

Az SCWR-FQT tesztszakasz be- és kilépő részének CFD analízise

Kiss Attila, Vágó Tamás, Aszódi Attila

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Nukleáris Technikai Intézet
1111 Budapest, Műegyetem rkp. 9. tel.: +36 1 463 1997

Az SCWR-FQT (Supercritical Pressure Water Cooled Reactor-Fuel Qualification Test) projekt egy 2010-ben meghirdetett és elnyert Európai Unió FP7-es kutatási projekt, amelyben 6 európai partner (köztük a BME NTI) dolgozik együtt. A projekt célja egy tesztkör megtervezése és a tervek korszerű elemző kódokkal való analízise. A tesztkör a Prága melletti Řež -i kutatóintézet (CVR) LVR-15-ös reaktorába kerülne elhelyezésre 2015 után. Az analíziseknek olyan részletességűeknek kell lenniük, hogy a cseh nukleáris hatóságnál történő majdani engedélyeztetési folyamatot is megalapozzák. Maga a teszt kör egy primer körből és egy-egy szekunder és tercier körből valamint kiegészítő berendezésekből áll. A primer kör lényegi része, az úgynevezett aktív csatorna az LVR-15-ös reaktor egyik kazettája helyére kerül majd. Az aktív csatorna függőleges orientációjú, cső a csőben elrendezésű elem két-két felfelé és lefelé áramló huzammal. Az utolsó felfelé áramló huzam elején (alul) található a 680 mm magas tesztszakasz, fölötté egy 4,2 m magas ellenáramú hőcserélő (rekuperátor), majd a hűtő fokozat következik az aktív csatornából való kilépés előtt. Az aktív csatornában áramló közeg nyomása 25 MPa, hőmérséklete pedig 280°C-500°C között változik.

A tesztszakaszban 4 darab 7 mm belső és 8 mm külső átmérőjű 600 mm aktív hosszú nukleáris üzemanyag fog helyet kapni, amelyeket axiális irányban alul és fölül egy-egy távtartó elem biztosít. Minden egyes pálcza köré egy-egy úgynevezett helikális távtartót (wrapped wire spacer) tekernek majd, ami a radiális irányú távtartáson túl kiváló hűtőközeg keveredést okoz a tesztszakaszban.

A BME NTI egyik feladata a tesztszakasz be- és kilépő geometriájának optimalizálása annak érdekében, hogy stabil és homogén belépő és megfelelő keveredést mutató kilépő áramképet biztosítsunk a majdani kísérletek során.

Az SCWR és hűtőközegének termohidraulikai tulajdonságai

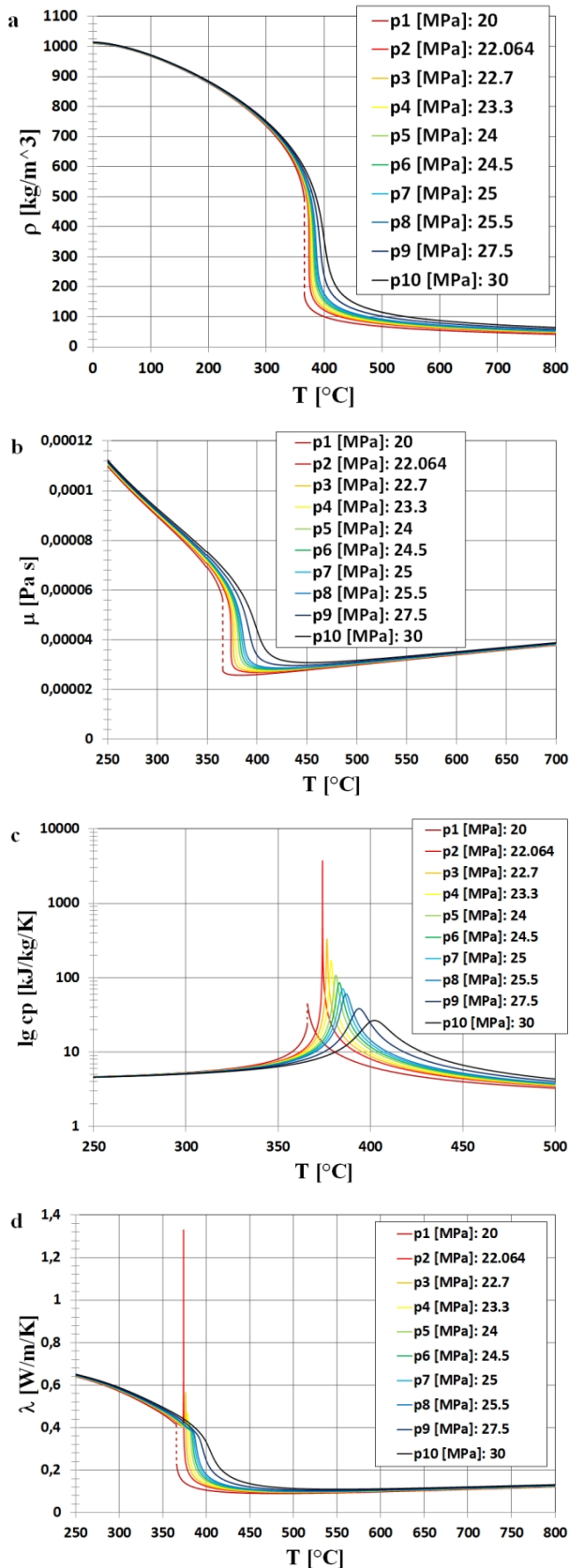
Amerikai kezdeményezésre megalapították 2000-ben a Generation IV International Forum (GIF) szervezetet. Az alapítók célja olyan negyedik generációs nukleáris rendszerek kifejlesztése volt, ami növeli az atomenergia felhasználás széleskörű elterjedését. Ehhez közel két éves egyeztetések során megfogalmazták a fő fejlesztési célokat és kiválasztották azt a hat reaktorkoncepciót a száz megvizsgált közül, amelyek elképzelésük szerint 2030-ra kereskedelmi forgalomba fognak kerülni [1]. A kiválasztott hat reaktorkoncepció egyike az SCWR (Supercritical pressure Water Cooled Reactor), ami egy könnyűvízhűtésű reaktor [2], amely hűtőközegének nyomása a termodinamikai kritikus nyomás ($p_{kr}=22,064$ MPa) feletti üzem közben.

A fosszilis tüzelőanyaggal üzemelő erőművekben alkalmazták először a kritikus pont közeli vagy azt meghaladó nyomású hőhordozó közeget. Mind a Szovjetunióban mind pedig az Egyesült Államokban az 1950-es években indult fejlődésnek ez a technológia. Azért kezdték el alkalmazni a szuperkritikus nyomású vizet (supercritical pressure water, SCW) hűtőközeggé, mert így jelentősen növelhető a rendszer hatásfoka. Az SCWR nagyban hasonlít a már használatban lévő szuperkritikus nyomású fosszilis

üzemanyaggal működő erőművekre, továbbá a nyomottvízes (PWR) és forralóvízes (BWR) atóerőművi blokkokra. Néhány különbség azonban felfedezhető. A PWR-től abban különbözik, hogy egy hurkos rendszerről van szó. Mivel kritikus nyomás feletti a közeg nyomása, így fázisátalakulás nem fordul elő a turbináig, így külön gőzfejlesztőre sincs szükség. A BWR-ben használatos gőzszeparátorokra és szárítókra, továbbá recirkulációs rendszerre sincs szükség, a szabályzó- és biztonságvédelmi rudakat a reaktortartály tetejéről vezetik be a zónába.

A koncepciók tulajdonságait alapvetően meghatározzák a kritikus, pszeudokritikus pont környékén tapasztalt jelenségek [3]. A kritikus nyomású (22,064 MPa) víz anyagjellemzői nagymértékű nemlineáris változáson mennek keresztül a kritikus hőmérsékleten áthaladva. A víz ekkor egy cseppfolyós (liquid-like) közegekre jellemző állapotból egy légnemű (gas-like) közegekre jellemző állapotba kerül át. Ezt az átmenetet kritikus átalakulásnak hívják. Ha a közeg nyomása magasabb, mint a kritikus érték, akkor is lejátszódik ez az átmenet, csak a nyomás értékétől függő, a kritikus hőmérsékletnél magasabb hőmérsékleten, amit pszeudokritikus hőmérsékletnek neveznek, az átmenetet ekkor pedig pszeudokritikus átalakulásnak hívják. Ekkor is jelentős az anyagjellemzők nemlineáris változásának mértéke, de kisebb, mint kritikus nyomáson. Az 1. ábrán láthatóak a víz anyagjel-

lemzőinek változása egy szubkritikus (20 MPa), kritikus és pszeudokritikus nyomásokon.



1. ábra: A víz termohidraulikai anyagjellemzőinek változása szubkritikus (20 MPa), kritikus (22,064 MPa) és szuperkritikus (22,7-30 MPa) nyomásokon: **a.**, sűrűség, **b.**, dinamikai viszkozitás, **c.**, izobár fajhő, **d.**, hővezetési tényező [4]

Ahogy az 1. ábrán látható a sűrűség monoton csökken, a dinamikai viszkozitás és hővezetési tényező csökken, majd egy minimum érték elérése után nő a hőmérséklet növekedésével, a fajhő pedig egy lokális csúcst mutat a pszeudokritikus hőmérsékletnél. Ezen kívül forrás, mint elsődrendű fázisátalakulás jelei sem mutatkoznak meg a kritikus pont felett. A pszeudokritikus pontnál (pl. 25 MPa esetén $\sim 385^\circ\text{C}$) hatékonyan lehet elvonni a hőt a fajhő lokális csúcsa miatt. Az entalpiakülönbség a pszeudokritikus pont alatti és feletti víz között akkora, hogy meglehetősen sok hőt lehet elvonni viszonylag alacsony hűtőközeg tömegárammal, miközben mérsékelt emelkedik a közeg hőmérséklete ($\sim 40^\circ\text{C}$) a pszeudokritikus átalakulás során. A pszeudokritikus pont környezetében az anyagjellemzők meredek változása a tömegfluxushoz viszonyítva kellően magas hőfluxus érték esetén a hőátadási tényező elfajulásához vezet, amelynek pontos oka, fizikai magyarázata nem tisztázott, ez jelenleg is sokat kutatott terület (lásd pl. [4]). A hőátadási tényező elfajulását - ami fali hőmérséklet csúcspontokat eredményezhet - mennyiségileg minden esetben pontosan még nem tudják számolni a rendelkezésre álló CFD kódok. A fali hőmérsékletek és a hőátadási tényező eloszlásának alakját jól visszaadják viszont, tehát minőségileg kiszámolható az elfajulás jelensége.

Az SCWR-FQT projekt

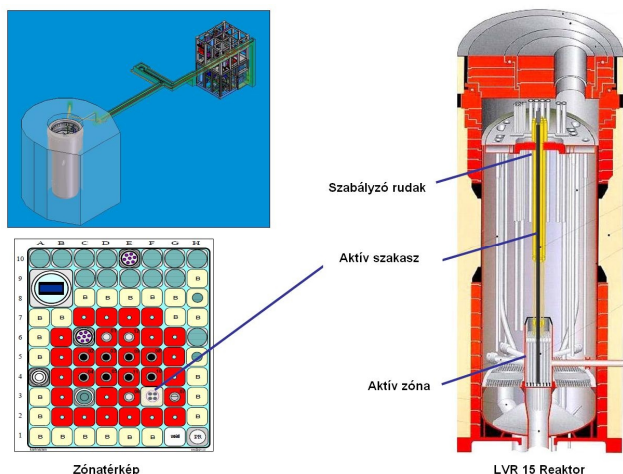
Európai kutatások is folynak az SCWR koncepció megvalósítása terén. Az európai koncepció High Performance Light Water Reactor (HPLWR) néven ismeretes [5]. Az európai HPLWR koncepció alapvetően különbözik az eredeti SCWR koncepciótól abban, hogy három párhuzamos huzamot alakítottak ki az aktív zónában, miután kiderült ([5]), hogy egy huzamban nem lehetséges felmelegíteni az eredeti tervek alapján 280°C -ról 500°C -ra a hűtőközeget. Az SCWR-FQT projekt az európai HPLWR Phase 2 projekthez kapcsolódó üzemanyag minősítési teszt, ami az Európai Unió és Kína együttműködésében valósul meg. Fókuszában egy olyan berendezés tervezése áll, melynek segítségével a szuperkritikus nyomású vízű hűtésű reaktorkoncepcióhoz végezhetnek üzemanyagkazetta-minősítő tesztek. A berendezés a Řež-ben található cseh kutatóintézet (CVR) LVR-15 típusú kutatóreaktorában fog majd üzemelni. A BME NTI feladatai a normál üzemiállapot vizsgálatához tartoznak. Ezen vizsgálatok keretében a tesztkazetta azon részének a geometriai optimalizációja folyik, ahol a be- és kiáramlás történik. CFD kód segítségével vizsgáljuk a stabil és homogén áramlási eloszlásokat (sebesség, nyomás, turbulencia) a belépésnél és a kazettán belül. Tervezési cél a szubcsatornák közötti minél homogénebb hőmérséklet-eloszlást eredményező keveredés biztosítása, különösen a kilépő keresztmetszet közelében. A tesztkazettán belüli ki- és beáramlásnál tapasztalható jelenségeken túl a tesztkazetta fölött lévő rekuperátor fokozat-, mint ellenáramú hőcserélő CFD számításait is a BME NTI végzi (a rekuperátor vizsgálata nem képezi e cikk tárgyát). Az elemzések elvégzéséhez az ANSYS CFX 13.0 numerikus áramlástan szoftver került felhasználásra.

A HPLWR kísérleti kazetta és annak CFD modellje

A projekt végcélja, hogy a csehországi CVR kutatóintézet LVR-15 típusú kutatóreaktorának egy kazettája helyébe egy szuperkritikus nyomású vízzel hűtött kazettát modellező

teszthurkot helyezzenek, melynek feladata az SCWR megvalósításához hozzájáruló megelőző kísérletek elvégzése, a HPLWR kazettatervei működőképességének demonstrálása. Magában a projektben a megvalósítani kívánt berendezés létesítési engedélyéhez szükséges tervezési és biztonsági elemzéseket végzik el. Az LVR-15 (lásd 2. ábra) egy könnyűvízhűtésű kutatóreaktor, melynek termikus teljesítménye 10 MW. E reaktorban főként anyagvizsgálati kutatásokat folytatnak. E célból került kiépítésre 5 vízkör és számos besugárzó csatorna is. A vízkörökben szimulálni tudják az üzemi hőmérsékletet, nyomást, dózisoskat és vízkémiát.

A BME NTI két fő feladatot kapott a projektben. Az első a rekuperátor szakasz CFD analízise, amivel e cikk keretében nem foglalkozunk. A másik a teszt szakasz (más néven az üzemanyag kazetta, lásd 3-4. ábra) be- és kilépő szakaszának a CFD analízise és szükség esetén geometriájának optimalizációja. A belépő szakaszon időben stabil és homogén áramképet, míg a kilépő szakaszon megfelelő keveredést és homogén hőmérsékletmezőt kell biztosítani. A 2. ábra mutatja a teszthurok tervezett helyét a reaktor aktív zónájában. A tervezett kísérleti berendezés kialakításában hasonlít egy atomerőműre. Van primer-, szekunder- és terciér köre, el van látva biztonsági rendszerekkel, víztisztító rendszerrel és online mérő rendszerekkel.

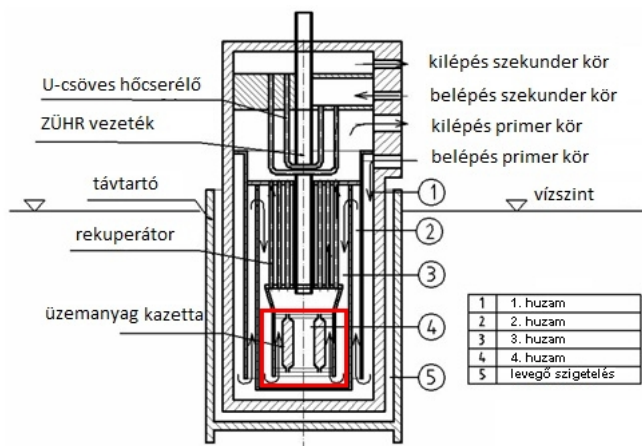


2. ábra: Az LVR 15 reaktor (jobbra), zónatérképe (bal lent) a hurok tervezett pozíciójával a zónában és a hurok elhelyezkedése a reaktortömbhöz képest (bal fent) [6]

A primer körben áramló szuperkritikus állapotú közeg fogja hűteni a négy nukleáris üzemanyagpálcából álló üzemanyagkazetta-modellt (lásd 3. ábra).

Ehhez kapcsolódik egy speciális csőköteggel a teszthurok még a reaktorban - de több méterrel az aktív zóna felett - elhelyezkedő részén a szekunder oldalt szimbolizáló hűtőkör. A primer körből különböző megcsapolási pontokon keresztül vezetik el a hűtőközeg egy részét a víztisztító és mintavételi rendszerhez. A tervek szerint normál üzemállapotban 300°C-os hőmérsékleten, 25 MPa nyomáson és 0,253 kg/s tömegárammal fog belépni a hűtőközeg a teszthurokba. Az aktív zónából (a tesztkazetta kilépésénél) kilépve 383°C-os hőmérsékletet ér el a szuperkritikus nyomású hűtőközeg. Az ebben a cikkben bemutatásra kerülő vizsgálatok az aktív szakaszra korlátozódtak, ezért annak felépítése kerül részletezésre a továbbiakban.

Az aktív szakasz felépítése viszonylag bonyolult. Belépés után a közeg az aktív szakasz csöveinek a hengerpalástjai között áramolva háromszor 180°-os irányváltáson megy keresztül. A 3. ábrán látható az áramlási utak sematikus rajza.



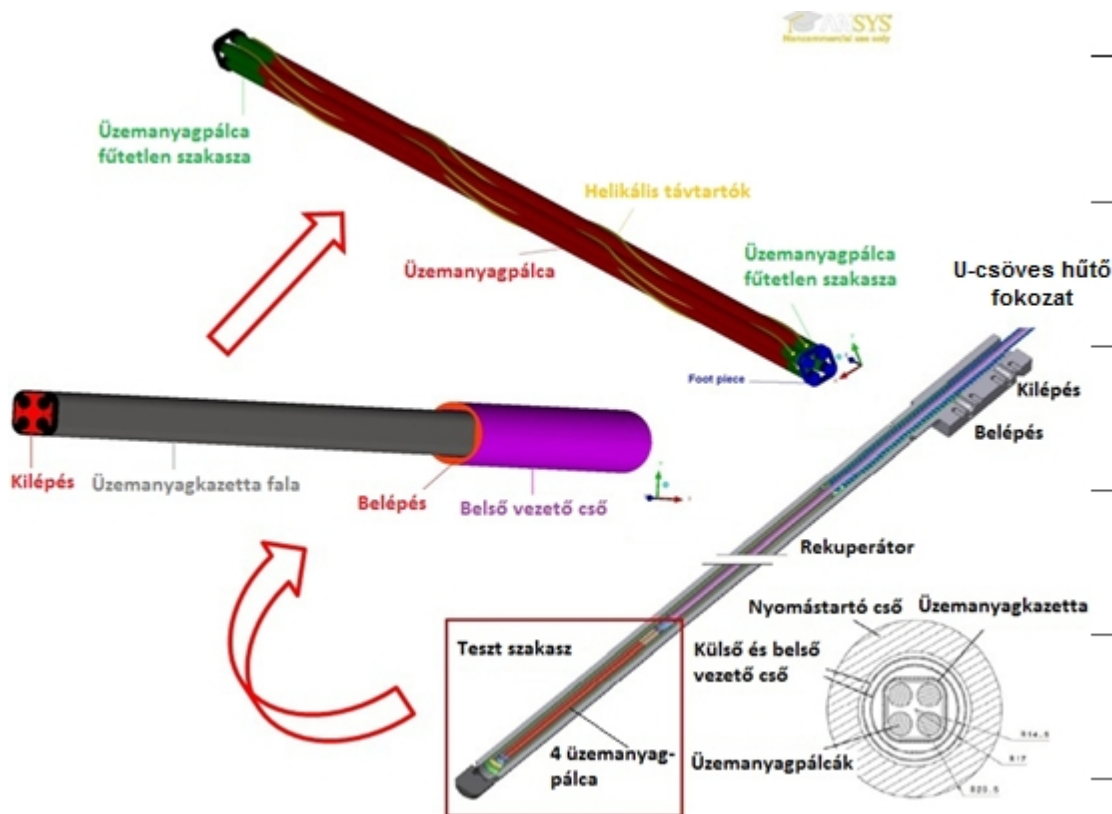
3. ábra: Az aktív szakasz sematikus rajza az áramlási irányokkal feltüntetve [6]

Maga az aktív szakasz függőleges orientációjú, cső a csőben elrendezésű elem két-két felfelé és lefelé áramló huzammal. Az utolsó felfelé áramló huzam elején (alul) található a 680 mm magas teszt szakasz (üzemanyag kazetta), fölötté egy 4,2 m magas ellenáramú hőcserélő (rekuperátor), majd a hűtő fokozat következik az aktív csatornából való kilépés előtt. A teszt szakaszban 4 darab 600 mm aktív hosszú nukleáris üzemanyag fog helyet kapni (burkolatának belső átmérője 7 mm, külső átmérője 8 mm), amelyeket alul és fölül egy-egy távtartó elem biztosít (lásd a 4. ábrán).

A jelen cikkben ismertetett CFD modell geometriája nem tartalmazza a teljes aktív szakaszt, csupán a modellezett jelenség (a teszt kazetta be- és kilépési effektusai) szempontjából lényeges részeit (lásd a 3. ábrán piros kerettel jelölve). Ezért a geometriai modell egyes elemei magyarázatra szorulnak. A belső vezetőcső (a 3. huzam külső határoló palástja a 3. ábrán) elem hosszúsága 200 mm (lásd 4. ábra „Belső vezető cső” elem), ami eredetileg jóval hosszabb volt.

A szakirodalom 20-50 egyenérték átmérőnyi hosszúságot ajánl a kialakult áramlás létrehozásához. Jelen esetben az egyenértékű átmérő 5,19 mm, így a 200 mm-es hosszal felvett közel 40 egyenérték átmérőnyi távolság megfelelő a belső vezető cső és a kazettamodell fala között kialakult áramlási profil eléréséhez a belépés után.

A geometria egyik legérdekesebb eleme a helikális távtartó („wrapped wire spacer”), amely a 4. ábrán látható az üzemanyagpálcák köré csavarva. A helikális távtartók hozzá vannak hegesztve az üzemanyagpálcák elejéhez és végéhez. A pálcá - helikális távtartó közötti melegedés hatására bekövetkező hosszváltozás-különbséget rugók veszik majd fel. Azt várják ettől a helikális távtartós kialakítástól, hogy az növeli a keveredést a teszt kazetta (és majdan a HPLWR kazetta) egyes szubcsatornái között, elősegítve a homogénebb hőmérséklet-eloszlást és javítva a hőátadást úgy, hogy a kazettába belépő közegnek a főáramlás sebességkomponensére merőleges komponenseket ad és erősíti az áramlás turbulens jellegét.



4. ábra: A vizsgált szakasz és a CFD modell geometriája

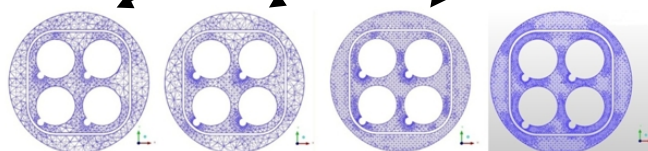
Hálófüggetlenségi vizsgálat

A projekt feladatainak elvégzését megelőzően szükség volt a hálófüggetlenségi vizsgálat elvégzésére, melynek során a numerikus rács finomításával és úgynevezett célparaméterek (lásd [7]) monitorozásával kiválasztható az optimális rácssűrűség. A kiválasztás során figyelembe kell venni, hogy elegendően sűrű legyen a numerikus rács ahhoz, hogy a vizsgált térfogatot megfelelő részletességgel fel lehessen bontani, de ne legyen indokolatlanul sűrű. Erre azért volt szükség, mert a rács csomópontszáma (nódusszáma) és a számítható szükséges memóriaigény közel lineáris kapcsolatban van egymással. Továbbá azt is figyelembe kellett venni, hogy a vizsgálat során a legsűrűbb rács esetén is, belátható időn belül elvégezhető legyen a számítás. A rácsfüggetlenségi vizsgálatok során bevett szokás, hogy a rács sűrűségét az előző rácshoz képest megközelítőleg a duplájára növelik (lásd 5. ábra és [7]). Ezen iránymutatások alapján készültek el a numerikus rácsok.

A numerikus rácsok strukturálatlan tetraédes elemekből állnak a határretegben lejátszódó folyamatok részletezésére pedig prizmatikus határreteg hálóval kiegészülve. Fontos megjegyezni, hogy nem minden felület kapott prizmatikus határreteg hálót, mert emiatt drasztikusan megnőtt volna a numerikus rács mérete. Csak a vizsgált jelenségek szempontjából jelentős felületek (üzemanyag-pálca fűtött és fűtetlen külső-, helikális távtartó külső- és az alsó-felső távtartók külső felülete) lettek ellátva prizmatikus határreteg ráccsal.

A teszt szakasz CFD modelljének különböző kezdeti- és peremfeltételei vannak. A peremfeltételeket a projektben résztvevő német kollégák biztosították. Az FQT teljes APROS rendszermodelljét megépítették és azzal lefutott számítások eredményei szolgálták input adatként a peremfeltételek meghatározásánál.

| | 1 faktor | 2 faktor | 4 faktor | 8 faktor |
|----------------|-----------|-----------|------------|------------|
| Elemzsám [db] | 3 585 109 | 6 518 823 | 12 668 193 | 23 473 501 |
| Nódusszám [db] | 966 307 | 1 645 216 | 3 038 937 | 5 885 849 |

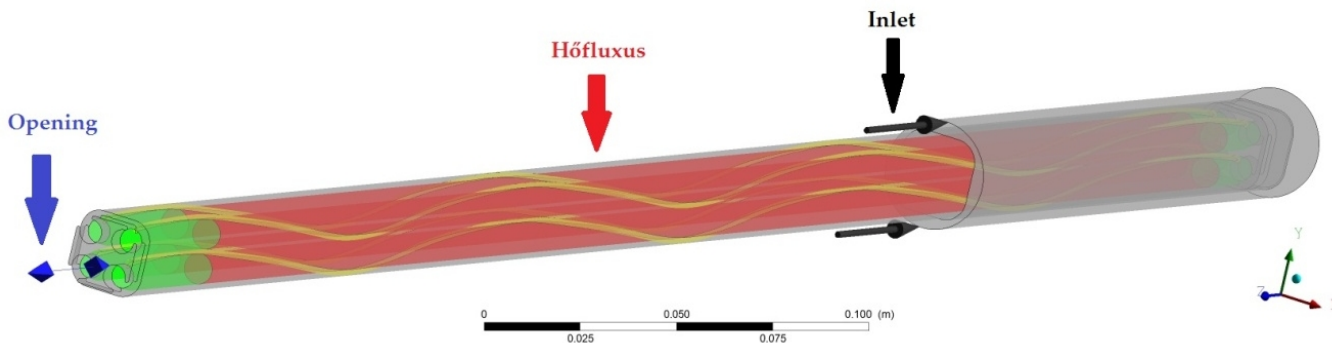


5. ábra: A négy különböző numerikus rács paramétereit és keresztmetszeteit

A szuperkritikus nyomású víz anyagjellemzői az IAPWS-IF97-es ipari formulákkal kerültek definiálásra a CFD modellben. A vizsgált térrész belépésénél lett megadva a hűtőközeg tömegárama és a belépő közeg hőmérséklete az „Inlet” peremfeltétel miatt, ami 0,253 kg/s és 375,64°C. A fűtőelem pálcák súrlódásos, fűtött felületére profilozott hőfluxus került megadásra a német kollégák adatai alapján [6]. A vizsgált térrész kilépésénél „Opening” peremfeltétel lett alkalmazva, amely megengedi a számítás során a be- és kiáramlást és nem épít virtuális falat a kilépő felületre, amely jelentősen megnövelné a számítási időt. Ezen kívül -11000 Pa nyomásesés és a kilépő közeg hőmérsékletére 383,26°C került beállításra a kilépés peremfeltételeként. Az összes többi, fentebb külön nem említett szilárd felület, súrlódásos adiabatikus fal („Wall”) peremfeltétellel került modellezésre. Fontos megjegyezni, hogy a modellekben nem lettek figyelembe véve a szilárd elemek falában lejátszódó hővezetési folyamatok, továbbá a pálcák közötti hőszugárzás is elhanyagolásra került. A számítások során a BSL k- ω

turbulencia modellt használta a megoldó (másodrendű numerikus sémák használatával), a numerikus stabilitás, a pontosság és irodalmi instrukciók miatt, mivel a szakirodalom [8] alapján jelenleg ezzel lehet legpontosabban

kimutatni a hőátadási tényező elfajulását. A tranziens számítások kezdeti feltételeit az állandósult állapotra elvégzett számítások eredményei adták. A modell peremfeltételeit a 6. ábra részletezi.



6. ábra: A modell peremfeltételei

A tranziens számítások teljes modellezési idejét úgy célszerű megválasztani, hogy egy átlagos cellaméretű folyadécsomag a vizsgált térrészt megközelítőleg két-háromszor be tudja járni a modellezett időtartam alatt. Ezt a módszert alkalmazva a jelen modellhez szükséges teljes idő 1,2 másodpercre adódott. Az időlépés 0,001 másodpercre lett megválasztva és minden 25-ödik időlépésben elmentésre került az aktuális eredmény.

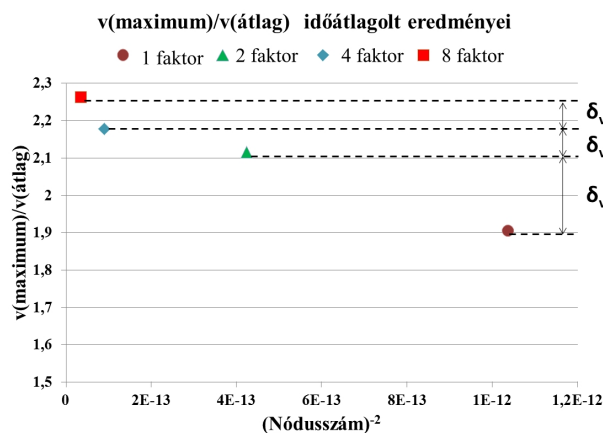
Ahogy korábban már említésre került a hálófüggetlenségi vizsgálat elvégzését 4 különböző méretű numerikus rács segítette (lásd az 5., 7. és 8. ábrákat). Minden egyes háló megközelítőleg kétszer olyan sűrű, mint az előző így elvileg az 1 faktoros rács adja a legpontosabban, a 8 faktoros rács pedig a legpontosabb eredményeket. A hálófüggetlenségi vizsgálat eredményei a 7. és 8. ábrán láthatók. A vízszintes tengelyen a nódusszám szerepel a mínusz második hatványon, így a sűrűbb hálók rendre közelebb vannak a nullához. A függőleges tengelyen a maximális és átlagos sebességek vagy hőmérsékletek arányának időátlagolt értéke látható, ahol az átlagolás az egész átáramlott térfogatra vonatkozik.

A maximális és átlagos értékek minden 25-ödik időlépésben exportálásra kerültek, majd ezen adatok segítségével lettek elvégezve az időátlagolások.

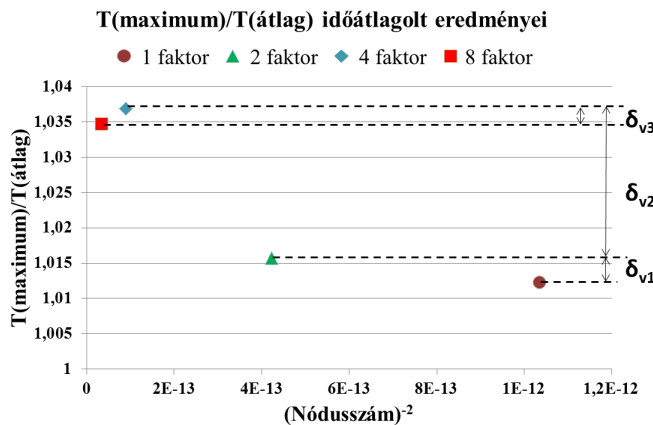
A sebesség tekintetében azt lehet megállapítani, hogy az egyre finomabb hálóval elért eredmények közötti különbségek egyre csökkennek. A 8 és 4 faktoros rács közötti különbség (δ_{v3}) kissé nagyobb, mint a 2 és 4 faktoros rács eredményei közötti különbség (δ_{v2}), viszont elfogadhatónak tekinthető így is a trend a négy különböző rács között.

Hőmérséklet tekintetében megállapítható, hogy a 2 és 4 faktoros rács eredményei közti különbség jóval nagyobb, mint a 4 és 8 faktoros rács esetén. A trend és a 4 és 8 faktoros rácsok által szolgáltatott eredmények közötti különbség alapján azt lehet megállapítani, hogy a rács-független megoldást közelíti a 4 és 8 faktoros számítás eredménye.

Összességében azt lehet konklúzióként elmondani, hogy sikeresen zárultak a hálófüggetlenségi vizsgálatok. A számítógépi kapacitások végeessége miatt a 4 faktoros numerikus rács került kiválasztásra optimális, a további vizsgálatok során alkalmazható numerikus rácsként.



7. ábra: A hálófüggetlenségi vizsgálat eredményei: a maximális és átlagos időátlagolt sebességek aránya a teljes áramlási tartományban



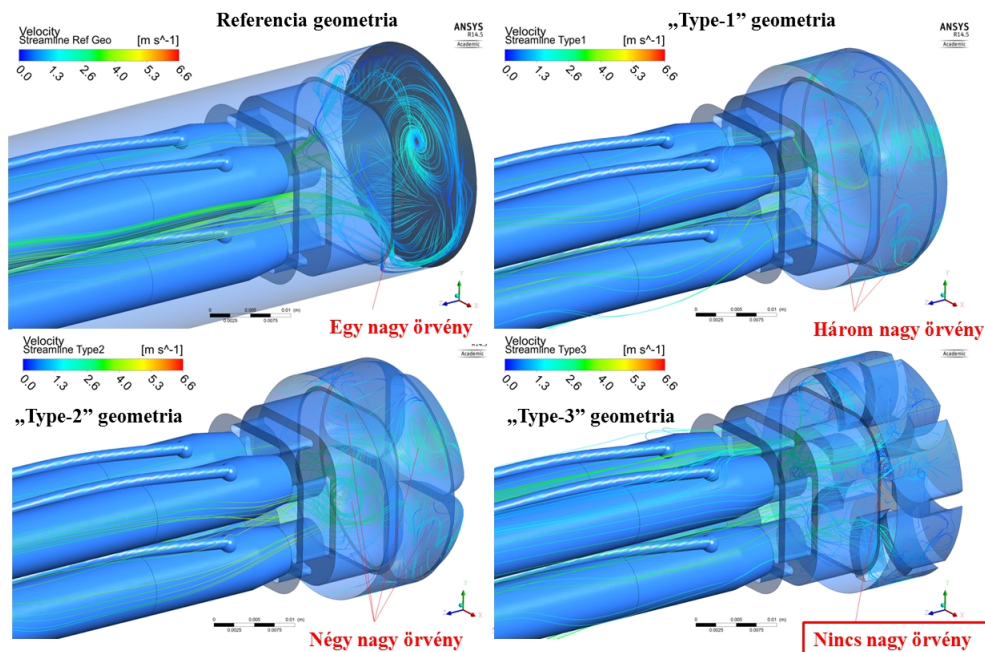
8. ábra: A hálófüggetlenségi vizsgálat eredményei: a maximális és átlagos időátlagolt hőmérsékletek aránya a teljes áramlási tartományban

A belépési rész vizsgálata

A hálófüggetlenségi vizsgálatokat követően el lehetett kezdeni a belépési szakasz vizsgálatát, azaz a modell belépő felületétől az üzemanyagpálcák fűtött szakaszának kezdetéig tartó átáramlott térfogat termohidraulikai analízisét. A BME NTI feladata a tesztszakasz belépő geometriájának optimalizálása annak érdekében, hogy stabil és homogén belépő áramkép biztosítva legyen a majdani kísérletek során.

A belső vezetőső legvége és az üzemanyag kazetta közötti térrészben a hűtőközeg egy 180°-os áramlási irányváltáson megy keresztül. Ennek oka a korábban már említett cső a csőben elrendezését kialakítás, amit a 3. és 4. ábra szemléltet. A belső vezetőső talpa egy lapos lemezzel van lezárva, amely a modell fő méreteivel megegyező nagyságrendbe eső méretű örvényeket generál az áramlási irány 180°-os megváltozását biztosító fordítókamrában. Ezek a nagyméretű örvények instabil és inhomogén áramlási képet eredményeznek a kazettamodell kezdeténél. Az instabil (időben változó) és inhomogén belépő áramlási profilok (főleg a sebesség, de a nyomás és turbulens mennyiségek is) a fűtött szakasz elején

hűtési elégtelenségeket okozhatnak, ami helyi fali hőmérsékleti maximumokhoz, pulzáló nyomás és sebességmező esetén a szerkezeti elemek kifáradáshoz vezethetnek, amelyek végső soron a tesztkör tönkremenetelét okozhatná, emiatt kerülendő. Az instabilitások oka a sík csőlezárás által generált nagy örvények jelenléte a tesztkazetta belépésénél. Ezeknek a nagy örvényeknek a mérséklésére, illetve eliminálására három különböző csőlezáró geometria variáció került megvizsgálásra. A különböző csőlezárások geometriáját és a belépő keresztmetszetről indított áramvonalakat a 9. ábra szemlélteti.



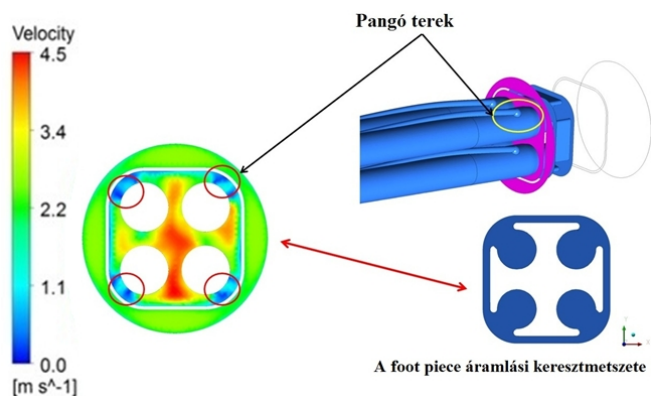
9. ábra: Az eredeti referencia és a három megvizsgált csőlezáró geometria a belépő keresztmetszetről indított áramvonalakkal

A javasolt geometriák közül a „Type 1” geometria egy félgömb alakú csővégződésből és a közepére rakott csonkolt kúpból áll. A „Type 2” geometriája félgömb kialakítású, két, egymásra merőleges gerendával négy részre osztott kialakítású, ami a radiális irányú sebességkomponenseket leredukálhatja. A „Type 3” a referencia geometriában is alkalmazott sík (tárcsás) végződést és nyolc darab terelőlapátot tartalmaz és így próbálja csökkenteni a radiális irányú sebességkomponenseket valamint megelőzni egy olyan örvény létrejöttét, amely a geometria főméreteivel egyező nagyságrendű kiterjedéssel rendelkezne (lásd például a 9. ábra referencia esetét). Ahogy a 9. ábra is mutatja a „Type 3” geometria sikeresen megelőzi a nagy örvények kialakulását, még ha a terelőlapátok végénél, középen egy apróbb örvény meg is figyelhető. Ennek ellenére a „Type 3” adja a legstabilabb áramképet a tesztkazetta belépésénél, ezért ezt minősítettük a legkedvezőbb kialakításnak. További vizsgálatok világítottak rá a „Type 3” geometria meghatározó szerepére. Több áramlási szempontból releváns tulajdonság vizsgálat alá került pl: maximális sebesség, turbulens kinetikus energia, helicitás. A vizsgálat során a vezetőső aljától a pálcák fűtött szakaszáig az egyes jellemzők értéke 3 mm-es közzel került kiolvasásra minden 0,025 s-ban és így egy időátlagot lehetett képezni. Az eredmények azt mutatják, hogy a pálcá fűtött szakaszához közeledve a

maximális sebességek közel azonosak, a turbulens kinetikus energia és a helicitás pedig a „Type 3” esetén veszi fel a legalacsonyabb értéket. Összegezve az eredményeket az mondható, hogy a „Type 3” csővégződés a legalkalmasabb a nagy örvények eliminálására és stabil áramlási tér biztosítására a fűtött szakasz kezdetén, ezért a további vizsgálatok során ezt a geometriát használtuk.

A vizsgálatok során egy másik termohidraulikai problémát azonosítottunk: alacsony sebességgel jellemezhető úgynevezett pangó terek jelentek meg közvetlenül a pálcák talpát rögzítő ún. „foot piece” távtartó után, amely erősen inhomogén áramlási képet (pl. inhomogén sebességmező) eredményez a távtartó után. A pangó tér kialakulását a „foot piece” átáramlott keresztmetszetének alakja okozza. Az átáramlott keresztmetszet egy talpas keresztre hasonlít leginkább, amelyet a 10. ábra szemléltet.

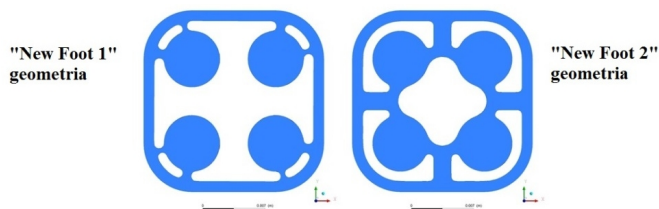
A távtartó keresztmetszetének sarkaiban nincs lehetőség átáramlásra (lásd 10. ábra jobb alsó része), így itt a hűtőközeg sebessége jelentősen lecsökken (lásd 10. ábra bal oldali sebességprofil). Ezek a pangó, alacsony sebességgel jellemezhető részek mind a négy csővégződési geometriánál megjelennek. A jelenséget tanulmányozva az is megfigyelhető, hogy a pálcán felfelé haladva a fűtött rész kezdetéhez is jóval alacsonyabb sebességű hűtőközeg érkezik.



10. ábra: Pangó terek a „foot piece” távtartó után sebességprofillal szemléltetve

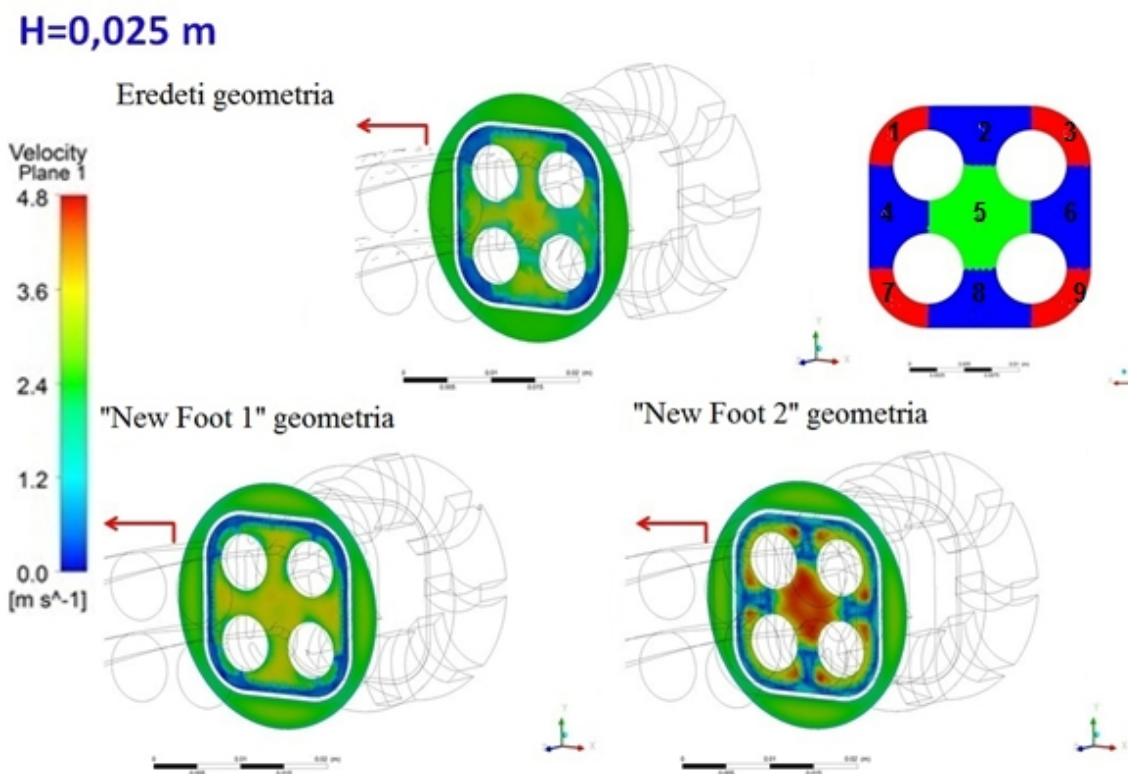
Vagyis a „foot piece” távtartó után kialakuló pangó terek megmaradnak a fűtött szakasz kezdetéig a keresztmetszet többi részéhez képest alacsonyabb sebességű részek formájában. Ez rontja a hőátadást és lokális hőmérsékleti csúcsokhoz vezethet. Az elemzés során ezek a lokális hőmérsékleti csúcsok meg is jelentek igen szignifikáns módon a pálcá falán, mivel a jelenlegi modellek nem veszik figyelembe a pálcák falának hővezetését (a hővezetés jelentősen csökkenti ezen csúcsok értékét, de teljesen el nem

tűnteti őket). Az alacsony sebességű részek mindaddig léteztek, amíg a helikális távtartó keverő hatása el nem tűntette őket az első menetemelkedés közepéig. A pangó terek és a nyomukban jelentkező alacsony sebességű részek kiküszöbölésére két új „foot piece” távtartó geometria készült, amelyeket a 11. ábra szemléltet.



11. ábra: A két javasolt új „foot piece” távtartó áramlási keresztmetszete

A „New Foot 1” geometria a sarkokban kialakított résekkel próbálja kiküszöbölni a pangó tereket. A „New Foot 2” geometriája egy teljesen más koncepciójú geometriát képvisel. A 12. és 13. ábra szemlélteti az áramlási képet közvetlenül a „foot piece” távtartó után 0,025 m magasságban és közvetlenül a pálcák fűtött szakasza kezdetén 0,045 m magasságban. Az eredeti geometria által generált áramlási tér is ábrázolásra került a könnyebb összehasonlíthatóság érdekében.

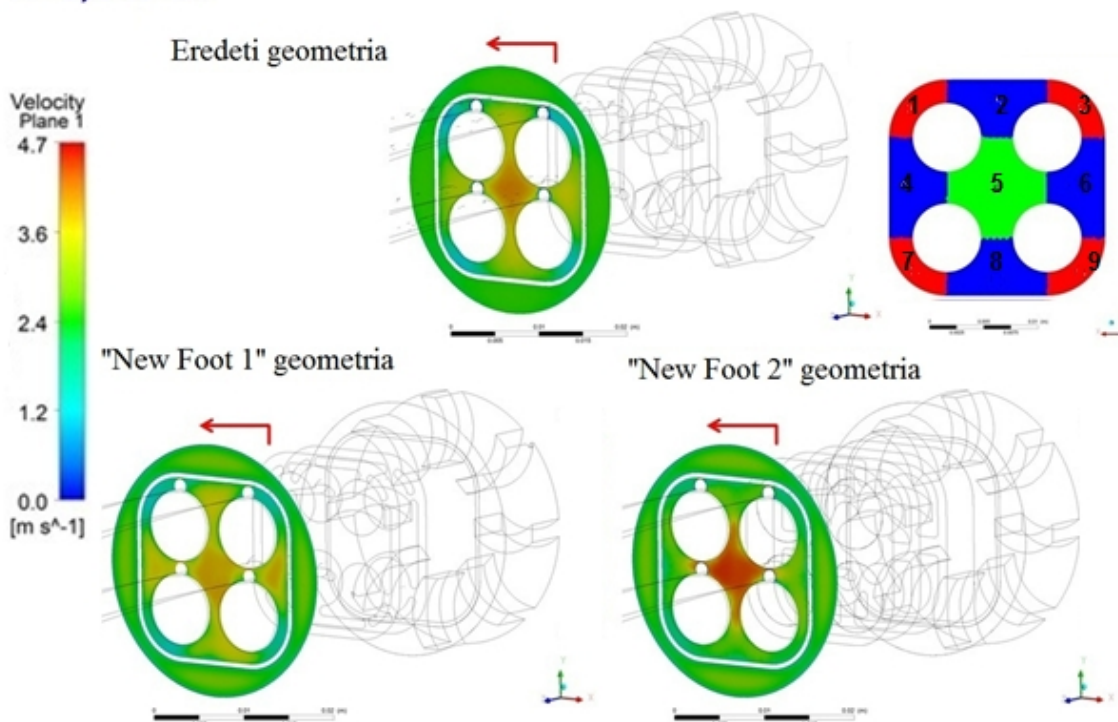


12. ábra: Sebességprofilok közvetlenül a foot piece távtartó után (0,025 m)

A számítási eredmények azt mutatják, hogy közvetlenül a „foot piece” távtartó után kialakuló áramlási tér (lásd a 12. ábrán ábrázolt sebességprofilok) erősen meghatározott a „foot piece” átáramlott keresztmetszetének alakja által. A pálcák fűtött szakaszát elérve észrevehető, hogy a helikális távtartók keverő hatása az eltérő „foot piece” geometriák miatt különböző (lásd 13. ábra).

A „New Foot 1” geometriájának a sarkaiban elhelyezett apró rések miatt megnövekedik a közeg sebessége a négy sarki szubcsatornában (lásd a 12. ábra pirossal színezett szubcsatornáit jobbra fent a sematikus ábrán) a „foot piece” után. A sarki szubcsatornáknál a fűtött szakasz előtt még mindig jelentős sebességkülönbség látható az átlagsebességhez képest (13. ábra). A „New Foot 2” után látható sebességprofil (12. ábra) új koncepciója miatt, nem hasonlít az előző áramképekre.

H=0,045 m

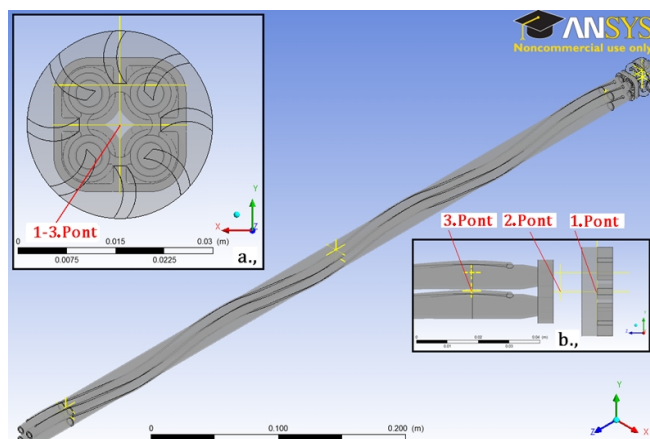


13. ábra: Sebességprofilok a pálcák fűtött szakasza kezdetén (0,045 m)

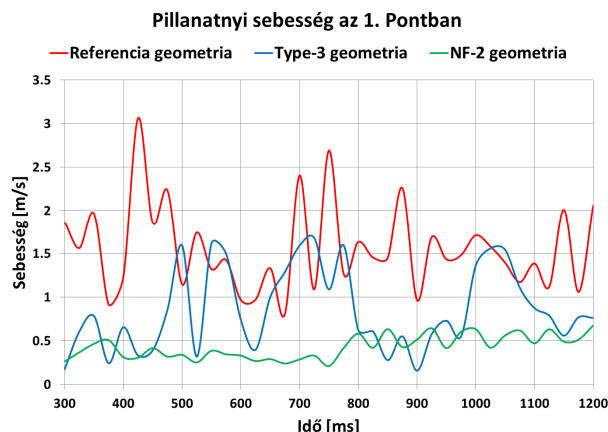
A középső szubcsatorna sebessége jóval nagyobb, mint a korábbi esetekben, ami kedvező, mivel ez a szubcsatorna van 4 oldalról fűtve, így ez igényli a legintenzívebb hűtést. A kialakítása miatt közvetlenül utána a sarkokban nem keletkeznek pangó terek, a fűtött szakaszhoz érve pedig a sarkok sebessége jóval nagyobb. Itt a kék (fal melletti) és piros (sarki) szubcsatornák sebességmezőjét nézve egy sokkal homogénebb mezőt látunk a „New Foot 1” vagy az eredeti geometriával végzett számítás eredményeivel összehasonlítva. A számítási eredményeket összegezve az vonható le, hogy a tesztkezetta belépésénél tapasztalt pangó terek eltüntetésére a „New Foot 2” távtartó geometria a legalkalmasabb.

A belépő szakasznál jelentkező áramkép stabilitása (időbeli viselkedése) került megvizsgálásra a következő lépésben. A fordítókamrában létrejövő nagy örvények megszüntetésével kapcsolatban elmondható, hogy a „Type-3” alkalmazásával a referencia és másik két fenéklemez variáns esetéhez képest időben stabilabb (lásd 14-17. ábra) és homogénebb (lásd 13. ábra) belépő szakaszi áramképet értünk el. A 15-17. ábrán látható görbék elnevezései a következőképpen értendők. A „Referencia geometria” a referencia fenéklemez (9. ábra) és eredeti távtartó geometriát (10. ábra) takarja, a „Type-3 geometria” a Type-3 fenéklemez (9. ábra) és az eredeti távtartó geometriát (10. ábra), míg az „NF-2 geometria” a Type-3 fenéklemez (9. ábra) és a New Foot 2 távtartó geometriát (11. ábra) jelenti.

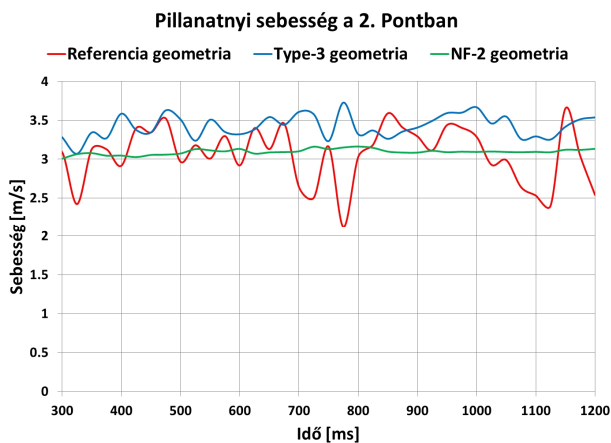
Az alsó távtartó után kialakuló alacsony sebességű zónákkal kapcsolatban elmondható, a referencia és a két új távtartó CFD vizsgálata azt eredményezte, hogy az úgynevezett „New foot 2” (NF2) távtartóval és „Type-3” fenéklemez típusal szerelt teszt szakasz geometrián nemcsak homogénebb, de időben stabilabb a belépő szakasz áramképe (lásd a 14-17. ábrát).



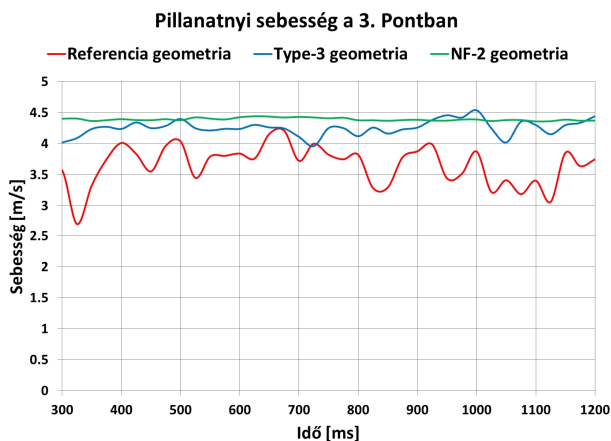
14. ábra: A belépő szakasz áramkép-stabilitásának szemléltetéséhez használt három pont elhelyezkedése: a., alulnézet; b., oldalnézet (a képen a Type-3 fenéklemez és NF-2 távtartó geometria látható)



15. ábra: Pillanatnyi sebességek az 1. pontban



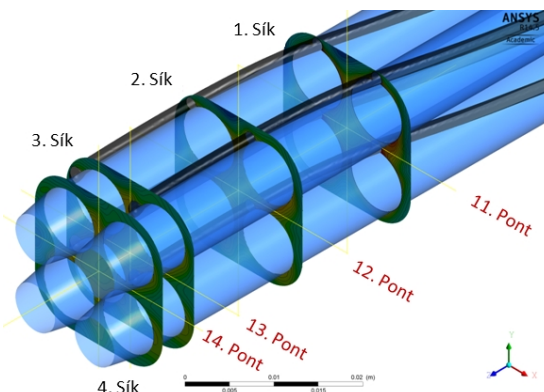
16. ábra: Pillanatnyi sebességek a 2. pontban



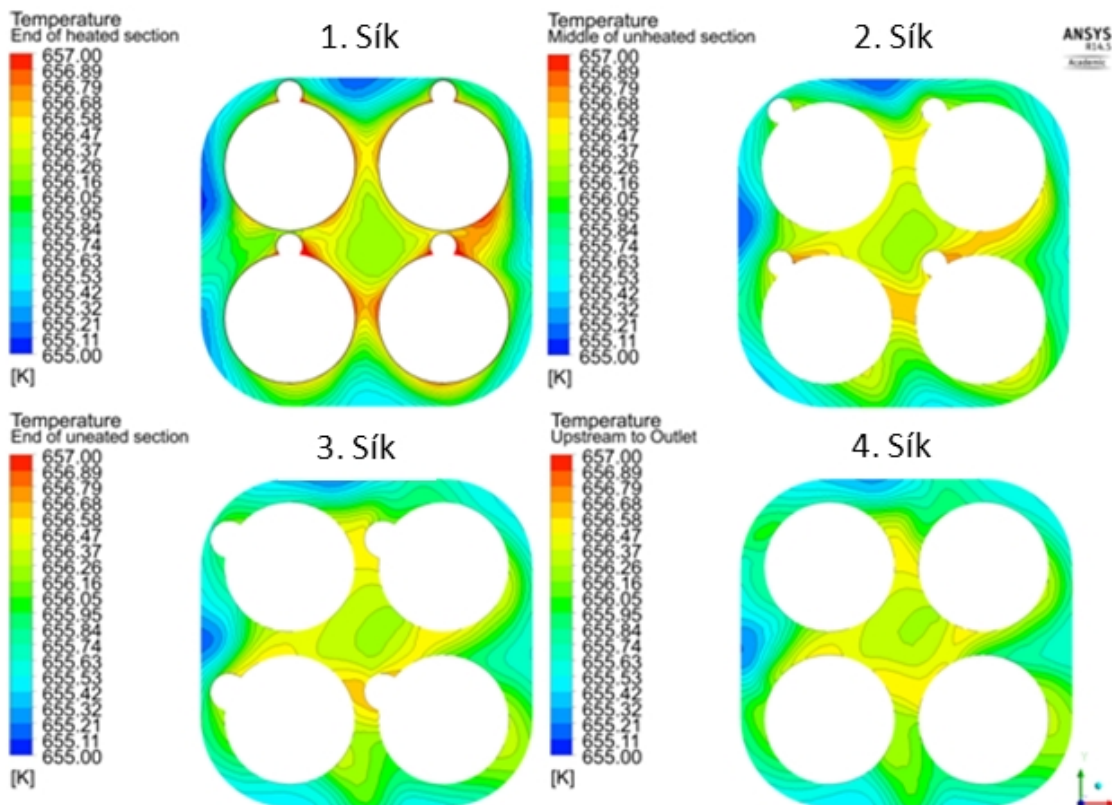
17. ábra: Pillanatnyi sebességek a 3. pontban

A kilépési szakasz vizsgálata

A kilépési szakaszon a hűtőközeg megfelelő keveredését kell biztosítani, aminek elérése a hőmérsékletmező homogenitásának és a homogén mező időbeli stabilitásának a vizsgálatával kerül szemléltetésre. A 18. ábra mutatja a kilépési szakasz hőmérsékletmezőjének vizsgálatához felvett vizsgálati síkokat és pontokat: 4-4 vizsgálati sík és pont került felhasználásra. Az 1. sík a fűtött szakasz végénél, a 2. sík a fűtetlen szakasz közepén, a 3. sík a fűtetlen szakasz végén, a 4. sík pedig a kilépési keresztmetszet előtt közvetlenül található. A 19. ábra szemlélteti a hőmérsékletprofilokat a 4 vizsgált síkban. Mint látható, ahogy közeledünk a fűtött szakasz végétől a kilépési keresztmetszet felé, úgy válik egyre homogénebbé a hőmérsékletprofil: a 19. ábrán látható, hogy a maximális és minimális hőmérséklet közötti különbség enyhén csökken (az 1. és 4. sík összehasonlításával belátható), ami homogén kilépési hőmérsékletprofilot jelent.

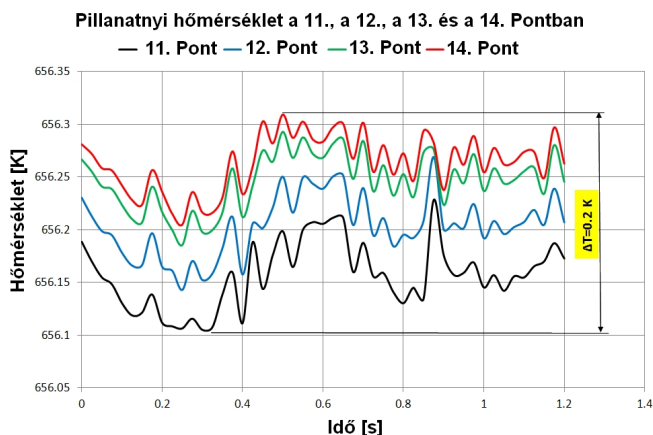


18. ábra: A kilépési szakasz hőmérsékletmezőjének homogenitása a $t=1,2$ s időlépésben: a vizsgált síkok és pontok



19. ábra: A kilépési szakasz hőmérsékletmezőjének homogenitása a $t=1,2$ s időlépésben: a hőmérsékletprofilok a vizsgált síkban

A 20. ábra szemlélteti a pillanatnyi hőmérsékleteket a 11-14. pontokban (18. ábra). Mint látható igen kis amplitúdójú oszcillációk figyelhetők meg a 4 vizsgált pontban. Az ingadozó hőmérsékletek 0,2 K szélességű tartományon belül maradnak, így időben stabilnak minősíthető a kilépés hőmérsékletmezője, vagyis megfelelő a keveredés a kilépő szakaszon.



20. ábra: A kilépési szakasz hőmérsékletmezőjének homogenitásáról: a pillanatnyi hőmérsékletek a vizsgált pontokban

Konklúzió

Az SCWR-FQT egy speciális superkritikus nyomású, vízűtűsű kísérleti hurok, amely a cseh CVR kutatóintézet LVR-15 típusú kutatóreaktorában fog üzemelni 2015 után. A kísérleti hurok célja az európai SCWR koncepció (HPLWR)

kazettatervének vizsgálata, működőképességének demonstrálása.

A belépő szakasz vizsgálata során két érdemi problémára derült fény. Egyrészt kiderült, hogy a fordítókamra kialakítása nagy örvényeket generált, amelyek időben instabillá és inhomogénná tették a belépő szakasz áramképét. Az örvényképződés megszüntetése, de legalább mérséklése céljából három új fenéklemez kialakítást vizsgáltunk meg, amelyek közül egyedül a „Type-3” elnevezésű fenéklemez geometria tudta jelentősen mérsékelni az örvényes áramlási jelleget.

Egy másik felderített probléma az alsó távtartó áramlási keresztmetszetének kialakításából eredt. Alacsony sebességű zónák alakultak ki a távtartó elem áramlási keresztmetszete után a sarkokban található szubcsatornában, és a fűtött szakasz kezdetéig ezek az alacsony sebességű zónák megmaradtak, inhomogénná téve az áramképet és hőátadási elégtelenségeket okoztak. Ezen alacsony sebességű zónák megszüntetésére két új távtartó geometriát vizsgáltunk meg. Az eredmények azt mutatják, hogy a „New Foot 2” elnevezésű távtartó geometria tudja jelentősen növelni a sebességet a sarki szubcsatornában, ami homogénebbé és időben stabilabbá teszi az áramképet a belépő szakaszon, ezért ez a megoldás került kiválasztásra.

A kilépő szakasz áramképét is alapos vizsgálatnak vetettük alá, amely során megállapítottuk, hogy a helikális távtartók homogén és időben stabil kilépő hőmérsékletprofilhoz vezetnek létre, ami a megfelelő szubcsatornák közötti keveredés indikátora.

Köszönetnyilvánítás

A fenti kutatás az Supercritical Water Reactor - Fuel Qualification Test (SCWR-FQT) FP-7-es EU projekt (Grant agreement no: 269908) támogatásával készült.

A fenti kutatás az EU_BONUS_12 projekt (Szerződés száma: EU_BONUS_12-1-2012-0001) támogatásával készült.

A munka szakmai tartalma kapcsolódik a "Minőségorientált, összehangolt oktatási és K+F+I stratégia, valamint működési modell kidolgozása a Műegyetemen" c. projekt szakmai célkitűzéseinek megvalósításához. A projekt megvalósítását az ÚSZT TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KMR-2010-0002 programja támogatja.

Irodalomjegyzék

- [1] Csom Gyula: *Nemzetközi összefogás a 21. század atomenergetikájáért, kézirat, Budapest, 2005. április*
- [2] Yoshiaki Oka, Seiichi Koshizuka, Yuki Ishiwatari, Akifumi Yamaji: *Super Light Water Reactors and Super Fast Reactors – Supercritical-Pressure Light Water Cooled Reactors*, 2010, Springer Kiadó, London. ISBN 978-1-4419-6034-4
- [3] Kiss Attila, Aszódi Attila: *SCWR üzemanyagban lejátszódó termohidraulikai folyamatok modellezése az ANSYS CFX 10.0 kóddal*, V. Nukleáris Technikai Szimpózium, Paks, 2006.
- [4] Kiss Attila, Dr. Aszódi Attila, *Numerical Investigation on the Physical Background of Deteriorated Heat Transfer Mode in Supercritical Pressure Water*, The Proceedings of The 6th International Symposium on Supercritical Water-Cooled Reactors, ISSCWR-6, Március 3-7., 2013, Shenzhen, Guangdong, Kína.
- [5] T. Schulenberg, J. Starflinger: *Three Pass Core Design Proposal for a High Performance Light Water Reactor*, 2nd COE-INES-2 International Conference on Innovative Nuclear Energy Systems, INES-2, Yokohama, Japan, Nov. 26-30, 2006. Publikálva: *Progress in Nuclear Engineering*.
- [6] M. Raqué, O. Frybort, A. Vojacek, T. Schulenberg, *Passive Residual Heat Removal System For The SCWR Fuel Qualification Test Facility*, The 15th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermalhydraulics (NURETH-15), paper no. 112, Pisa, Italy, May 12-15, 2013.
- [7] Menter, F.R. et al., 2002, *CFD Best Practise Guidelines for CFD Code Validation for Reactor-Safety Applications*, ECORA project, FIKS-CT-2001-00154, Brussels, Belgium 2002.
- [8] J.A. Lycklama á Nijeholt: *Best practice guidelines for use of CFD-Codes for supercritical water*. HPLWR Phase 2, Deliverable D5-06, 2009.