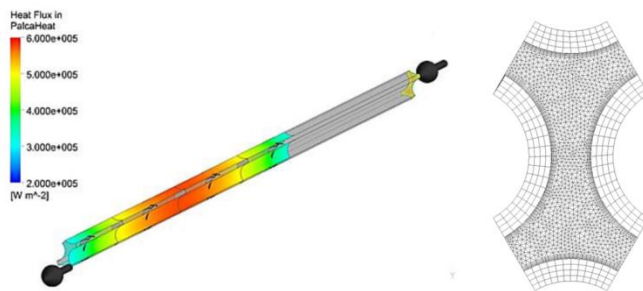
7. ábra: Sebességprofilok a 4. ábrán látható vonal mentén 10D távolságra a távtartórács mögött különböző hálókön számítva

A CFD számítás eredményéből kiértékeljük a távtartórács nyomásesését, és ellenőrzésként a Rehme-korreláció [6] segítségével is meghatároztuk azt. Mind a négy háló esetén jó egyezés van a CFD számítás és a korreláció eredménye között. A legkisebb eltérés (J1 ~2%, J2 ~4%) a legfinomabb háló esetén adódott. A további számításokhoz a J2 jelű hálót választottuk, mivel kezelhető számítógépi erőforrásigény mellett elfogadhatóan pontos eredményt ad.

A teljes hosszúságú pálcaköteg modellel végzett számítások

A teljes hosszúságú pálcaköteg CFD modellje

A teljes hosszúságú pálcakötegben kialakuló termohidraulikai folyamatok vizsgálata céljából további modellt fejlesztettünk. A modell magába foglalja a 860 mm hosszú aktív és az előtte levő 490 mm hosszú inaktív pálca szakaszokat (8. ábra), továbbá a SiC anyagból álló pálcaburkolatot. Vizsgáltuk az eredmények eltérését a pálcaburkolatot tartalmazó és azt nem tartalmazó modellek között a pálcaburkolat hővezetésének figyelembevételével. A modellünkben az aktív szakaszon négy távtartórács található. A modell felépítéséhez a J2 jelű hálót választottuk a hálózvizsgálat eredményei alapján. A pálcaburkolatot hexaédres hálóval írtuk le. A modell peremfeltételei részben megegyeznek a 246 mm hosszú modell peremfeltételeivel (3.1.), így csak az eltéréseket ismertetjük. A pálcák aktív részére hőfluxus profilt [4] adtunk meg. A kötegbe belépő közeg hőmérsékletére 400 °C-t írtunk elő. A hélium hűtőközeg fajhőjét állandó értékűnek vettük (5195 [J/kgK]). Sűrűségét, dinamikai viszkozitását és hővezetési tényezőjét [7] a hőmérséklet függvényében polinomokkal adtuk meg. A SiC pálcaburkolat sűrűségét állandónak (2600 kg/m³) tekintettük, fajhőjét és hővezetési tényezőjét a hőmérséklet függvényében polinomokkal írtuk elő.

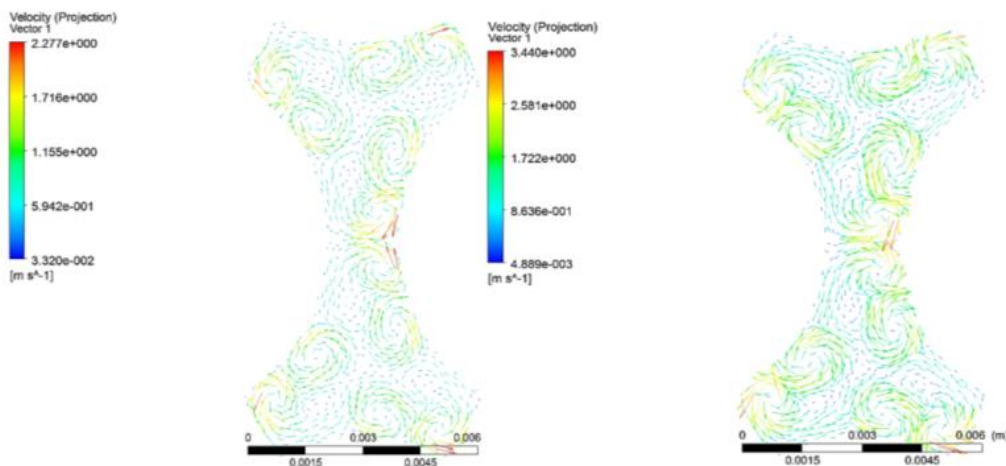


8. ábra: A teljes pálcaköteg CFD modellje

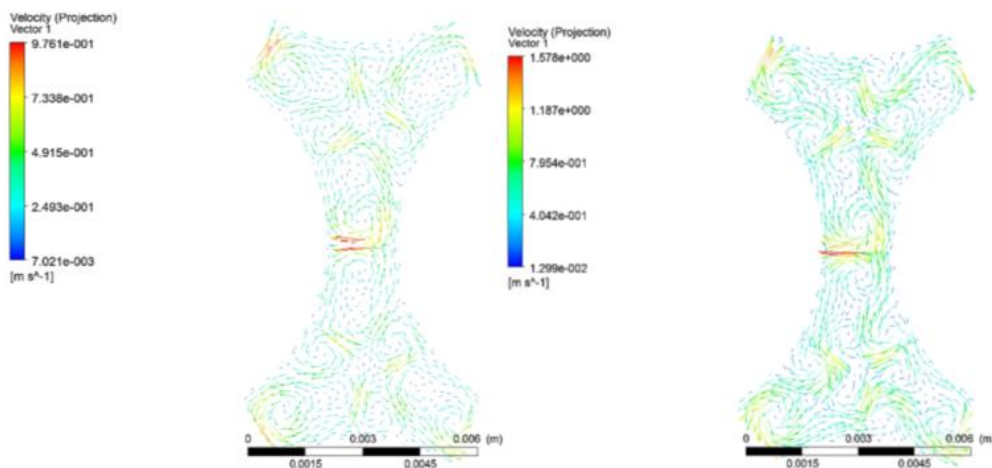
A teljes hosszúságú pálcaköteg modellel végzett számítások eredményei

A távtartórácsok után azonos távolságokban a kialakuló áramképek jellege azonos, megegyezik a korábban bemutatottakkal (4., 6. ábra, J2 háló). A közeg átlagsebessége a csatorna hossza mentén folyamatosan növekszik a felmelegedésből adódó sűrűségcsökkenés következtében. A kilépési keresztmetszetben a közeg átlagos sebessége 38,5 m/s, míg maximális értékét az utolsó távtartórácsnál éri el (50 m/s). A kötegben kialakuló keresztáramlásokat a 9. ábra mutatja az 1. és 4. távtartórács mögött 1D és 5D távolságra.

1D

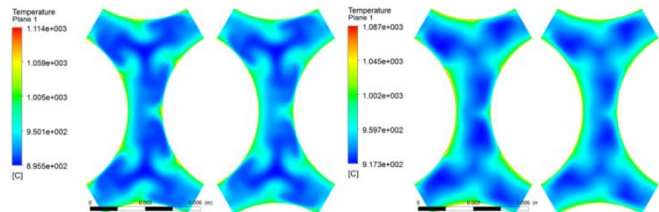


5D



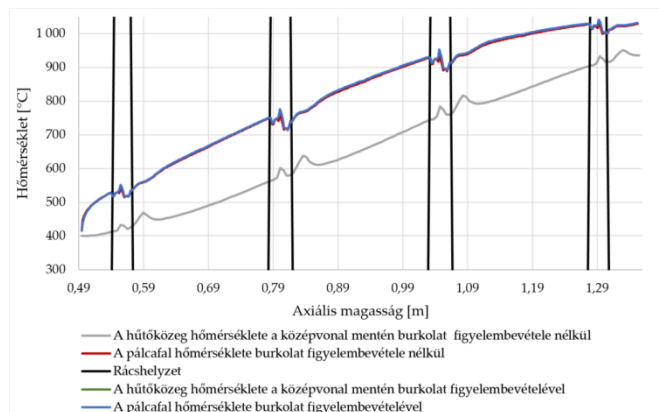
9. ábra: Keresztáramlások az 1. és 4. távtartórács mögött 1D és 5D távolságra

A távtartórács hatására a keresztáramlások struktúrája teljesen átrendeződik a szabad pálcakötegben kialakulóhoz képest, és a hűtőközeg-keveredés intenzitása is növekszik. A rácsból távolodva az áramlás struktúrája változik, és a keveredés intenzitása is csökken. Az axiális sebességeloszláshoz hasonlóan a keresztáramlások struktúrája a távtartórácsok mögött azonos távolságokban jól egyezik.



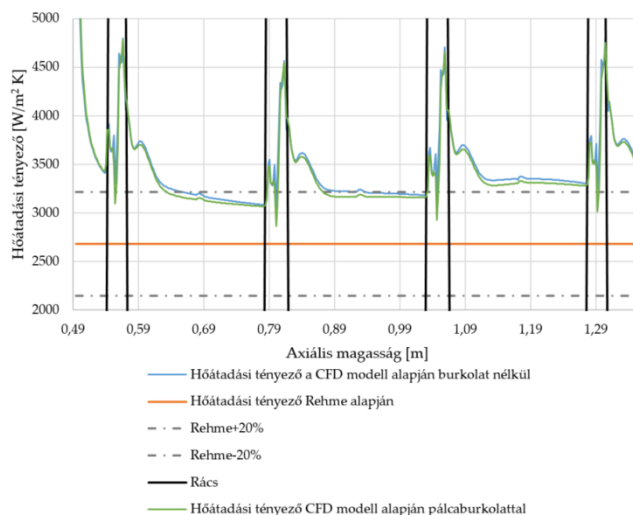
10. ábra: Keresztmetszeti hőmérséklet-eloszlás a negyedik távtartórács után 1D és 5D távolságban a pálcaburkolat nélkül és a pálcaburkolattal számított esetben

A közeg hőmérséklete alacsonyabb a csatornák belső részén. A fal felé haladva a hőmérséklet növekszik, az alacsonyabb sebességű zónákban értéke magasabb. A bemutatott mezők esetén szubcsatornánként három forróbb régió alakul ki. Azonos távolságokra a rácsoktól az eloszlások jellege azonos. Megfigyelhető a pálcaburkolatban történő hővezetés hatása a hűtőközeg hőmérséklet eloszlására. A burkolat hővezetésének hatására a fali hőmérséklet maximum értéke 1141,2°C-ról 1103,7°C-ra csökken. Ez a változás a kazetta sarok pálcáját vizsgálva jelentősebb [4].



11. ábra: A hűtőközeg hőmérséklete a fal és a középvonal mentén

Az 11. ábrán a csatorna középvonalában és a pálcafal mentén az adott magasságban lévő átlagos hőmérsékletek láthatóak. A hűtőközeg és a pálcafal hőmérséklete a távtartórácsok környezetétől eltekintve folyamatosan növekszik a köteg hossza mentén. A pálcaburkolat hőmérséklete a távtartórácsok okozta áramlási viszonyok következtében a rácsoknál lokálisan alacsonyabb. Ezzel szemben a középvonal mentén a rácsoknál és közvetlenül a rácsok után magasabb hőmérsékletű hűtőközeg áramlik. A fűtőelem-burkolatot tartalmazó modell esetében a hőmérséklet azimutális eloszlása egyenletesebb, mint a burkolat nélküli esetben. Az átlagos fali hőmérséklet a burkolatot tartalmazó és a burkolatot nem tartalmazó esetben nem különbözik lényegesen (eltérés ~2,7 °C).



12. ábra: A hőátadási tényező változása a hossz mentén

A hőmérséklet különbségekből és a hőfluxus értékekből kiszámítottuk a hőátadási tényező hossz menti változását (12. ábra.) Minden távtartórácsnál és közvetlenül azok mögött egy-egy csúcs figyelhető meg a tényező értékében. Az első csúcsot a közeg megnövekedett áramlási sebessége, a másodikat az intenzívebb hűtőközeg-keveredés okozza.

A pálcaburkolatot tartalmazó esetben a számított hőátadási tényező értéke kissé alacsonyabb (kb. 1,6 százalékkal), mint a burkolat nélküliben. A CFD modellel számított hőátadási tényezőt összevetettük a Rehme hőátadási korrelációval [6] számított eredménnyel. A CFD kóddal számított hőátadási tényező a „zavartalan” áramlás szakaszaiban jól egyezik a Rehme-formula eredményével. A távtartórácsok környezetében az értékek jobban eltérnek, mint ±20%, a rács áramlásra gyakorolt hatása miatt.

Összefoglalás

Jelen munkánkban az ALLEGRO reaktor kerámia kazettájának két belső szubcsatornájára fejlesztettünk CFD modellt. A vizsgálatokhoz szükséges peremfeltételek meghatározása céljából először a szabad pálcakötegben kialakuló áramlást modelleztünk. A teljes hosszúságú pálcaköteg modell megépítése céljából egy távtartórács osztás hosszúságú modellt fejlesztettünk, amely magába foglalja a távtartórács adott szegmensét. A modellel hálózéképes vizsgálatot végeztünk, amely megmutatta, hogy melyik hálósűrűséget célszerű választani a további szimulációkhoz. A különböző hálókkal számított távtartórács nyomásesések jó egyezésben vannak a Rehme-korreláció eredményével. A hálózéképes vizsgálat alapján kiválasztott hálózékkal megépítettük a teljes hosszúságú pálcaköteg rész modelljét. A számítások rámutattak, hogy a távtartórácsoknak szignifikáns hatása van a sebesség-, ebből következően a hőmérséklet-eloszlásra. A számítási eredményekből kiértékeljük a hőátadási tényezőt. A „zavartalan” áramlás tartományában a CFD kóddal számított hőátadási tényező jól egyezik a Rehme hőátadási korreláció eredményével. A jövőben tovább folytatjuk a kutatást a pálcaköteg sarok csatornájának részletes 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] P. Richard, Y. Péneliau and M. Zabiégo: *Reference GFR 2400 MWth core definition at start of GOFASTR, GoFastR-DEL-1.1-01, CEA, Cadarache, France, 2010*
- [2] R. Stainsby, K. Peers, C. Mitchell, C. Poette, K. Mikityuk and J. Somers: *Gas cooled fast reactor research in Europe, Nuclear Engineering and Design, 241, 3481-3489, 2011*
- [3] C. Poette, F. Morin, V. Brun-Magaud and J.F. Pignatel: *ALLEGRO 75 MW cores definition at start of GOFASTR, GoFastR-DEL-1.2-01, CEA, Cadarache, France, 2010*
- [4] S. Tóth, B. Kiss, E. Gyuricza and A. Aszódi: *CFD investigation of ALLEGRO fuel assemblies, The 15th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal - Hydraulics, NURETH-15, Pisa, Italy, May 12-17, 2013*
- [5] ANSYS Inc.: *ANSYS CFX - solver modeling guide, 2012*
- [6] N. E. Todreas and M. S. Kazimi: *Thermal hydraulic fundamentals, Taylor and Francis, 1990*
- [7] H. Petersen: *The properties of Helium: density, specific heats, viscosity, and thermal conductivity at pressures from 1 to 100 bar and from room temperature to about 1800 K, September, 1970*