



TDK pályamunka

CFD számítások a V1000CT-2 termohidraulikai benchmark feladattal kapcsolatban

Selmi Bálint

Témavezető: Kiss Béla

tudományos segédmunkatárs

BME-TTK Nukleáris Technikai Intézet

Atomenergetika Tanszék

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Természettudományi Kar

2024.11.03.

Függelékkel kiegészített változat a 37. Országos Tudományos Diákköri Konferenciára

2025.01.08.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	3
1.1. VVER-1000 típusú reaktorok műszaki jellemzői	3
1.2. Termohidraulikai számítások CFD módszerekkel	5
1.3. A kutatás célkitűzései	6
2. A szimulációs benchmark feladat	8
2.1. Áttekintés	8
2.2. Kezdeti- és peremfeltételek	9
2.3. Alkalmazott közelítések	10
2.4. Korábbi számítások eredményei	11
3. Áramlási tér modellezése	14
3.1. Reaktortartály geometria implementációja	14
3.2. Diszkretizáció	14
4. Hálófüggetlenségi vizsgálat	20
4.1. Hőmérséklet-eloszlás felbontásérzékenységének vizsgálata	26
4.2. Nyomásveszteség felbontásérzékenységének vizsgálata	30
5. Elvégzett számítások	31
5.1. Turbulencia modell kiválasztása	31
5.2. Számítások a benchmarkban használatos geometriával	34
5.3. Számítások geometriai közelítések részleges elhagyásával	36
6. Számítási eredmények összehasonlítása a mért hőmérsékletekkel	37
7. Konklúzió	43
8. Köszönetnyilvánítás	44
9. Függelék: Saját eredmények	47

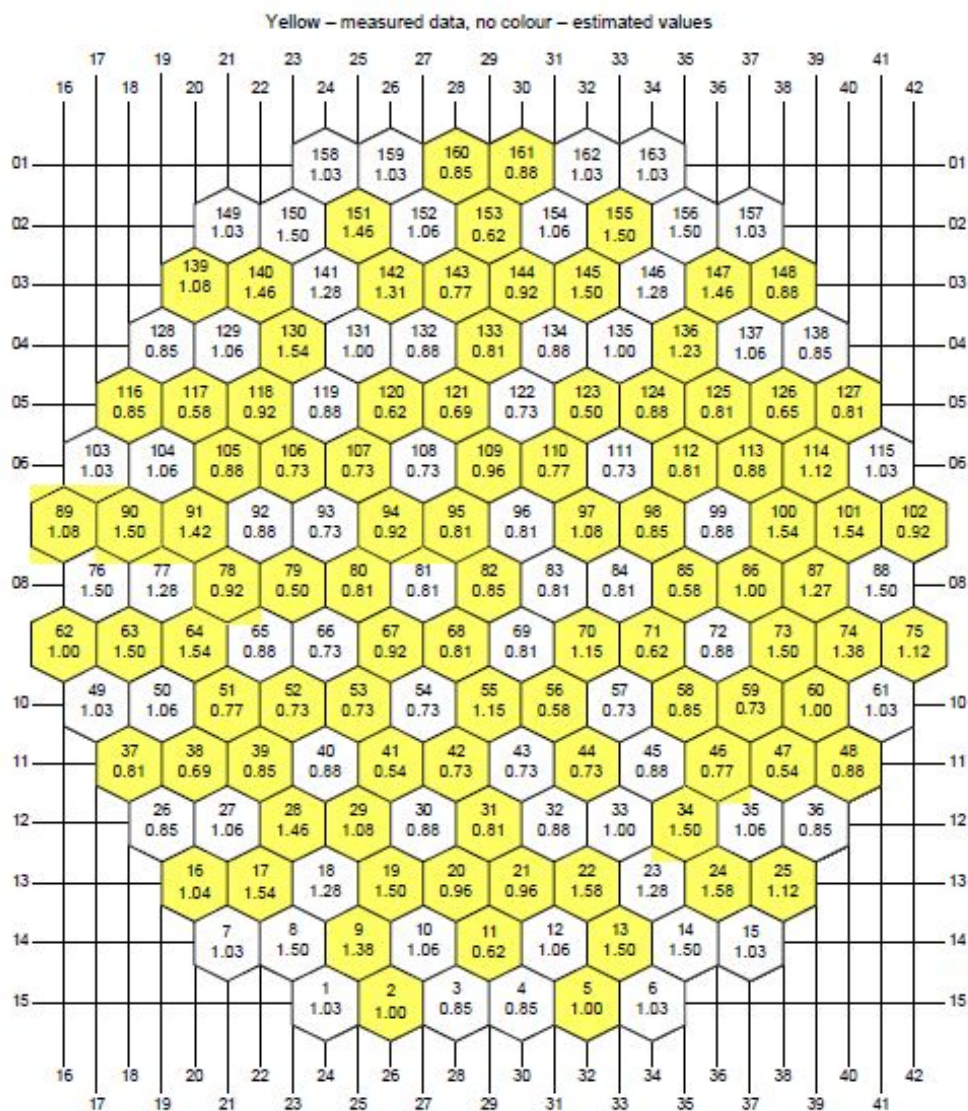
1. Bevezetés

A VVER a nyomottvizes reaktorok szovjet, majd orosz fejlesztésű típuscsaládja, amelynek világszerte legelterjedtebb változatai az eredetileg 440 MW elektromos teljesítmény előállítására képes VVER-440, illetve az 1980-as években fejlesztett, 1000 MW-ot produkáló VVER-1000 típus [1]. Utóbbiból világszerte 35 blokk készült [2], jelenleg pedig kivitelezés alatt áll - például a Paks II. projektben is - több, a VVER-1000-es továbbfejlesztéséből megalkotott 1200-as modell. Az analóg működési elvekből, illetve a konstrukció nagyfokú hasonlóságából következik, hogy a már üzemelő VVER-1000-es reaktorok műszaki és fizikai elemzéseit tanulságos tapasztalatot nyújthatnak modern és nagyobb hatásfokú utódjaik működtetése szempontjából.

1.1. VVER-1000 típusú reaktorok műszaki jellemzői

Típuscsaládjával megegyező módon a VVER-1000 reaktorok üzemanyaga dúsított urán-dioxid. Nyomottvizes reaktor lévén, a neutronok lassítására szolgáló moderátora és a keringtetett hűtőközege egyaránt a primerköri könnyűvíz. A primer hűtőközeg-rendszer négy vízhurokból áll, melyek reaktortartályhoz csatlakozó hengeres csonkjainak vízszintes síkbeli kiosztása aszimmetrikus. Ebből következik, hogy a reaktortartályon belül létrejövő áramlási struktúrák, illetve a hűtőközeg keveredése és termohidraulikai jellemzőinek térbeli eloszlása nem triviális, mutathat jelentős heterogenitást.

A primer hűtővíz a hidegági csonkokon lép be a reaktortartályba, a leszálló gyűrűs csatornán leáramlik az elliptikus tartályfenékbe, ahonnan egy perforált alsó (belső) lemezen, majd az áramlásosztó funkciót is ellátó zónatartó oszlopokon felfelé áramolva eléri az aktív zónát. A fűtőelem-pálcák közti áramlás során felmelegedett víz a melegági csonkokon távozik a reaktortartályból a hőcserélő felé, ahol a szekunderköri víznek hőt ad le, utóbbiból gőzt fejlesztve a turbinák meghajtásához.



1. ábra. VVER-1000 reaktor zónájának sematikus geometriája, kötegszámokkal [3]. A sárga kazetták fölött lehetséges a hőmérsékletmérés.

A hexagonális geometriájú zónában 163 darab hatszög alakú fűtőelem-köteg található. Ezeket a VVER-440-es reaktoroktól eltérően nem határolja kazettafal, így a kialakításból eredően a fűtőelem-kötegek között megengedett a köztes áramlás. A biztonságvédelmi szabályozórudak és rúdcsoportok is a pálcakötegekben helyezkednek el. A kötegszámozást az 1. ábrán látható zónatérkép mutatja.

1.2. Termohidraulikai számítások CFD módszerekkel

A vízhűtésű és vízmoderált reaktorok hűtőközegének anyagi tulajdonságai és annak nyomon követése kiemelkedő fontossággal bír, különös tekintettel a moderátor neutronbefogási hatáskeresztmetszetére és az azt befolyásoló fizikai paraméterekre, hiszen a reaktor inherens biztonságának megléte nagyban függ a reaktivitásba való visszacsatolásoktól. A víz sűrűségét befolyásoló hőmérséklet-eloszlást kellő pontossággal szükséges mérni, illetve számításokkal, szimulációkkal ismertetni az azt kialakító áramképet. Utóbbi közvetlenül nehezen, a legtöbb helyen pedig egyáltalán nem mérhető, így hasznos lehet a számítógépes, numerikus megoldásokat választani.

Az egyik gyakorta alkalmazott módszere ennek a numerikus áramlástani, avagy CFD (angolul: Computational Fluid Dynamics) számítások. A termohidraulika területén a problémák numerikussá alakításában általában a véges térfogat módszeres CFD számítások használatosak, melyek során a vizsgálni kívánt áramlási teret kicsiny térfogatelemekre (ellenőrzőtérfogatokra, avagy cellákra) bontjuk. Ezen cellákon belül az áramlás szempontjából releváns fizikai mennyiségek térbeli függése viszonylag egyszerű - például lineáris - függvénnel közelíthető. Az ellenőrzőtérfogatokra bontás a diszkretizációs eljárás, avagy numerikus hálógenerálás.

Az áramlástani megmaradási egyenletek megoldása során a cellák középpontjában kerülnek meghatározásra a változók. A megoldandó egyenletrendszer tartalmazza a tömegmegmaradást (kontinuitás), a három térbeli irányra az impulzusmegmaradást (Newton II. törvénye) és az energiamegmaradást (termodinamika I. főtétele). A mechanikai egyenletekhez társul még a termodinamikai állapotjelzőket összekötő állapotegyenlet, valamint a turbulens áramlási struktúrákat figyelembe vevő disszipációs és turbulens kinetikus energiára vonatkozó összefüggések. Legutóbbiak függenek attól, hogy a számítások során milyen turbulencia modellt alkalmazunk, ez pedig a megoldandó problémától és az áramlási tér geometriájától függ.

A CFD módszer a fizikai valóságot közelítések segítségével modellezi, így értékes és valósághű elemzések lefolytatásához kifinomult és jól definiált lépések sorozata szükséges. Valamennyi CFD szimulációs eljárás az alábbi legjobb gyakorlatok irányelveit (angolul: Best Practice Guidelines) követi [4]:

1. A vizsgálandó áramlási tér geometriai modelljének megalkotása.
2. Hálógenerálás a feladathoz megfelelő cellaméret-tartományban, ügyelve a nagy gradienseket mutató régiók részletes felbontására.
3. Az áramlás turbulens jellegének mérlegelésével megfelelő turbulencia modell(ek) kiválasztása.
4. Hálófüggetlenségi vizsgálat: Különböző elemszámú numerikus hálókkal elvégezzük a számítást, és ha az eredmények hasonlóak, vagy a felbontás növekedésével konvergálnak, akkor kiválasztjuk a pontosság, illetve gépigény alapján a legmegfelelőbb hálót.
5. A kiválasztott hálón megfelelő turbulencia modell(ek)el további számításokat végezhetünk a feladatunknak megfelelően.
6. Konvergencia vizsgálata: Egy számítás akkor tekinthető eredményesnek, ha a reziduálisok értéke kellően alacsonyra csökkent, a globális tömeg-, impulzus-, és energiamérlegek teljesülnek, valamint a célparaméterek egy közel állandó-sult értékhez konvergáltak be.

1.3. A kutatás célkitűzései

Egy VVER-1000 reaktortartály hűtőközeg keveredését vizsgáló nemzetközi benchmark feladat keretében, illetve ahhoz kapcsolódóan több CFD számítással szimulálták, ahogy a primerkör egyik hidegági csonkján melegebb hűtőközeg folyik be, mint a többi három csonkon [3]. A mérési és szimulációs tapasztalatok szerint is az inhomogén és aszimmetrikus hőmérséklet-eloszlás a leszálló gyűrűs csatornában történő lefolyás és keveredés során, a zónabelépésnél már egy elfordult, elcsavarodott állapotban figyelhető meg. Emellett a melegebb hűtőközeg által

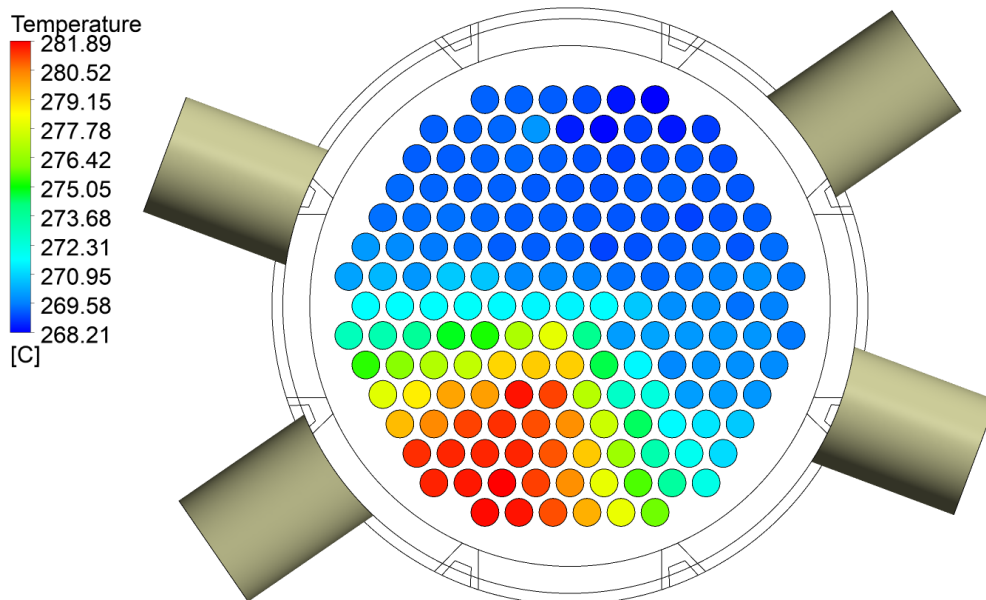
lényegesen befolyásolt terület és a hőmérséklet-eloszlás elcsavarodás mértékének tekintetében különböző eredmények születtek. [3][5][6][7][8][9][10][11][12]

A VVER-1000 reaktortartály leszálló gyűrűs csatornájában kialakuló hűtőközeg keveredés vizsgálatára - BSc szakdolgozatom keretében [5] - saját geometriai modellt hoztam létre az ANSYS ICEM CFD szoftver segítségével, amely modell a nemzetközi benchmark feladatban [3] meghatározott paraméterekkel rendelkezik. A modellel stacionárius és tranziens számításokat is végeztem az ANSYS CFX programkóddal. A hálófüggetlenségi vizsgálat elvégzése után egy nagyjából 34 millió cellából álló, strukturált határréteggel ellátott, azon kívül strukturálatlan, tetraéder elemekből álló hálót választottam ki további elemzésre. A kiválasztott hálón $k - \epsilon$, SST, SAS-SST és SSG-Reynolds turbulencia modellek alkalmazásával végeztem CFD számításokat, majd megállapítottam, hogy a méréshez képest a zónabelépésnél kialakuló hőmérsékleteket és a befolyásolt keresztmetszeti szögtartományt egy finomabb hálóval már az egyszerűbb $k - \epsilon$ modell, az elcsavarodás mértékét pedig az SST modell közelíti a legpontosabban [5].

A benchmark résztvevőinek számítási eredményei [3] hasonló jellegű eltéréseket mutatnak, mint az általam elvégzettek [5], így kijelenthető, hogy a megalkotott modell a felállított közelítéseken belül helyesnek bizonyult, a keveredési effektust lényegében jól modellezte. Azonban a hasonló eltérési tendenciák és az egyszerűbb modellek alkalmassága rámutatnak arra, hogy a keveredés minél pontosabb modellezéshez szükséges lenne a geometriai leegyszerűsítések, illetve a csonkkiosztásban tett közelítések csökkentése, vagy elhagyása, és a valós geometrián, lehetőség szerint a teljes primerkör figyelembevételével megvalósítandó CFD számítások elvégzése.

A szakdolgozatomban [5] is tárgyalt eredményekre támaszkodván, a kutatás folytatásképp jelen tanulmány a geometriai közelítések részleges elhagyásának hatását, illetve a szimulációkkal kapott eredmények mért értékektől való eltérését vizsgálja. Ennek célja, hogy a termohidraulikai CFD szimulációk valósághűségét, és a

közelítések befolyását behatóbban megértvén, a pontosság növelése érdekében az optimális modellezés lehetséges módjára világítsak rá.



2. ábra. **Elcsavarodási effektus:** Mért hőmérséklet-eloszlás a zónabelépési felületeken, a benchmark aszimmetrikus hűtőközeg betáplálási tesztjének végállapotában. A melegebb hűtőközeg a bal alsó (1-es számú) csonkon lép be a reaktortartályba.

2. A szimulációs benchmark feladat

2.1. Áttekintés

A Nuclear Energy Agency, Nuclear Science Committee, Committee on the Safety of Nuclear Installations VVER-1000 hűtőközeg tranziens vizsgálatának (VVER-1000 Coolant Transient Benchmark) első feladata [3] a reaktortartályban történő hűtőközeg keveredési kísérlet számítása (Exercise 1 - Computation of a vessel mixing experiment) volt. A felmelegedési teszt során, a szimmetrikus kezdeti hűtőközeg-betáplálás után az 1-es számú hurok gőzleválasztó szelepét elzárták, ezáltal nyomásnövekedést és hőmérsékletemelkedést előidézve a hurokban. A hőmérséklet-eloszlás aszimmetrikus állapotában vizsgálták a hűtőközeg keveredését, a hőmérsékletprofil elcsavarodását, és a melegebb hurok által befolyásolt területet a hidegági csomoktól a zónabelépésig, illetve a melegági csomokig. Jelen kutatás az előbbi szakasz

vizsgálatával foglalkozik. A méréseket a Bulgáriában található Kozloduy Atomerőmű 5-ös és 6-os számú, VVER-1000 V320-as típusú reaktorblokkjain végezték, azok üzembehelyezési szakaszában. [3][5]

2.2. Kezdeti- és peremfeltételek

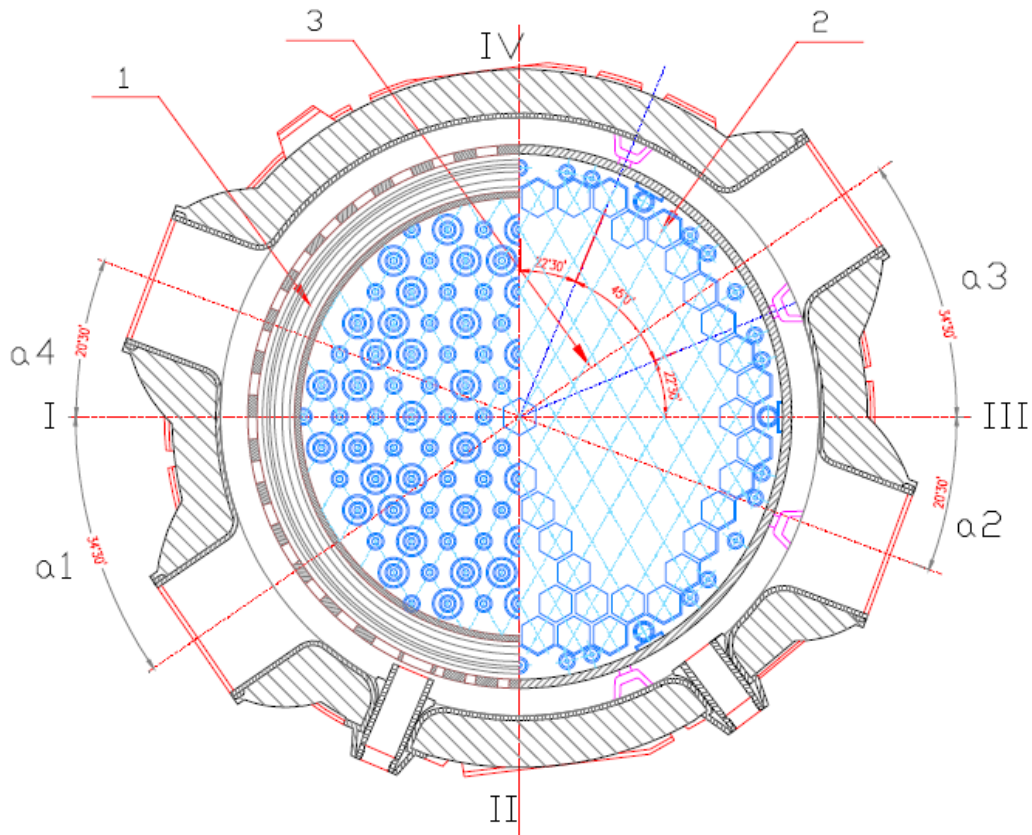
Kezdetben a reaktor 281 MW teljesítményen üzemelt, a zóna feletti nyomás 15,59 MPa volt - közel a névleges 15.7 MPa értékhez. A hűtőközeg hőmérséklete a belépéskor $541,8\text{ K}$, a bórsav koncentrációja $7,2\frac{\text{g}}{\text{K}}$. A bórsav koncentrációja közel esik ahhoz a $7,5\frac{\text{g}}{\text{K}}$ névleges értékhez, amelynél a hűtőközeg-hőmérsékleti reaktivitástényező zérus [3]. Ez azt jelenti, hogy a hűtőközeg hőmérsékletéből adódó reaktivitási visszacsatolás gyakorlatilag nulla, így a kismértékű hőmérsékletváltozások elhanyagolható mértékben befolyásolják a reaktivitást, ami viszont befolyásolná a hőteljesítményt, azaz magát a hűtőközeg-hőmérsékletet is. A tranziens a gőzleválasztószelep elzárásával és az 1-es hurokban található gőzfejlesztő tápvízének elzárásával történik. A gőzfejlesztő nyomása kb. 20 perc alatt stabilizálódik $6,47\text{ MPa}$ értéken. Ezek eredményeképp a hűtőközeg hőmérséklete $13,6\text{ K}$ -nel emelkedik, míg a tömegáram 3,6%-kal csökken. A hurokáramok keveredésének köszönhetően a többi hurok hőmérséklete nagyjából 1 K -nel megemelkedik. A teljesítményeloszlás a zónában nem változik szignifikánsan. Az 1800 s utáni végállapot paramétereit a 1. táblázat tartalmazza. [5]

Paraméter	Erőművi adat (peremfeltétel)
1-es számú hidegág hőmérséklete [K]	555,35
2-es számú hidegág hőmérséklete [K]	543,05
3-as számú hidegág hőmérséklete [K]	542,15
4-es számú hidegág hőmérséklete [K]	542,35
1-es számú hurok tömegárama [kg/s]	4566
2-es számú hurok tömegárama [kg/s]	4676
3-as számú hurok tömegárama [kg/s]	4669
4-es számú hurok tömegárama [kg/s]	4819
Zóna feletti nyomás [MPa]	15,593
Nyomás a reaktortartály kilépésnél [MPa]	15,55

1. táblázat. A benchmark feladat számításainak peremfeltételei, a tranziens végállapota [3].

2.3. Alkalmazott közelítések

A benchmark a reaktortartály csonkkiosztásán közelítéseket tesz azok szög szerinti elhelyezkedésében. Láthatjuk a 3. ábrán és a 2. táblázatban, hogy a tervezett és a legyártott reaktortartály csonkpozíciói között -7% -tól 10% -ig terjedő eltérés van.[3][5] A későbbiekben ezen - igen jelentős - közelítések elhagyásával, tehát a modell szerinti helyett a tényleges csonkkiosztás alkalmazásával elvégzett számítások is tárgyalásra kerülnek.



3. ábra. VVER-1000 reaktortartály benchmark modelljének felülnézeti rajza [3].

Hidegági csomk	Azimutális szög	Modellezési érték	Valódi érték	Eltérés
1	α_1	$34^\circ 30'$	$34^\circ 39'$	-7%
2	α_2	$20^\circ 30'$	$20^\circ 18'$	$+10\%$
3	α_3	$34^\circ 30'$	$34^\circ 38'$	$+6\%$
4	α_4	$20^\circ 30'$	$20^\circ 29'$	-1%

2. táblázat. A reaktortartály csonkkiosztása a benchmark modellben [3] és a valóságos csonkkiosztás.

Emellett fontos közelítés még, hogy a benchmark egyes résztvevőinek modelljében, illetve a későbbiekben bemutatott módon megalkotott saját modellemben is a hűtővíz az elliptikus alsó plénumból közvetlenül, a zónatartó oszlopok alján áramlik fel a zónabelépéshez. Ezzel szemben, a valóságban a hűtőközeg a zónatartó oszlopok oldalán lévő perforációkon át jut be az egyes oszlopokba. A perforátumok elhagyása rendkívül apró méretükből eredően kényelmes közelítés, hiszen az ilyen kicsiny áramlási térrészek felbontása lokálisan hatalmas elemszámú numerikus hálót igényelne. Ugyanakkor ez a közelítés hibaforrásként szolgálhat a köztes áramlási irányokra és a fellépő disszipációra gyakorolt perturbáció miatt.

2.4. Korábbi számítások eredményei

A benchmarkban [3] résztvevők számításai, illetve a benchmarkot követően megjelent irodalom [6][7][8][9][10][11][12] változatos módszerfelhozatallal tárgyalja a feladat egyik fő karakterisztikus konklúzióját. A mérések azt mutatják, hogy a melegebb vizet betápláló hurok hűtőközegével való keveredés folytán a zónabelépésnél megfigyelhető, hogy a hőmérséklet-eloszlásban a melegebb terület egyrészt kiszélesedik, másrészt pedig az 1-es hurok áramlási centruma, azaz a minimális keveredési együtthatójú tartomány középvonala elcsavarodik a csomópont szöghelyzetéhez képest [3]. A Kozloduy Atomerőműben végzett mérések az elcsavarodás mértékét nagyjából $15 - 20^\circ$ -osra teszik, de egyes elvégzett szimulációk csak alábecsülvén azt, vagy egyáltalán nem mutatták ki az elcsavarodást, mások pedig nagyobb részletességű szimulációkkal tudták reprodukálni az effektust.

Az elcsavarodás létrejöttének és CFD számításokkal való nehéz kimutathatóságának okára többféle elmélet is létezik [6][7]:

1. A főkeringtető szivattyúk indukálnak egyfajta perdületet a hűtőközegnek, ami a leszálló gyűrűs csatornában, majd a zónabelépéseknél elcsavarodást, erős keveredést okoz. Egy kizárólag a reaktortartályt figyelembe vevő CFD modell alapvetően nem tartalmazza a szivattyúkat, így az elfordulást nem is reprodukálja.

2. A belépő peremfeltételek (sebesség, tömegáram, hőmérséklet) aszimmetrikus mivolta már önmagában okozhatja a keveredést és az elfordulást.
3. A zóna üzemzavari hűtőrendszer két csonkkal is rendelkezik a reaktortartályon, a hidegági csonkok magasságában. Ezeknek a jelenléte is okozhatja az elcsavarodást, a CFD modell viszont elhanyagolja ezek jelenlétét.
4. A csonkok kiosztása a valóságban erősen aszimmetrikus. A CFD számításokhoz használt modellek pedig a csonkok pontos szöghelyzeteit, illetve a tartály falához való csatlakozásnál lévő görbületeket nem, vagy csak közelítésekkel veszik figyelembe.

Például [8]-ban a szerzők RELAP5 és CFX-10 kódokkal is modellezték a keveredési problémát, de mindkét modell a kétegyenletes turbulenciamodellek alkalmazásával alábecsülte a turbulens keveredést, és egyik sem bizonyult alkalmasnak az elcsavarodási effektus kimutatására. [7]-ben a szerzők CFX-10 kóddal, kétegyenletes turbulenciamodellekkel dolgoztak, de vizsgáltak ún. upwind és high resolution numerikus sémákat is. Az upwind sémával egyáltalán nem reprodukálták az elcsavarodást, a high resolution sémával viszont egy kicsiny, 1° -os elfordulás kimutatható volt. [9] TrioU kóddal történt számítások után azt a konklúziót vonja le, hogy az elcsavarodás a leszálló gyűrűs csatorna hidraulikai instabilitásai, illetve a geometriabeli eltérések miatt alakul ki, mivel a kísérletekben tapasztalt elcsavarodást csak két feltétel teljesülésével tudták reprodukálni: Large Eddy Simulation turbulenciamodellt kellett alkalmazni, hiszen ez kezeli helyesen a hidraulikai instabilitásokat, illetve a valós geometriai adatokkal kellett felépíteni a modellt, nem pedig a benchmarkban alkalmazott, közelítéseket jócskán tartalmazó tervrajzokéval. [10] pedig kétféle áramlási tér geometriával dolgozott: az egyik csak a reaktortartályt vette figyelembe, a másik pedig egy zárt áramlási teret képezve az egész primerkört. A szivattyúk és a gőzfejlesztő ugyan geometriailag egyszerűsített modellekként, illetve a transzportváltozók térfogati forrásaiként, de figyelembe voltak véve a primerkörüi modellben. A keveredési struktúrát, és az elforduló hőmérsékleteloszlást egyik modell se tudta teljes mértékben valósághűen visszaadni, viszont a primerkör modellel elérhető lett az elcsavarodás megjelenése

- habár erősen túlbecsülve azt. Mind a primerkör, mind pedig a reaktortartálymodell reprodukálta a melegebb víz által befolyásolt régió kiszélesedését, a reaktortartály modell enyhén alábecsülve, a primerkör modell pedig eléggé túlbecsülve a befolyásolt szögtartományt. Egy 2024-ben megjelent tanulmány [12] szerzői már jóval nagyobb számítási kapacitásokat tudtak igénybe venni, illetve teljes reaktortartály modellt tudtak alkalmazni. Az elliptikus tartályfenékből való feláramlást, és a zóna egyes részein való áthaladást porózus közeg modellel írták le, és a befolyó csomópontnál impluzusmomentum forrást, tehát önkényesen megadott plusz örvénylest is megadtak peremfeltételnek, hogy a nem modellezett szivattyúk örvénykeltő hatását kompenzálják. Az így elemzett számítások jobban ki tudták mutatni az elcsavarodási effektust, amelyet az erőművi méréseknél is lehetett tapasztalni.

Saját számításaim [5] során az áramképet és az elcsavarodási effektust egy hidegági csomópont csatlakozásától zóna belépésig terjedő reaktortartály modellel reprodukáltam, megvizsgálva nem csupán egyszerű kétegyenletes turbulenciamodelleket, hanem összetettebbeket is, illetve a korábbi számítások során előkerülő cellaszám korlátokat átlépve, nagy felbontású hálókat is alkalmaztam. Tanulságos eredmény lehet, hogy az egyszerű turbulencia modellek, például a $k - \epsilon$ is sikeresen visszaadja a felmelegedett terület kiszélesedését, az SST pedig jól közelíti az elcsavarodás mértékét.

3. Áramlási tér modellezése

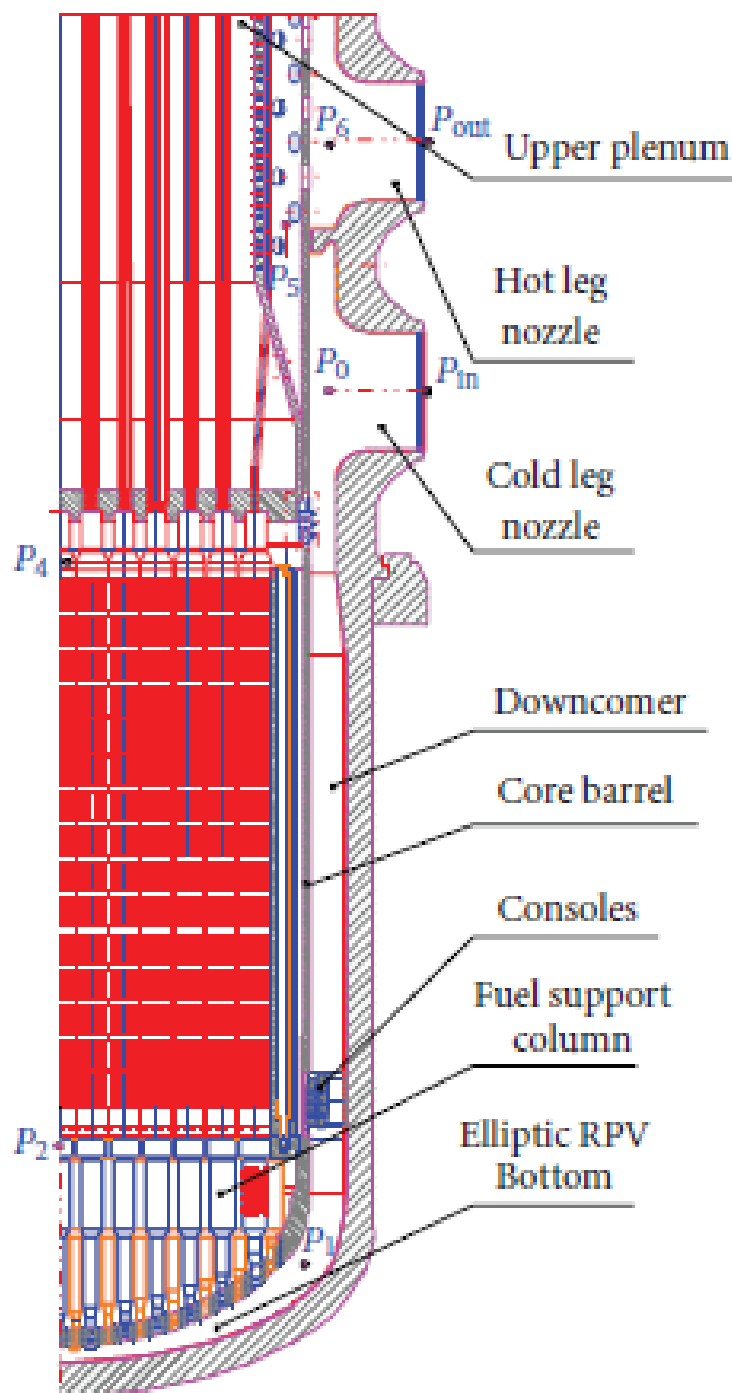
3.1. Reaktortartály geometria implementációja

A vizsgált áramlási teret az ANSYS ICEM CFD szoftver segítségével modelleztem a reaktortartály tervrajzai alapján. A megalkotott modell a hűtőközeg áramlásának irányában a hidegági csomagtól a zónatartó oszlopok felső végéig, azaz a zónabelépésig terjed. A 4. ábrán a reaktortartály főbb elemei, míg az 5. ábrán az általam megépített geometria főbb méretei láthatóak.

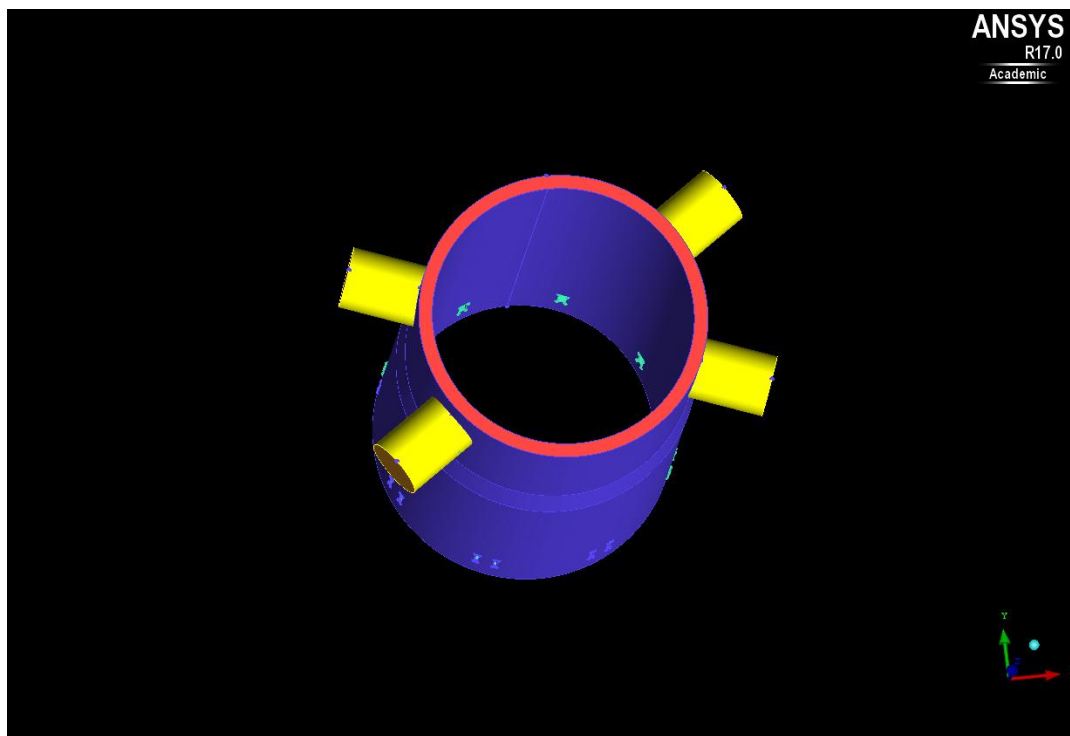
A reaktortartály modelljét két fő részben hoztam létre. A leszálló gyűrűs csatorna és az elliptikus alsó plénium - a zónatartó oszlopokkal együtt - két külön ICEM projektben lett megalkotva, melyeket utólag a CFX-Pre szoftver segítségével, ún. domain interface közbeiktatásával kapcsoltam össze a két tartálydarab határán. A külön-külön létrehozott tartományok modelljei a 6. és a 7. ábrán láthatóak.

3.2. Diszkretizáció

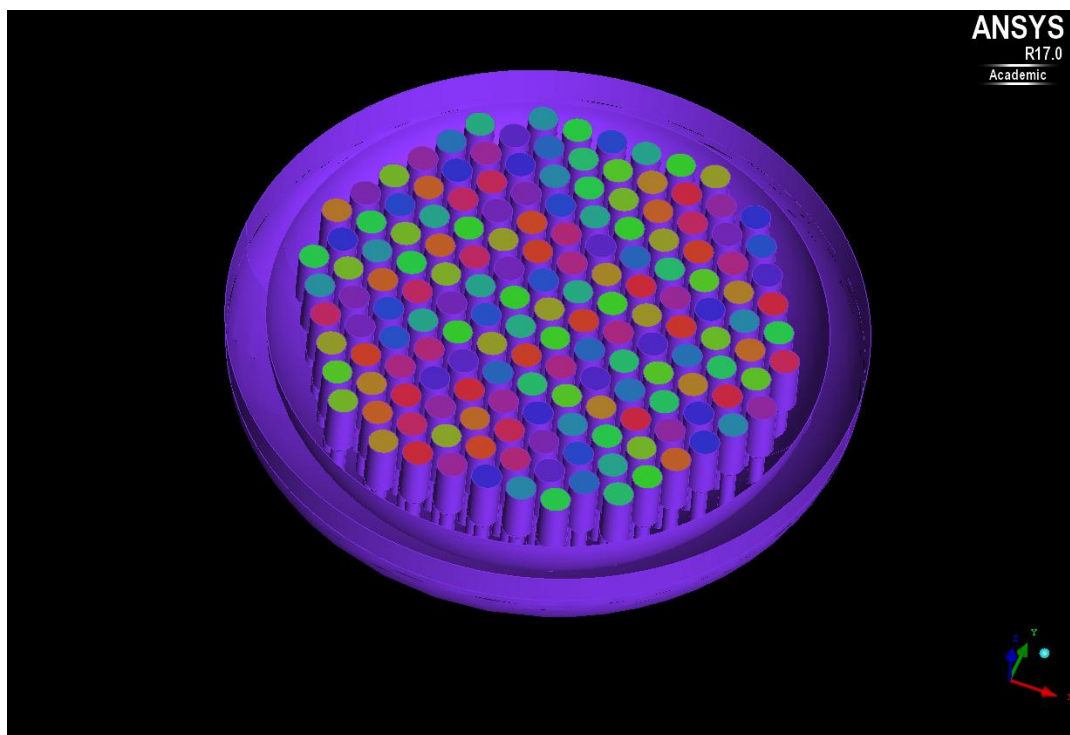
A geometria létrehozását követően, szintén az ANSYS ICEM CFD programban történt a numerikus háló generálása. A VVER-1000 reaktortartály esetében a hálózás módszerül a hibrid hálózást választottam, mivel a falak közelében lévő határrétegben szükségnek bizonyult a finom felbontású, a határoló felületek alakját nagy pontossággal követő struktúra. A nagyméretű és összetett geometria miatt a hexaéder hálótípus létrehozásánál jóval kevésbé időigényes tetraéder elemekkel való diszkretizációt választottam, a falak melletti régiókban prizma típusú elemekkel.



4. ábra. A VVER-1000 függőleges fél síkmetszeti rajza, és a tartály főbb részei fentről lefelé: felső plénium, melegági csont, hidegági csont, leszálló csatorna, zóna-tartály, tartóbakok, tartóoszlopok [11]



6. ábra. A geometria felső részének ICEM-modellje. Sárga: hidegági csonkok; türkíz: tartóbakok; kék: a leszálló gyűrűs csatorna külső és belső fala. [5]

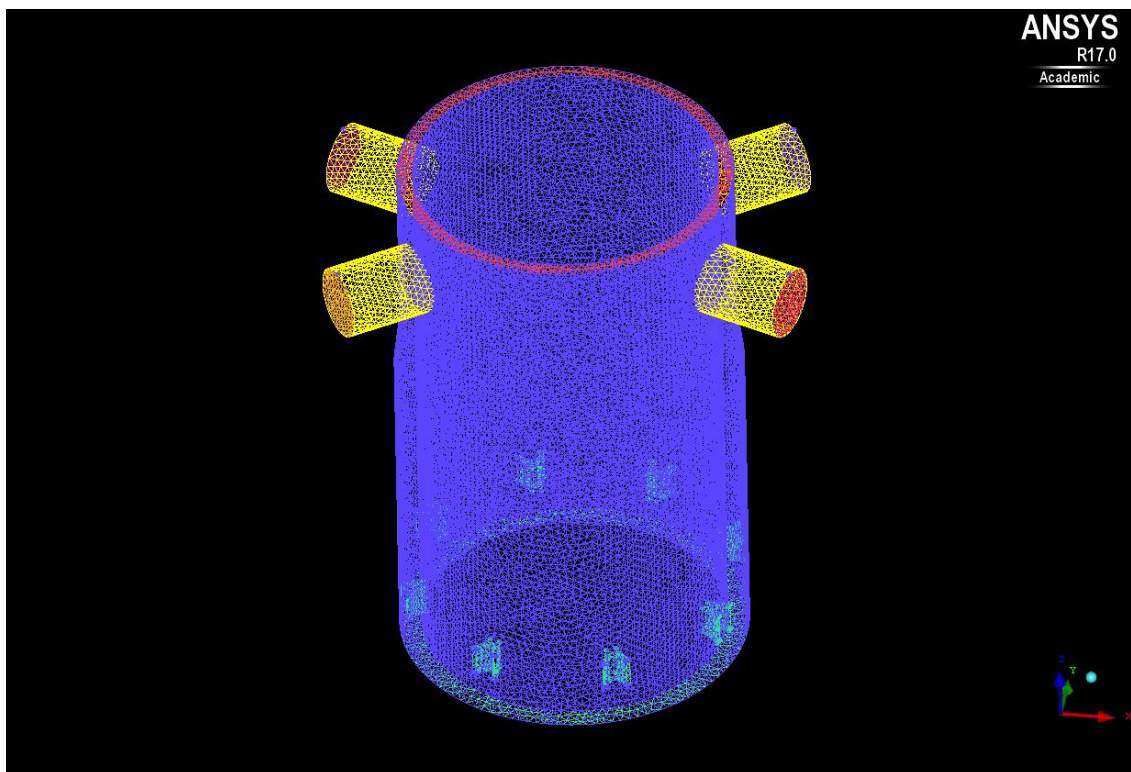


7. ábra. Elliptikus alsó plénum ICEM-modellje. Lila: elliptikus alsó lemez, perforált alsó lemez, tartóoszlopok; színesen: zónabelépési (kiáramlási) felületek. [5]

A CFD szimulációk hálófelbontásra való érzékenységének vizsgálata céljából öt különböző maximális cellamérettel készítettem hálókat a geometria felső tartományára, a leszálló gyűrűs csatornába. A legdurvább háló 150 mm, a legfinomabb pedig 25 mm maximális elemméretű tetraédereket tartalmaz. Ezek mellett 100, 75 és 50 mm-es cellákból álló hálókon is végeztem számításokat. Mivel elsősorban azt vizsgáltam, hogy a leszálló gyűrűs csatorna diszkretizációjának milyen hatása van a hőmérséklet-eloszlásra, ezért csak ebben a térrészben végeztem hálófüggetlenségi vizsgálatot. Feltételezésem szerint a zóna belépésnél kialakuló hőmérséklet-eloszlást elsősorban a leszálló gyűrűs csatornában lezajló hűtőközeg-keveredési folyamatok határozzák meg, így az elliptikus alsó plénusra egységes felbontással készítettem hálót 25 mm maximális elemmérettel.

Maximális cellaméret [mm]	Nódusszám [db]	Elemszám [db]
150	131232	306984
100	316526	798489
75	582767	1573945
50	1425797	4251568
25	6954004	24358439

3. táblázat. A leszálló gyűrűs csatornára létrehozott hálók maximális cellaméretei, nódusszámai és elemszámai. [5]



8. ábra. VVER-1000 reaktortartály felső részének 100 mm maximális elemméretű hálóját.[5]



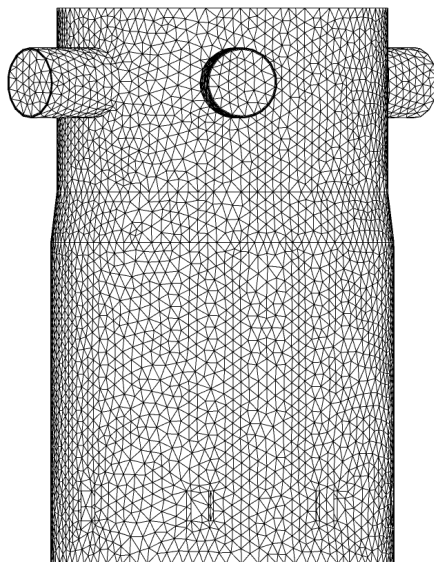
9. ábra. VVER-1000 reaktortartály alsó plenumjának hibrid hálóját.[5]

A tetraéder háló létrehozása nagyrészt automatizáltan történt, majd a CFD módszer hálózásra vonatkozó irányelveinek[4] megfelelően, a cellák élei által bezárt szögeket, és a túlzott mértékű elemméretbeli ugrások elkerülését elfogadási kritériumnak beállítva ötlépéses simítás, hálófinomítás került alkalmazásra. A falnál egészen finom, attól távolodva geometriai sorozatot alkotó elemméretű strukturált határréteg-háló került kialakításra. Az első cella faltól vett távolságát 0,05 mm-re állítottam. A határréteg háló összesen 10 rétegből áll, 1,8-as növekedési faktor alkalmazása mellett. A létrehozott, különböző felbontású hálókat a 10-14. ábrák szemléltetik. [5]

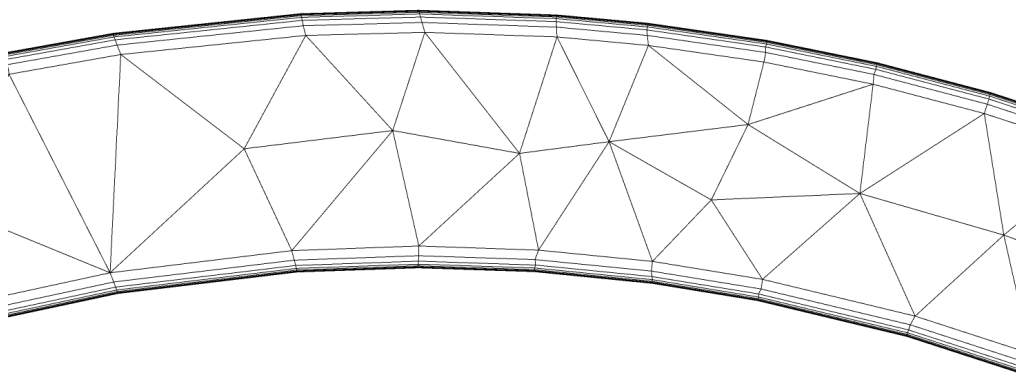
4. Hálófüggetlenségi vizsgálat

Az eredmények hálófelbontástól független mivoltát öt különböző felbontás - 25, 50, 75, 100 és 150 mm maximális cellaméret - mellett az SST turbulencia modellel való számítások segítségével vizsgáltam. A hálófüggetlenségi vizsgálat során a geometria felső részének (leszálló gyűrűs csatorna) felbontását változtattam, az elliptikus alsó plénomot tartalmazó tartomány hálózása egységes maradt. A hálók elemszámai a kicsivel több, mint 300 ezer cellától a majdnem 24,5 millióig terjednek (3. táblázat), így kijelenthetem, hogy igen széles felbontástartományt fednek le a vizsgált hálók.

A hálófüggetlenségi vizsgálat állandósult állapotban végzett számításainak lefuttatása után a leszálló gyűrűs csatornába, három különböző magasságba elhelyezett monitorpontokon számolt, konvergencia beállta után hálónként átlagolt hőmérsékleteket vettem össze. A monitorpontok elhelyezkedése a 15. ábrán látható.

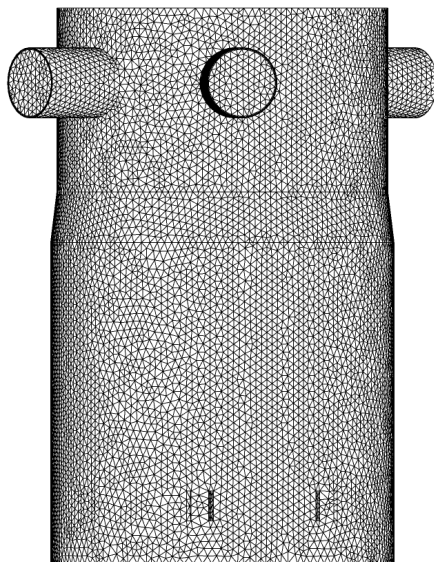


(a) 150 mm maximális cellaméretű háló felületi hálójának képe a leszálló gyűrűs csatorna tartományában.[5]

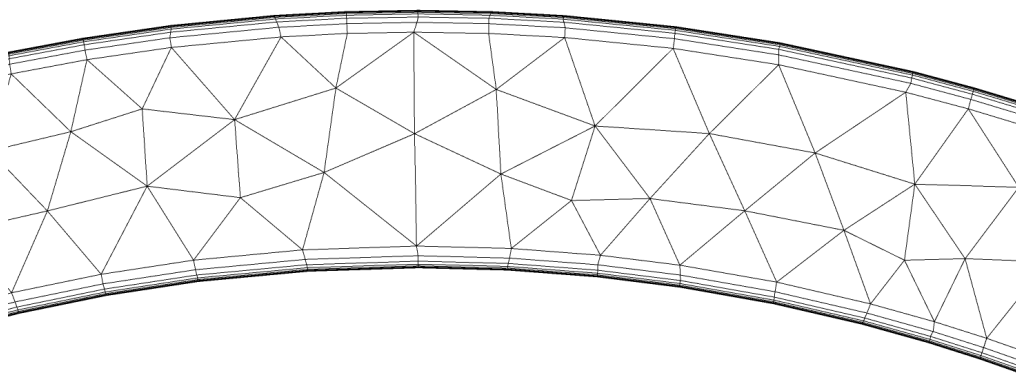


(b) 150 mm maximális cellaméretű háló térfogati hálójának képe a leszálló gyűrűs csatorna tartományában.[5]

10. ábra

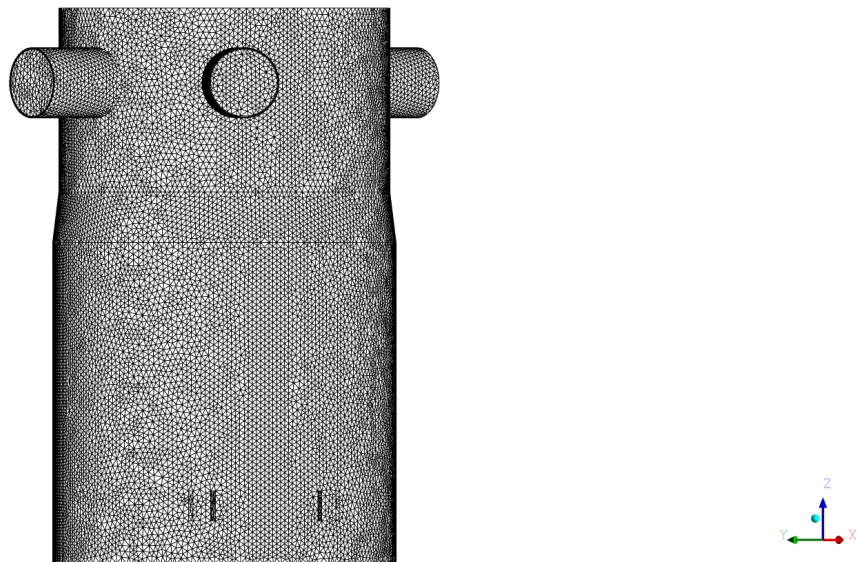


(a) 100 mm maximális cellaméretű háló felületi hálójának képe a leszálló gyűrűs csatorna tartományában.[5]

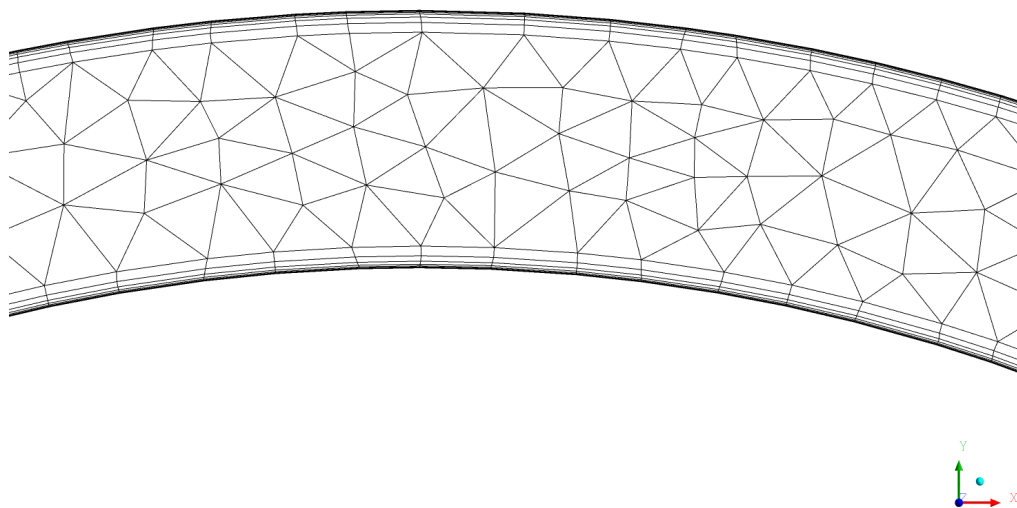


(b) 100 mm maximális cellaméretű háló térfogati hálójának képe a leszálló gyűrűs csatorna tartományában.[5]

11. ábra

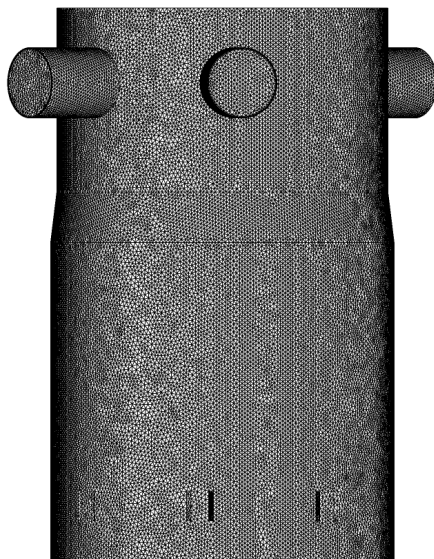


(a) 75 mm maximális cellaméretű háló felületi hálójának képe a leszálló gyűrűs csatorna tartományában.[5]

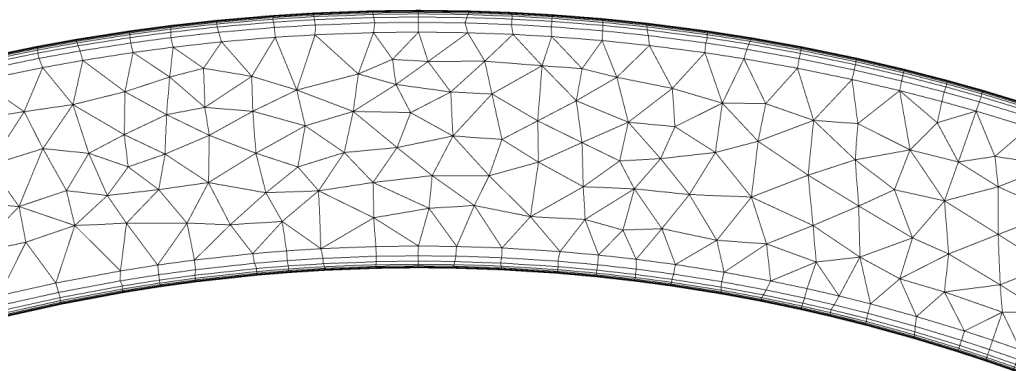


(b) 75 mm maximális cellaméretű háló térfogati hálójának képe a leszálló gyűrűs csatorna tartományában.[5]

12. ábra

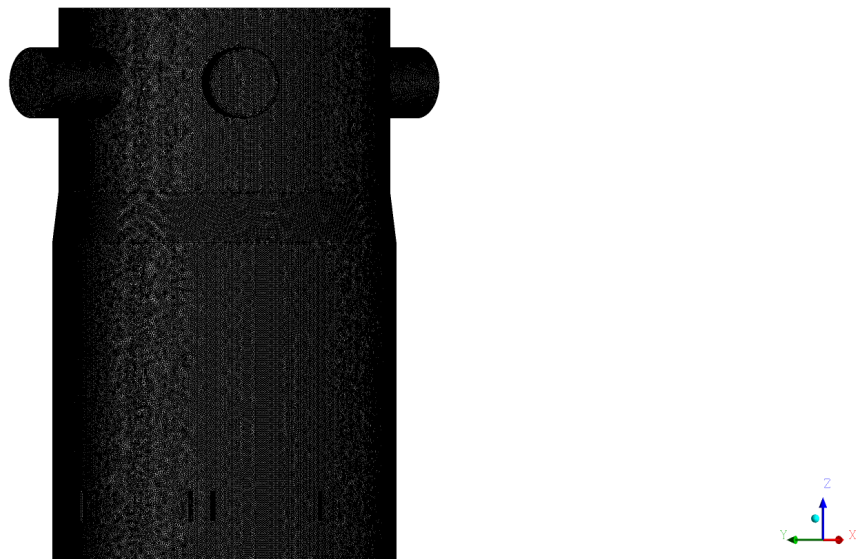


(a) 50 mm maximális cellaméretű háló felületi hálójának képe a leszálló gyűrűs csatorna tartományában.[5]

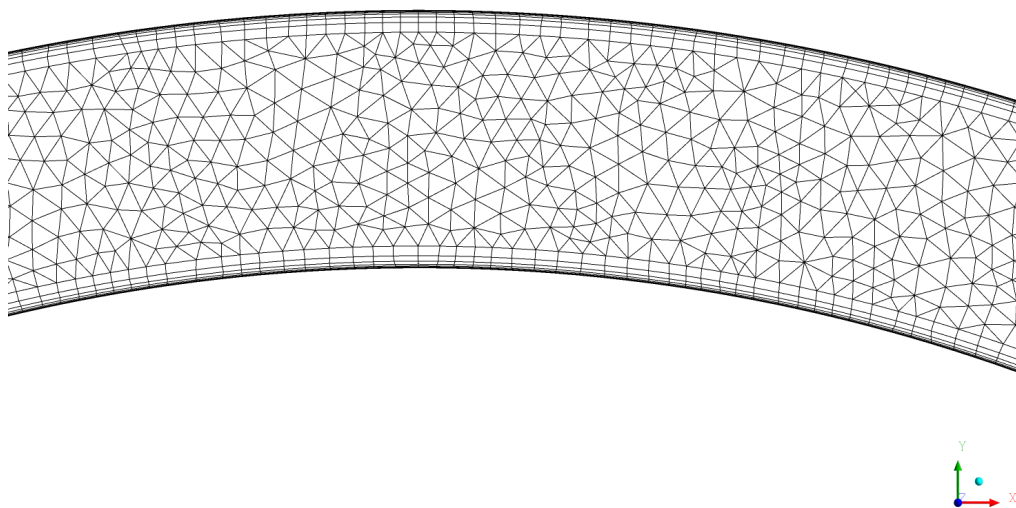


(b) 50 mm maximális cellaméretű háló térfogati hálójának képe a leszálló gyűrűs csatorna tartományában.[5]

13. ábra

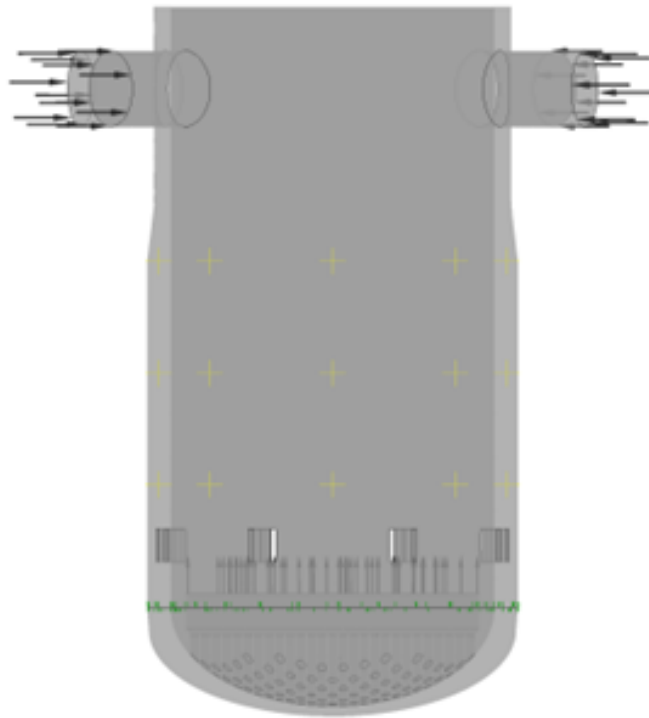


(a) 25 mm maximális cellaméretű háló felületi hálójának képe a leszálló gyűrűs csatorna tartományában.[5]



(b) 25 mm maximális cellaméretű háló térfogati hálójának képe a leszálló gyűrűs csatorna tartományában.[5]

14. ábra



15. ábra. A leszálló gyűrűs csatorna monitorpontjainak elhelyezkedése (sárga keresztrel jelölve).[5]

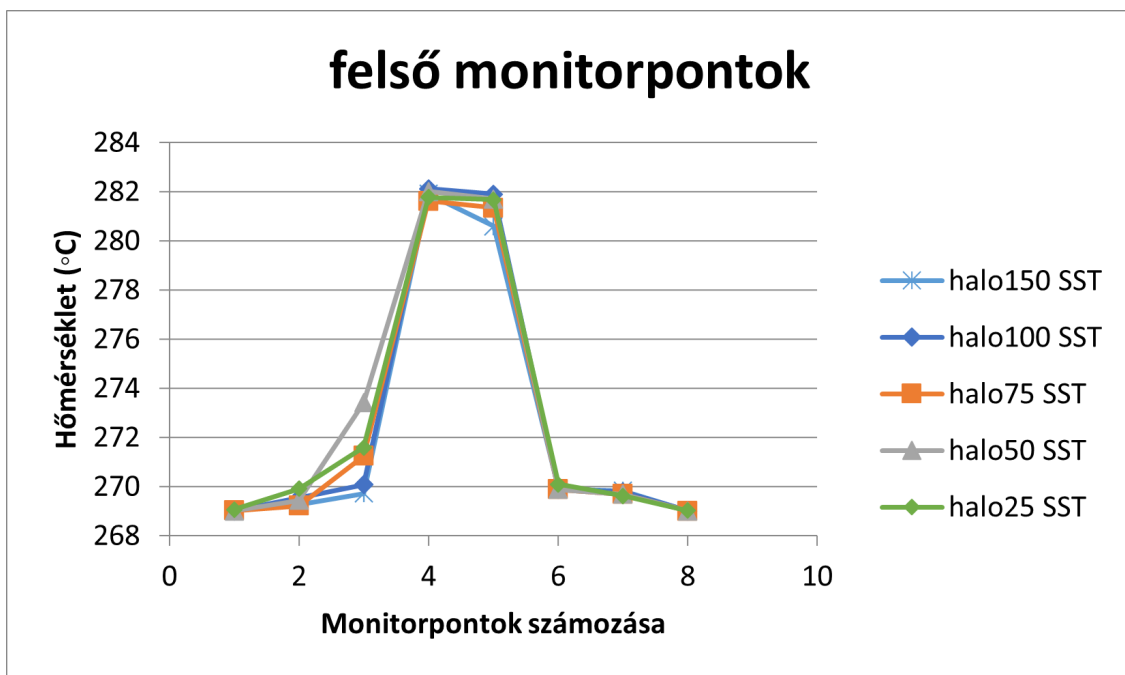
4.1. Hőmérséklet-eloszlás felbontásérzékenységének vizsgálata

A kapott adatok tanulmányozásával megállapíthatjuk, hogy az így kirajzolt grafikonok egymásra hasonlítanak, jól megfigyelhető a melegebb vizet betápláló csanak alatti terület felmelegedése.

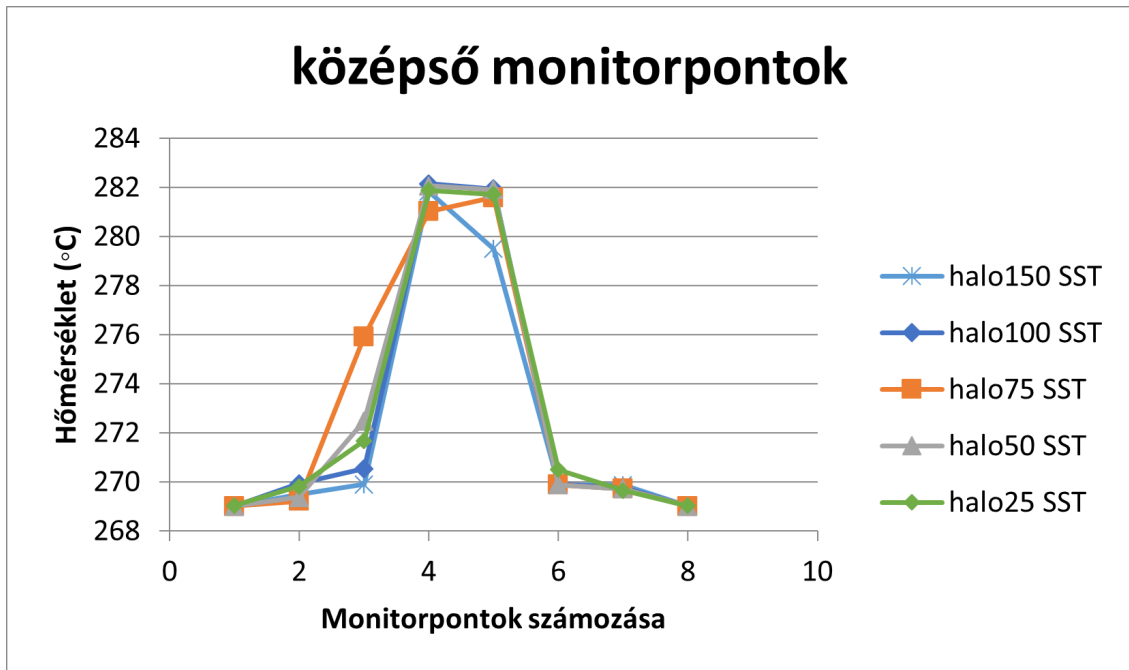
A monitorpontok hőmérsékletgrafikonjai (16-18. ábrák) alapján azt mondhatjuk, hogy a 75-ös és a 150-es háló mutat néhol igencsak szembetűnő (akár $6^{\circ}C$ -os) eltéréseket is, de a többi hálón meglehetősen jól egyező hőmérsékleteket kaptam.

Érdemes még megvizsgálni a leszálló gyűrűs csatorna külső felületén a hőmérséklet-eloszlásokat. A 19. ábra alábráin látszanak a különböző felbontások alkalmazásával, ugyanazon (SST) turbulencia modellel kapott eloszlások. Megfigyelhetjük, hogy eltérőek a kirajzolódó képek: A 75-ös háló olyan szempontból kiugrónak látszik,

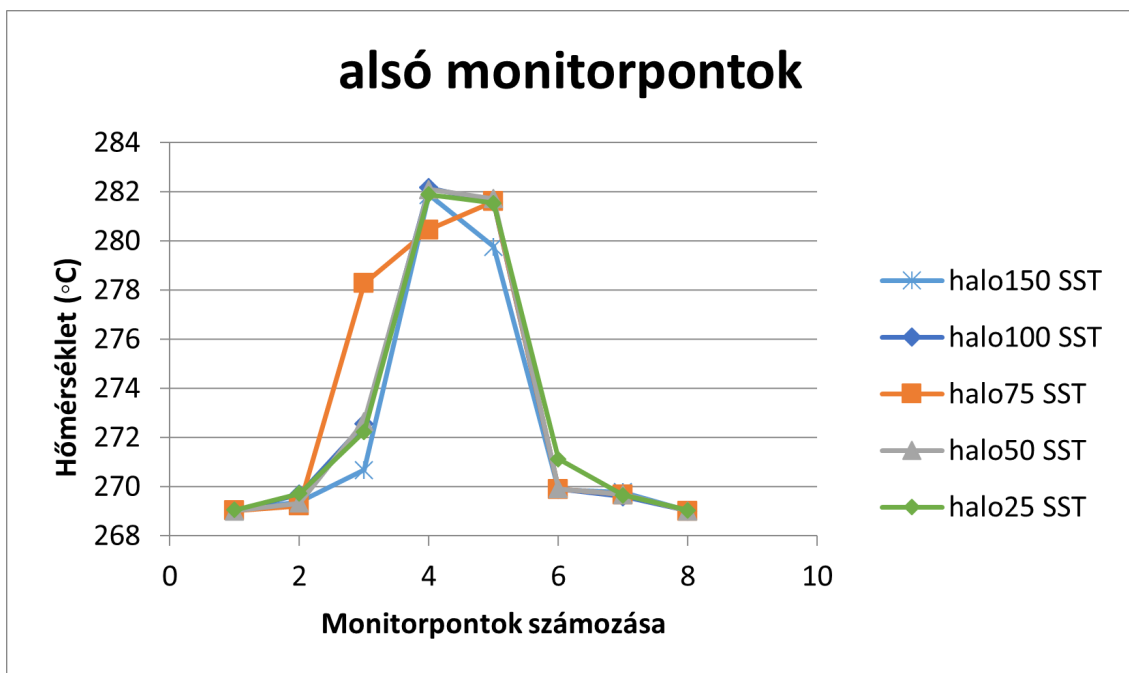
hogy a melegebb (1-es számú) csomak alatti régióknak csak a jobb felén alakul ki szignifikánsan magasabb hőmérséklet, mintha a hőmérsékleti profil elfordulása már szinte a csomak magasságában megtörténne. A többi háló ebben a tekintetben egymáshoz hasonlóbb eredményeket ad: a csomak mindkét oldalán jelentős a hőmérséklet növekedése, a legmagasabb hőmérsékletű rész pedig a lefelé áramlás során láthatóan jobbra tolódik kissé, ami a következő fejezetben bemutatásra kerülő kilépő keresztmetszeti ábrákon egy óramutató járásával ellentétes elcsavarodásként fog jelentkezni. A 25-ös háló igen éles válaszvonalat, azaz nagy lokális hőmérséklet-gradienseket jósol a melegebb és hidegebb régiók közé. Ezek miatt a jelentős különbségek miatt még nem jelenthető ki hálófüggetlenség, további szempont megvizsgálása szükséges. Továbbá fontos kiemelni, hogy a 19. ábrán bemutatott hőmérséklet-eloszlások a számítás utolsó lépésében lévő aktuális eloszlást mutatják.[5]



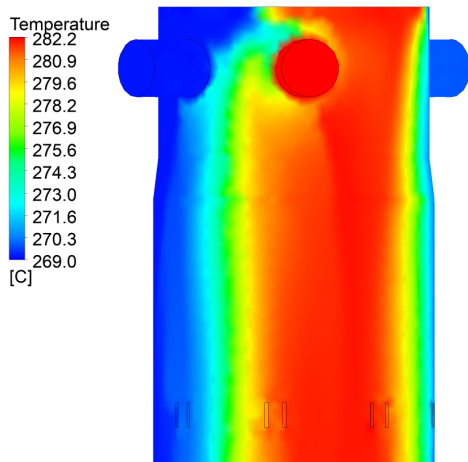
16. ábra. Az SST turbulencia modellel végzett számításokkal kapott, a leszálló gyűrűs csatornában elhelyezett felső monitorpontokban átlagolt hőmérsékletek.[5]



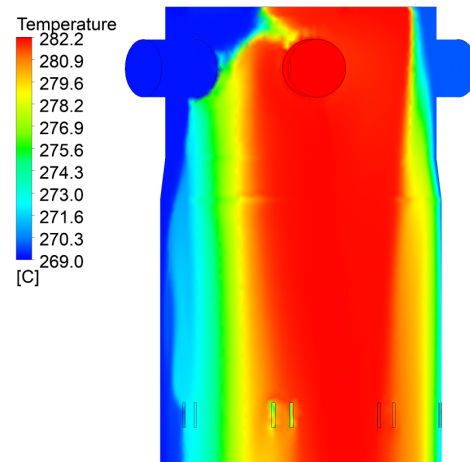
17. ábra. Az SST turbulencia modellel végzett számításokkal kapott, a leszálló gyűrűs csatornában elhelyezett középső monitorpontokban átlagolt hőmérsékletek.[5]



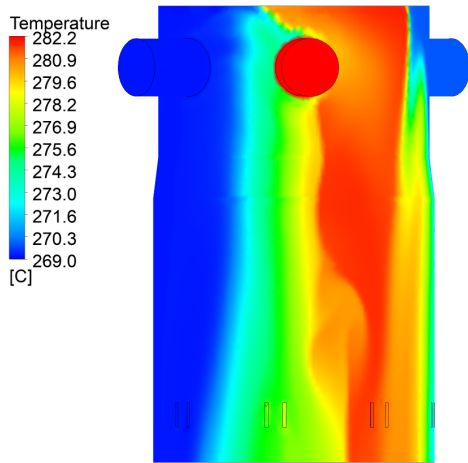
18. ábra. Az SST turbulencia modellel végzett számításokkal kapott, a leszálló gyűrűs csatornában elhelyezett alsó monitorpontokban átlagolt hőmérsékletek.[5]



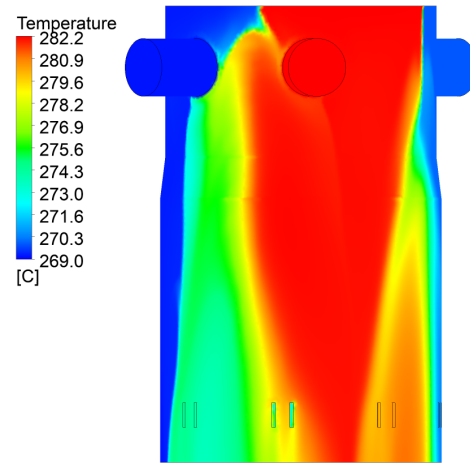
(a) 150 mm maximális elemméretű háló



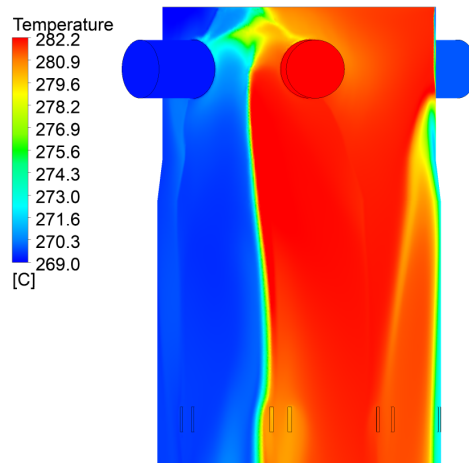
(b) 100 mm maximális elemméretű háló



(c) 75 mm maximális elemméretű háló



(d) 50 mm maximális elemméretű háló



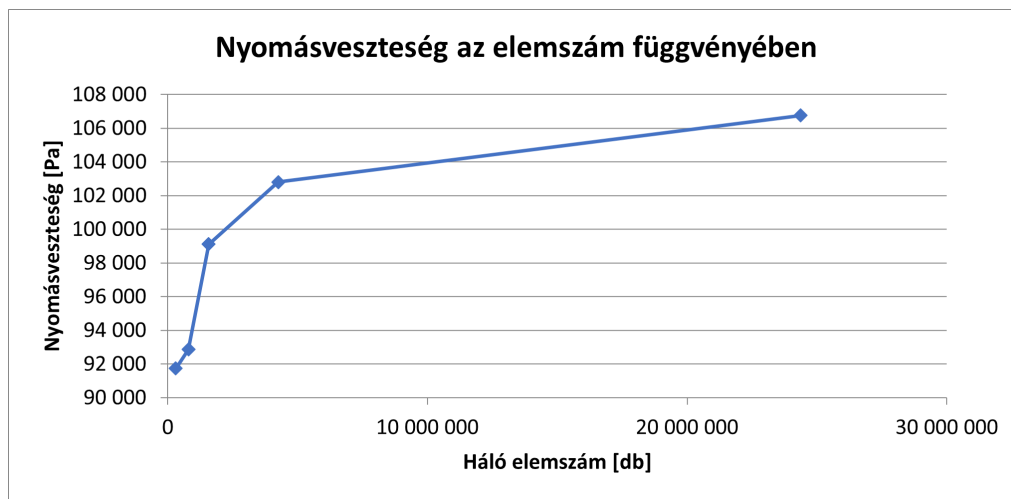
(e) 25 mm maximális elemméretű háló

19. ábra. Különböző hálófelbontások mellett, az SST turbulencia modellel kapott hőmérséklet-eloszlások a leszálló gyűrűs csatornában, az 1-es számú csomakörnyezetében.[5]

4.2. Nyomásveszteség felbontásérzékenységének vizsgálata

A hőmérséklet melletti második összehasonlítási szempontnak a belépő csanakok és a leszálló gyűrűs csatorna alja közötti térrészben számolt nyomásveszteséget vettem. A 20. ábrán és a 4. táblázatban látható, hogy az elemszám növekedésével a számított nyomásveszteség is növekszik, az egyre nagyobb elemszámú (azaz egyre finomabb) hálókkal kapott értékek pedig egy telítődési tendenciát mutatnak. Ebből megalapozottan lehet következtetni arra, hogy a 25-ös hálónál is finomabb hálókra már nem kapnék szignifikánsan nagyobb értékeket, egy bizonyos elemszám után jó közelítéssel beállna egy kvázi állandó érték köré a nyomásveszteség. Ez fizikai értelmezésben is helyes gondolatnak mondható, hiszen egy elméletileg végtelen nagy felbontású, azaz infinitezimális elemméretű háló nem más kell hogy adjon, mint magát a valóságot, ezért a további hálófinomítással konvergálnánk egy elméleti határérték felé. A 25 mm-es hálónál finomabb felbontású hálót nem sikerült létrehoznom a rendelkezésre álló számítógépi kapacitás korlátossága miatt.

[5]



20. ábra. Nyomásveszteség a hálók elemszámának függvényében.[5]

A hőmérsékletek vizsgálatánál kimondott hálófüggetlenség mellé társul, hogy a nyomásveszteségek egymáshoz képest maximum 15 kPa eltérést mutatnak, ami a referencianyomáshoz (15,7 MPa) képest egy ezres nagyságrenddel kisebb, nem jelentős. Ez is alátámasztja, hogy a modellem hálófüggetlenségi vizsgálata sikeres, és kívá-

Maximális elemméret [mm]	Háló elemszáma [db]	Nyomásveszteség [Pa]	Legfinomabb hálóhoz képesti eltérés
150	306 984	91 727	14,07%
100	798 489	92 858	13,01%
75	1 573 945	99 100	7,16%
50	4 251 568	102 799	3,70%
25	24 358 439	106 745	0,00%

4. táblázat. Nyomásveszteség a hálók elemszámának függvényében

laszthatok egy alkalmas hálófinomságot, amellyel tovább tárgyalhatom a vizsgált fizikai problémát. A nyomásveszteség előbbieken tárgyalt, szaturálódó tendenciáját nézve érdemes a legnagyobb elemszámú, legfinomabb, 25 mm maximális cellaméretű hálót választani. A továbbiakban tehát, ezzel a felbontással vizsgáltam a hűtőközeg keveredését. [5]

5. Elvégzett számítások

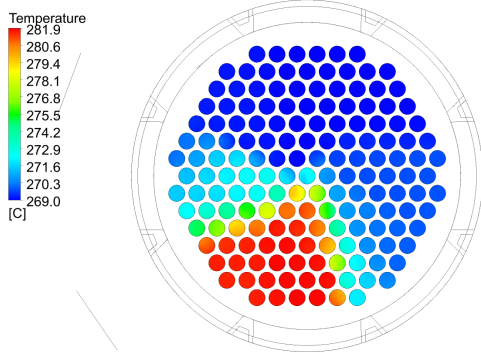
5.1. Turbulencia modell kiválasztása

A reaktortartályban lejátszódó hűtőközeg keveredési effektus megfelelő módon történő vizsgálatára egy erre alkalmas turbulencia modellt szükséges kiválasztani. A Reynolds-átlagolt Navier-Stokes modellfajták közé tartozik például a $k - \epsilon$ modell [13], amely a k turbulens kinetikus energiát, és az ϵ turbulens kinetikus energia disszipációs arányát veszi transzportváltozónak, azaz két megoldandó egyenlettel járul hozzá a meglévőkhöz. A turbulens viszkozitás izotrópiáján alapulván, a modell jellemzően a falaktól távol, szabadabb áramlásoknál ad jó megoldást. A viszkózus alaprétegekben, illetve lamináris-turbulens áramlási átmeneteknél a $k - \omega$ turbulencia modell [13] jelenthet megfelelő megoldást. Itt a második transzportváltozó a turbulens kinetikus energia hővé történő disszipációját leíró ω specifikus disszipációs arány. Az előbbi két turbulencia modell előnyeit ötvözi a nyírófeszültség-transzport (angolul: SST - Shear Stress Transport) modell [14]. Ez lényegében, a fal melletti határrétegben $k - \omega$, azon kívül pedig tulajdonképpen $k - \epsilon$ modell szerint működik. Az SST ugyancsak kétegyenletes turbulencia modell.

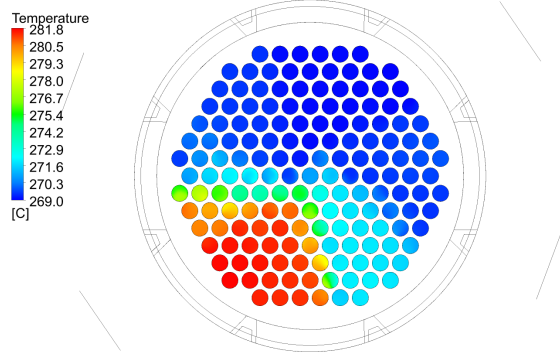
Az SST-nek a skálaadaptív szimulációs (angolul: SAS - Scale Adaptive Simulation) variációja, a SAS-SST a falak közelében Reynolds-átlagolt, transzportegyenletre épülő modellt, míg a falaktól távoli térrészekben LES (Large Eddy Simulation) modellt alkalmaz és hálómérettől függően bontja fel az örvényeket. Vannak olyan turbulencia modellek is, amelyek nem az örvényviszkózitáson alapszanak, hanem egyenesen a Reynolds-feszültség transzportegyenleteinek megoldásán és direkt számítják ki a Reynolds-feszültség tenzor elemeit. Egy ilyen modell például az SSG Reynolds-feszültség modell.

Korábbi saját számítások [5] eredményeképpen, a különböző turbulencia modellekkel történő számítások érdekes tendenciát mutattak. Megállapítható, hogy egy nagy elemszámú, megfelelő felbontású numerikus hálón az egyszerűbb turbulencia modellek pontosabban adják vissza a mérések során kapott hőmérséklet-eloszlást a benchmarkban [3] tárgyalt hűtőközeg keveredési problémánál. A turbulencia modellre való érzékenység vizsgálatának eredményeit és a zónabelépéseknél (modell konvenciója szerint kilépő felületeknél) mért hőmérséklet-eloszlást a 21. ábra hőmérsékleti zónatérképei mutatják.

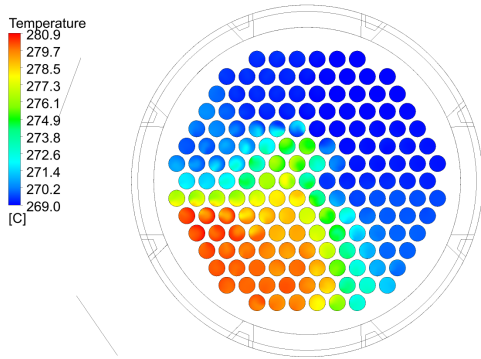
Míg a $k - \epsilon$ modellel állandósult állapotban végzett számítás eredményeképpen egy nagyjából 144° -os szögű felmelegedett területet látunk, melynek legnagyobb hőmérsékletet mutató régiója 37° -kal az óramutató járásával ellentétes irányba térül el az 1-es számú hurok betápláló csonkjához képest, addig az SST turbulencia modellel a felmelegedett tartomány 165° központi szögű, és az elcsavarodás 26° -nak adódik. Az állandósult állapotban végzett SSG-Reynolds-feszültség modelles számítás és a tranziens SAS-SST modelles számítások nem mutatják ki különösebben a hőmérsékleti profil elcsavarodását, és a felmelegedett terület kiszélesedése is igen túlbecsüli a méréseknél láthatót. Ugyanakkor fontos megjegyezni, hogy utóbbi megállapítások az utolsó időpillanatra igazak. Az örvények időbeli alakváltozásának hatását időátlagolással lehetne kompenzálni, azonban erre a SAS-SST turbulencia modellel elvégzett számításnál nem került sor.



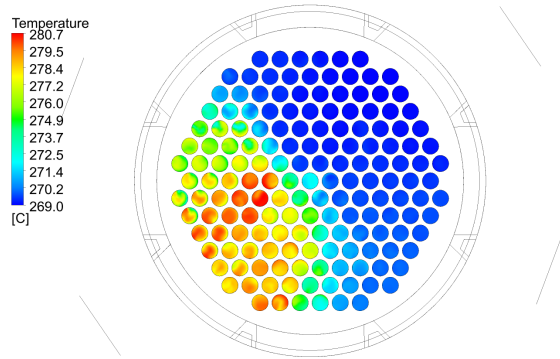
(a) Hőmérséklet-eloszlás a kilépő felületeken $k - \epsilon$ turbulencia modellel.



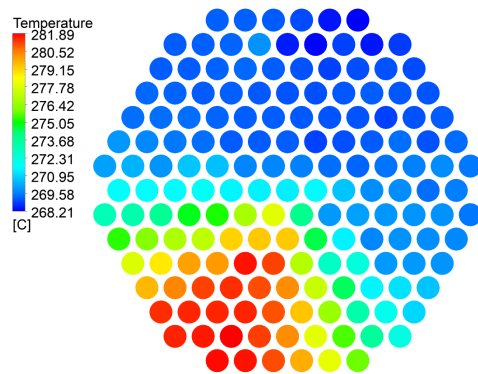
(b) Hőmérséklet-eloszlás a kilépő felületeken SST turbulencia modellel.



(c) Hőmérséklet-eloszlás a kilépő felületeken SSG-Reynolds-feszültség turbulencia modellel.



(d) Hőmérséklet-eloszlás a tranziens utolsó időpillanatában, a kilépő felületeken SAS-SST turbulencia modellel.



(e) Mért[3] hőmérséklet-eloszlás a kilépő felületeken.

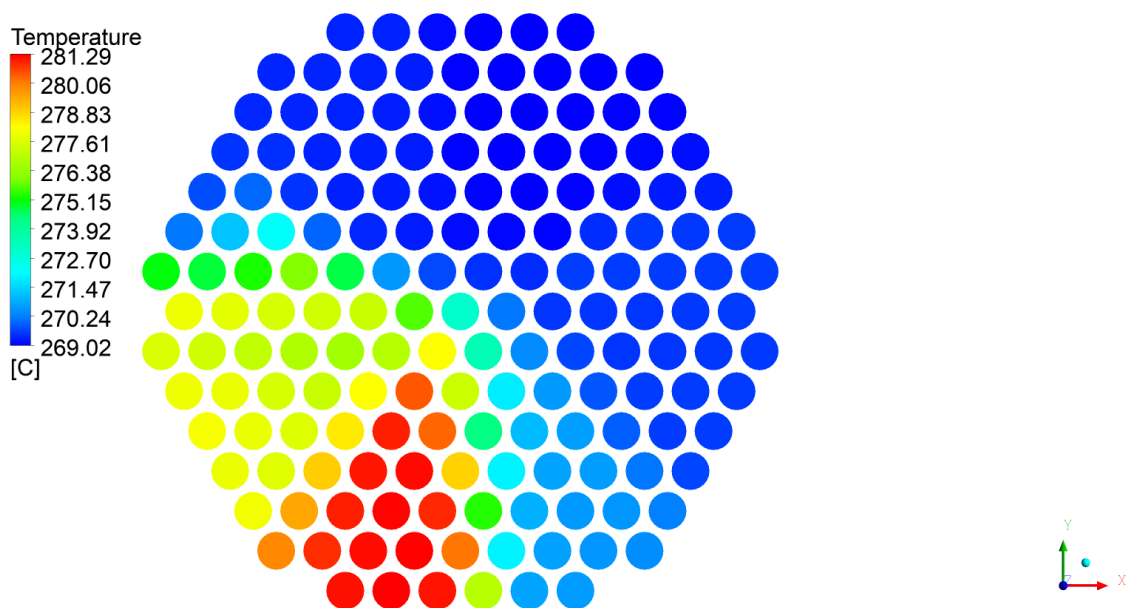
21. ábra. 25 mm maximális elemméretű hálóval, különböző turbulencia modellekkel kapott hőmérséklet-eloszlások a zónabelépéseknél [5], és a mért[3] hőmérséklet-eloszlás.

Ezeknek megfelelően a keveredési effektus további vizsgálatára alkalmas választás lehet mind a $k - \epsilon$, mind pedig az SST turbulencia modell, azonban az elcsavarodás reprodukálására való kompatibilitásokat tekintve a hálófüggetlenségi vizsgálat során is használt SST turbulencia modell bizonyul alkalmasabbnak.

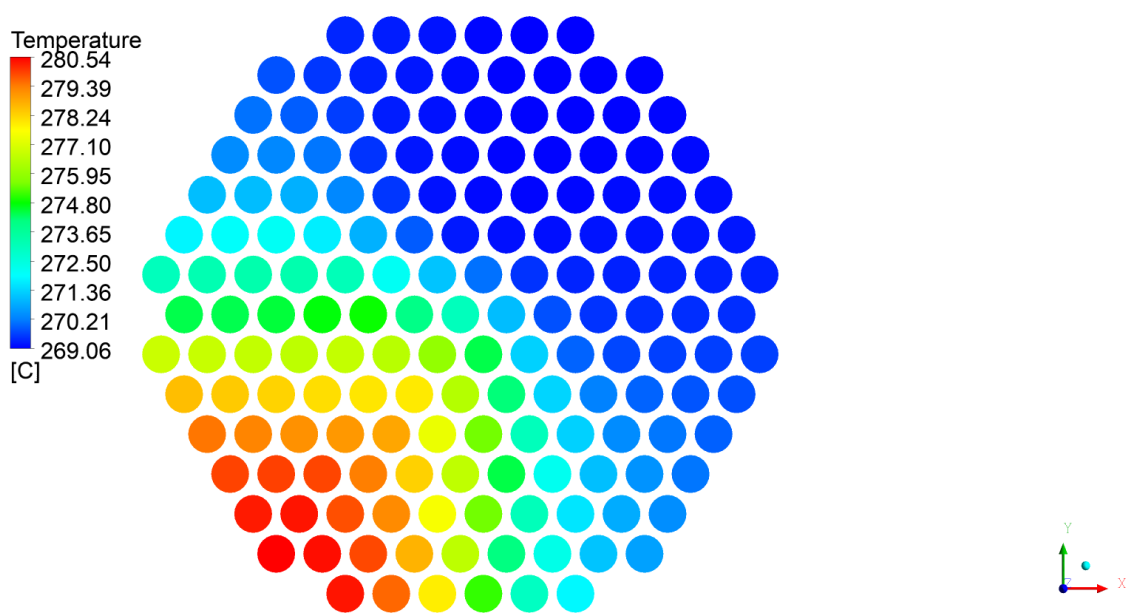
5.2. Számítások a benchmarkban használatos geometriával

A numerikus háló felbontásának és a turbulencia modellnek a kiválasztása után a benchmarkban használatos csomakkiosztást alkalmazó geometrián végeztem egy-egy számítást állandósult állapotban és tranziens módban. Fontos megemlítenem, hogy a tranziens számításban a peremfeltételek állandóak voltak, csak a keveredési folyamat időbeliségét vizsgáltam ezzel a módszerrel. A tranziens számítás során 30 másodperc hosszúságú időtartamot vizsgáltam 0,02 másodperces felbontással. Mindkét szimuláció a 25 mm maximális cellaméretű hálón, SST turbulencia modellel készült. A zónabelépésnél kialakuló hőmérséklet-eloszlások a 22. és 23. ábrán láthatóak.

Állandósult állapotú számítások esetén, a konvergencia beállta után 1000 iteráció hőmérsékleti adatainak, tranziens számításoknál pedig szintén az utolsó 1000 időlépés hőmérsékleteinek átlaga került feljegyzésre és ábrázolásra. Az állandósult állapotú számítással a legnagyobb hőmérsékletű régió azimutális elfordulása az 1-es számú csomak pozíciójához képest (elcsavarodás) 39° , a felmelegedett terület pedig 161° kiterjedésű. A tranziens számítással ezek az értékek rendre 23° és 157° -nak adódnak.



22. ábra. A benchmarkban használatos geometrián végzett, állandósult állapotú számítás hőmérséklet-eloszlás eredménye a zónabelépésnél.

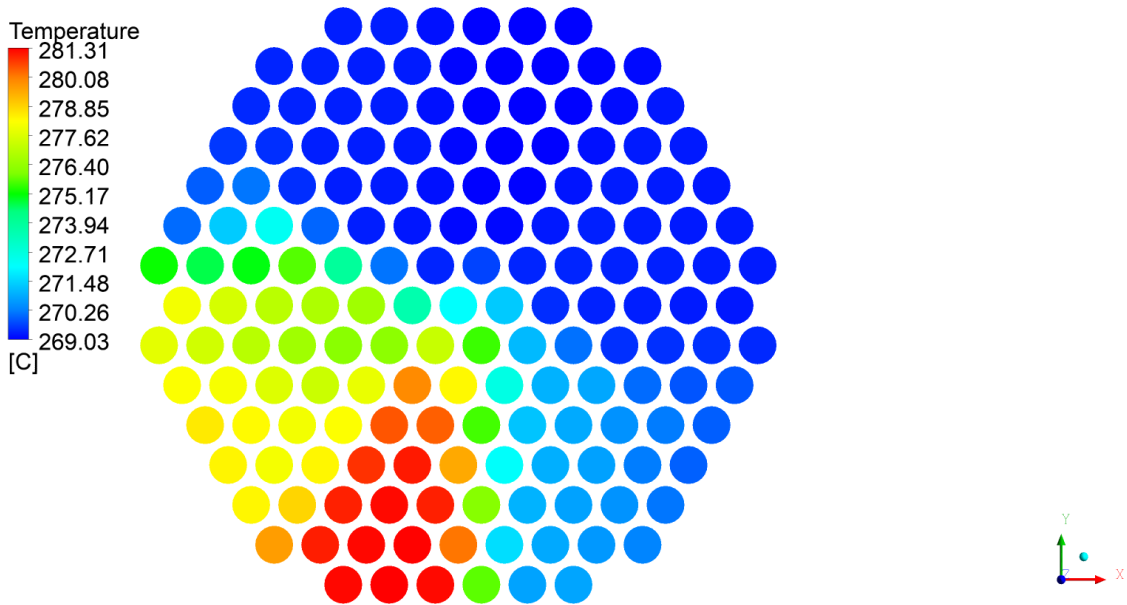


23. ábra. A benchmarkban használatos geometrián végzett, tranziens számítás hőmérséklet-eloszlás eredménye a zónabelépésnél.

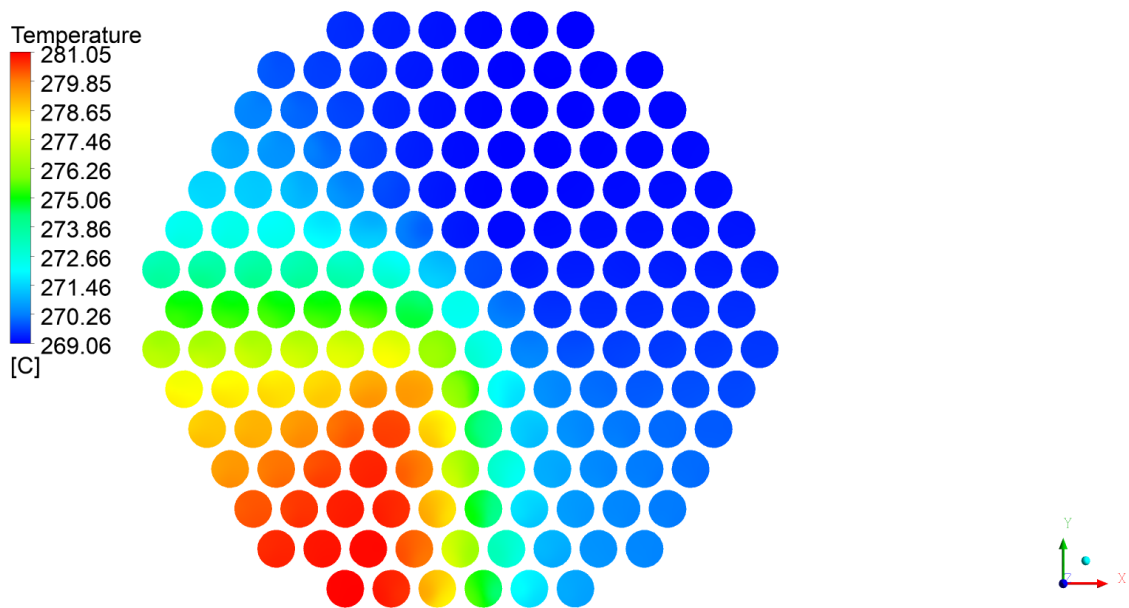
5.3. Számítások geometriai közelítések részleges elhagyásával

A csomkiosztásban tett közelítések elhagyásának hatását ugyancsak SST turbulencia modellel, és egy - a csomkiosztás szerint módosított térbeli elrendezésű - 25 mm maximális cellaméretű hálón végzett állandósult állapotú és tranziens jellegű számítással modelleztem. A tranziens számítás hossza ebben az esetben is 30 másodperc volt, az alkalmazott időlépést 0,02 másodpercre állítottam. A csomkpozíciók így a 2. táblázatban jelzett "valódi értékek" szerint lettek definiálva, míg a peremfeltételek változatlanul az 1. táblázatban leírtaknak feleltek meg. A számítások eredményeit a zónabelépési hőmérséklet-eloszlásra a 24. és 25. ábrák szemléltetik.

A hőmérsékletek az utolsó 1000 iteráció, vagy időlépés adatainak átlagai. Az elcsavarodás mértéke és a felmelegedett terület központi szögének nagysága állandósult állapotú számítással rendre 40° és 149° , tranzienssel 30° és 164° .



24. ábra. A valóságos csomkpozíciókat alkalmazó geometrián végezett, állandósult állapotú számítás hőmérséklet-eloszlás eredménye a zónabelépésnél.



25. ábra. A valóságos csomópontokat alkalmazó geometrián végzett, tranziens számítás hőmérséklet-eloszlás eredménye a zónabelépésnél.

6. Számítási eredmények összehasonlítása a mért hőmérsékletekkel

A szimulációkkal kapott hőmérséklet-eloszlásokat elsősorban a mérési eredményektől való eltérések szempontjából szükséges vizsgálni, majd egymással összehasonlítani. A 26-29. ábrák (a) alábráin az egyes számítások eredményei, (b) alábráin a mért hőmérséklet-eloszlás, (c) alábráin pedig az adott számítás mérési eredményektől való előjeles eltérése látható. Az összehasonlítás adatait az 5. táblázat tartalmazza.

Megfigyelhető, hogy a benchmarkban használt geometria állandósult állapotú számítása adja vissza a legjobban a zónabelépéseknél kialakuló hőmérsékleteket, ha a hőmérsékletek hibáját előjelesen vesszük. Így ezen következtetést helyes úgy értelmezni, hogy a legkevésbé ez a számítás becsüli felül átlagosan a hőmérsékleteket. Ha a hibának az abszolút értékét kívánjuk venni, azaz "mindegy", hogy a számítás alul-, vagy felülbecsüli a hőmérsékletet, akkor a valódi csomókiosztású geometrián

végzett állandósult állapotú számítás ugyan kicsivel, de a többinél pontosabbnak bizonyul, míg a benchmark geometria állandósult állapotú számítása a második legpontosabb.

Számítás	Elcsavarodás szöge [°]	Felmelegedett terület szöge [°]	Átlagos hiba* [°C]	Hiba abszolút érték átlaga* [°C]
benchmark állandósult	39	161	0,0076	1,1805
benchmark tranziens	23	157	0,0244	1,1995
valódi geom. állandósult	40	149	0,0241	1,1576
valódi geom. tranziens	30	164	0,0449	1,2737
Mérés	26	154	0	0

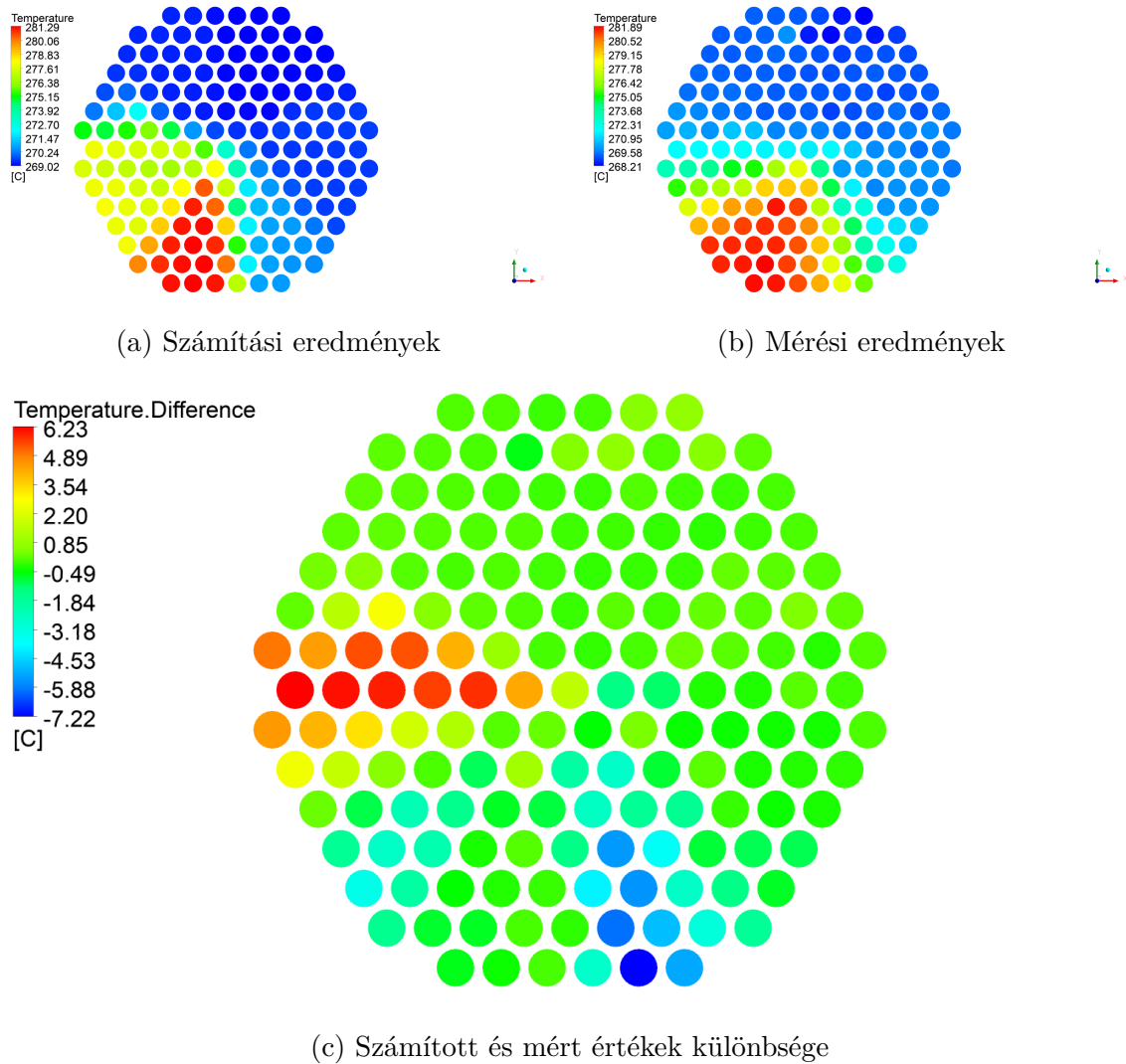
5. táblázat. Mért és számított hőmérséklet-eloszlások statisztikája. (Hiba:= számított és mért hőmérsékletek különbsége egyes fűtőelem-kötegek alatt)

*: Csak azon fűtőelem-kötegek alatt figyelembe véve, ahol a mérés lehetséges volt, lásd: 1. ábra.

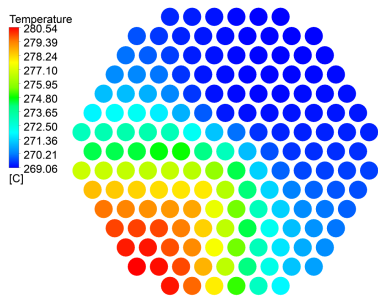
Az elcsavarodás szögének szempontjából a benchmark geometria tranziens számítása a legjobb, a felmelegedett terület kiszélesedését is ez a számítása adja vissza a leginkább. A felmelegedett területek hőmérsékleti viszonyainak alakját tekintve az ábrák tanulmányozásával, megállapítható, hogy a tranziens számítások által nyert hőmérsékleti zónatérképek jellemzően jobb egyezést mutatnak a méréssel, mint az állandósult állapotú számításokkal nyert eloszlások. Az állandósult állapotú számítások jellemzően alábecslik a felmelegedett terület közepének hőmérsékleteit.

Minden számításról elmondható továbbá, hogy a felmelegedett terület felső részén felül-, alsó részén pedig alulbecsli a hőmérsékletet. Az elcsavarodás szögét az állandósult állapotú számítások túlbecsülik, a tranziensek pedig alulbecslik. Általánosságban tapasztalható, hogy a szimulációk pontossága nagyobb azokban a régiókban, ahova a melegebb hűtőközeget betápláló hurok vize kevésbé keveredik be, azaz ott, ahol a hőmérséklet keveset változik a szimmetrikus esethez képest. Érdekes még kitérni a maximális hőmérsékletre. A mérés szerint maximális

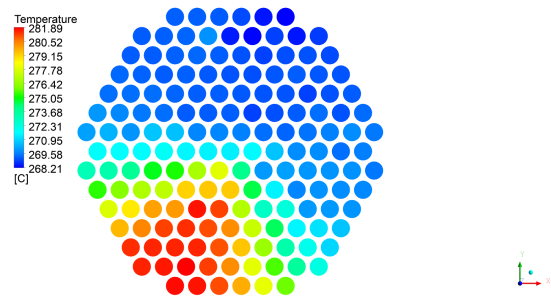
hőmérséklet $281,888^{\circ}\text{C}$, amihez a legközelebb a valódi csomkiosztást alkalmazó állandósult állapotú számítás által nyert $281,288^{\circ}\text{C}$ esik a legközelebb. Nem sokkal elmaradva tőle, pedig következik a több másik szempont által is jónak tűnő benchmark geometriás, állandósult állapotú számítás.



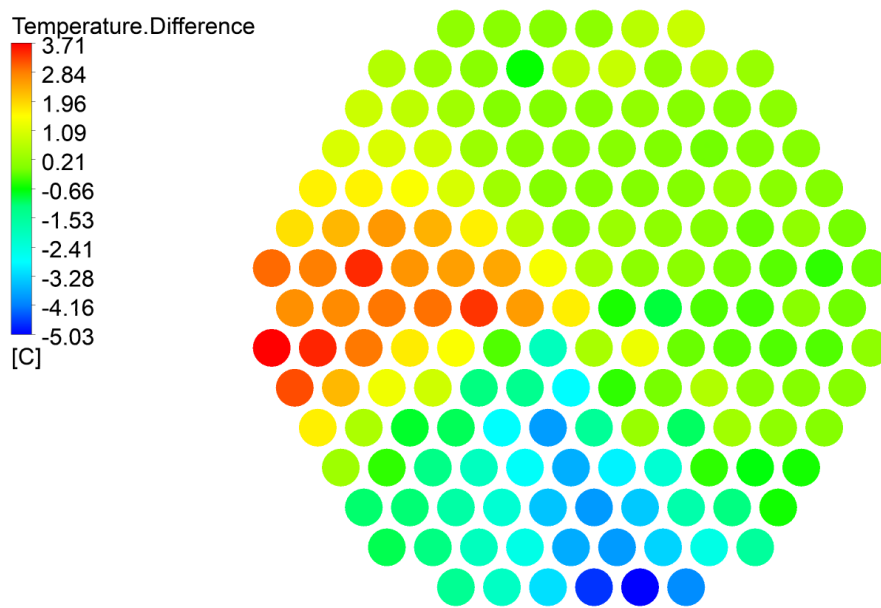
26. ábra. A benchmarkban használatos geometrián végezett, állandósult állapotú számítás hőmérséklet-eloszlás eredményének összehasonlítása a mért hőmérsékletekkel a zónabelépésnél.



(a) Számítási eredmények

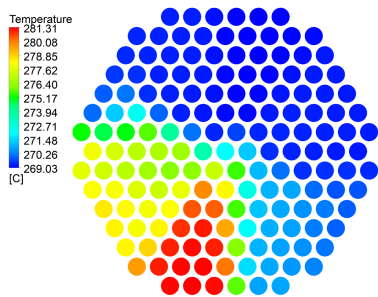


(b) Mérési eredmények

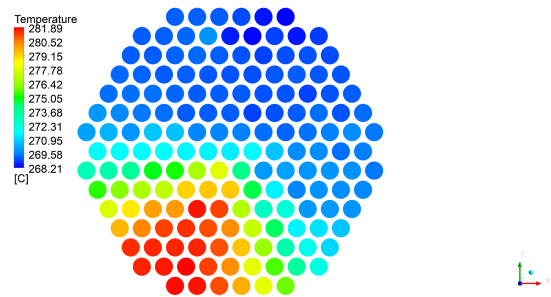


(c) Számított és mért értékek különbsége

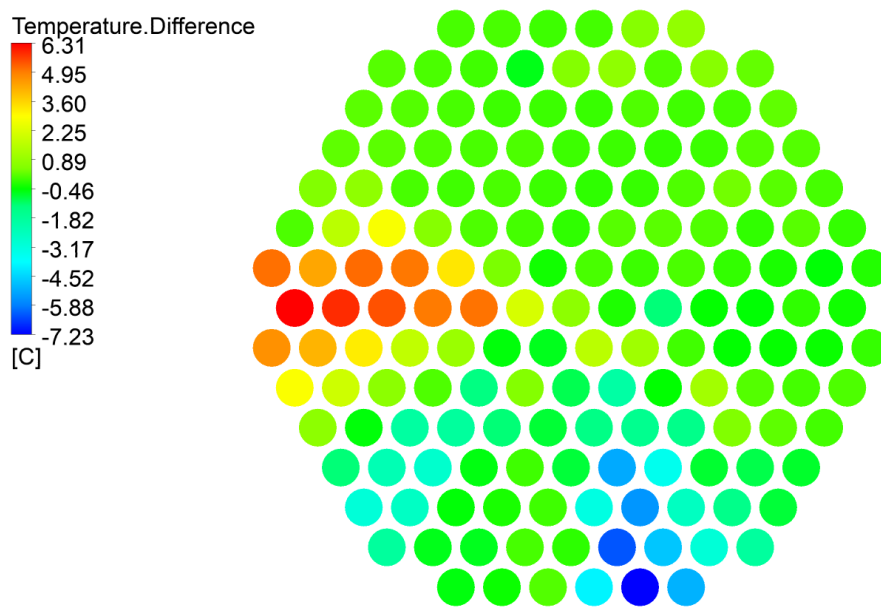
27. ábra. A benchmarkban használatos geometrián végezett, tranziens számítás hőmérséklet-eloszlás eredményének összehasonlítása a mért hőmérsékletekkel a zónabelépésnél.



(a) Számítási eredmények

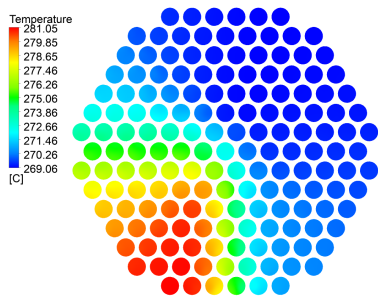


(b) Mérés eredmények

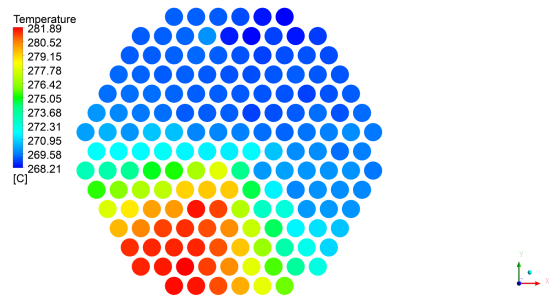


(c) Számított és mért értékek különbsége

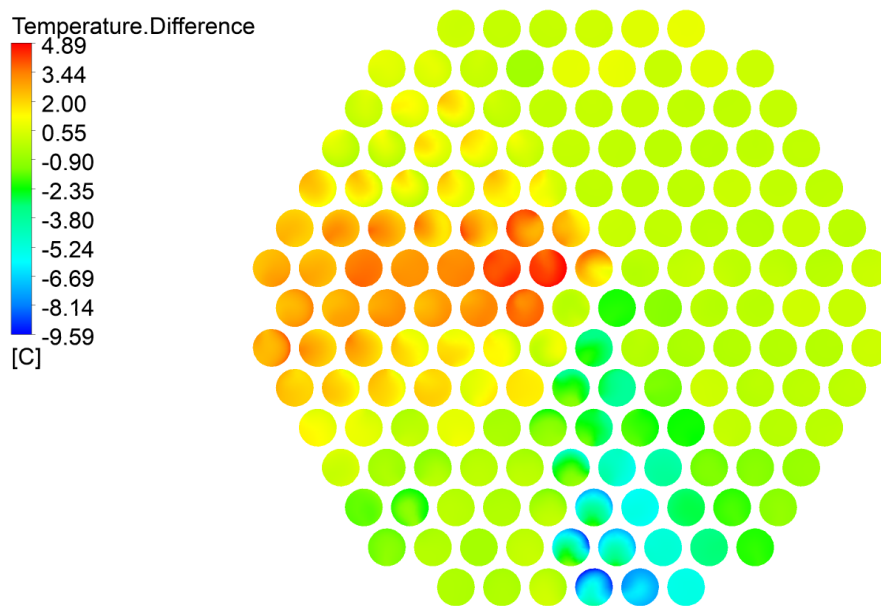
28. ábra. A valóságos csomópontpozíciókat alkalmazó geometrián végzett, állandósult állapotú számítás hőmérséklet-eloszlás eredményének összehasonlítása a mért hőmérsékletekkel a zónabelépésnél.



(a) Számítási eredmények



(b) Mérés eredmények



(c) Számított és mért értékek különbsége

29. ábra. A valóságos csomópontokat alkalmazó geometrián végzett, tranziens számítás hőmérséklet-eloszlás eredményének összehasonlítása a mért hőmérsékletekkel a zónabelépésnél.

7. Konklúzió

A V1000CT-2 termohidraulikai benchmark feladatban egy VVER-1000 típusú reaktortartályban lezajló hűtőközeg keveredési folyamat került megvizsgálásra CFD módszerrel. Az egyik primer vízhurok gőzleválasztó szelepének elzárásának köszönhetően felmelegedett a hurok belépő hűtővize, majd a leszálló gyűrűs csatornában történő keveredés eredményeképp a zónabelépésnél kialakuló hőmérséklet-eloszlás legmelegebb régiója elfordul a melegebb vizet betápláló csomak pozíciójához képest.

Saját készítésű geometrián megvalósított, és hálófüggetlenségi vizsgálattal validált CFD számításokkal sikerült reprodukálni az elcsavarodási effektust, és a felmelegedő terület kiszélesedését. További vizsgálatot folytattam le arra vonatkozóan, hogy a benchmark szerinti geometriában, a csomakok pozíciójában tett közelítések, illetve azok elhagyása milyen hatással van az eredményekre. Állandósult állapotú és tranziens számítások eredményeit mindkét geometriára megvizsgálván, többféle szempont szerinti statisztikák és összehasonlítások születtek.

Összefoglalva elmondható, hogy az állandósult állapotú számítások alkalmazabbnak bizonyultak a probléma elemzésére. Ez összhangban van azzal, hogy a feladat specifikáció szerint a hőmérsékletek már a felmelegedést követő, állandósult állapotban kerültek meghatározásra. Levonható következtetés, hogy a csomakiosztásban tett közelítések elhagyása csökkentette a hőmérsékletek méréstől való eltéréseinek abszolútértékeinek átlagát, azaz a mindenirányú tévedés, ha kicsivel is, csökkenthető a valós geometria alkalmazásával. A statisztikák eredménye az is, hogy az elcsavarodás szögét, illetve a felmelegedett terület nagyságát a benchmarkban használatos, csomakiosztásban közelítéseket tevő geometriával kaphatjuk vissza a legjobban. Ez feltételezhetően annak tudható be, hogy a kismértékű - és megfelelő irányú - torzítás a csomak pozíciójában kompenzálhatja a modellezésből kihagyott szivattyúk örvénykeltő hatását, és a beérkező hűtővíz elhanyagolt impulzusmomentumát.

A jelen problémánál bemutatott elemzések tapasztalatai alapján kijelenthető, hogy a geometriai közelítések, illetve bizonyos egyszerűsítések szolgálhatják a korlátozott terjedelmű modellezés eredményességét, és nem csak számítási igényt csökkenthetnek a modellt felállítani kívánó számára.

A VVER-1000 reaktortartály hűtőközeg keveredésének elemzése a jövőben több irányban is kiegészíthető, fejleszthető. A benchmarkot követő technológiai fejlődés lehetővé teszi a teljes reaktortartályt, vagy primerkört, illetve akár szivattyúkat is figyelembe vevő, jó felbontású hálóval ellátott modellek alkalmazását. További megoldás lehet a pontosság növelésére a porózus közegű régiók alkalmazása, illetve további közelítések gyérítése, például a tartály komplexebb kialakítású részein.

8. Köszönetnyilvánítás

Szeretnék köszönetet mondani témavezetőmnek, Kiss Bélának a közel két éve tartó közös munkáért, a szakterületen nyújtott iránymutatásért, és a szakmai tudásért, amit szerezhettem.

Köszönöm a BME Nukleáris Technikai Intézetének a szimulációk, számítások elvégzéséhez elengedhetetlen technikai háttérrel és az R417-es gépterem számítógépeinek használatára nyújtott lehetőséget.

Hálás vagyok a Jövőnk Nukleáris Energetikusaért Alapítványnak a már két pályázati időszakon keresztül anyagi támogatásért, amelyet kutatómunkám és tanulmányaim elősegítésére nyertem el.

Köszönöm továbbá családomnak és barátaimnak, hogy támogatnak a természettudományos pályán és kutatómunkámban.

Hivatkozások

- [1] Wikipédia - VVER, Wikipédia - 2023.08.13.
- [2] Géczy Gábor, Dr. Hugyecz Attila. (2020.09.21.) A VVER-1000 reaktorcsalád fejlődése - paks2.hu
- [3] Kolev, N.; Spasov, Ivan; Royer, E.. (2010). VVER-1000 Coolant Transient Benchmark Phase 2 (V1000CT-2): Summary Results of Exercise 1 on Vessel Mixing Simulation. Nuclear Science (2010), ISBN 978-92-64-99152-1
- [4] NEA (2015), Best Practice Guidelines for the Use of CFD in Nuclear Reactor Safety Applications – Revision, OECD Publishing, Paris
- [5] **Selmi, Bálint**. (2024) VVER-1000 reaktortartály leszálló gyűrűs csatornájában kialakuló hűtőközeg keveredés részletes vizsgálata - *BSc szakdolgozat*, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Nukleáris Technikai Intézet
- [6] Yamaji, Bogdán; Aszódi, Attila. (2006) CFD analysis of coolant mixing in VVER-1000 pressure vessel. 16th Symposium of AER on VVER Reactor Physics and Reactor Safety Budapest, Magyarország : Energiatudományi Kutatóközpont (2006)
- [7] Moretti, Fabio; Melideo, Daniele; Terzuoli, Fulvio; D'Auria, Francesco. (2006). Application of CFX-10 to the Investigation of RPV Coolant Mixing in VVER Reactors. 10.1115/ICONE14-89840.
- [8] Terzuoli, Fulvio; Moretti, Fabio; Melideo, Daniele; D'Auria, Francesco; Shkarupa, Oleksandr. CFX-10 and RELAP5-3D Simulations of Coolant Mixing Phenomena in RPV of VVER-1000 Reactors.
- [9] Bieder, Ulrich; Fauchet, Gauthier; Béty, Sylvie; Kolev, Nikola; Popov, Dimitar. (2007). Simulation of mixing effects in a VVER-1000 reactor. Nuclear Engineering and Design. 237. 1718-1728. 10.1016/j.nucengdes.2007.02.015.

- [10] Böttcher, Michael; Krüßmann, Regina. (2010). Primary loop study of a VVER-1000 reactor with special focus on coolant mixing. Nuclear Engineering and Design - NUCL ENG DES. 240. 2244-2253. 10.1016/j.nucengdes.2010.02.044.
- [11] Höhne, Thomas. (2009). CFD simulation of thermal-hydraulic benchmark V1000CT-2 using ANSYS CFX. Science and Technology of Nuclear Installations. (2009) 10.1155/2009/835162.
- [12] M. Böttcher, O. Bernard, A. Mas, V. Sanchez, R. Nop, F. Belaunde, C. Bourcier, D. Ruban, A. Hashymov, O. Halim, A. Pucciarelli, N. Forgione. (2023) CFD analysis of coolant mixing in VVER-1000/V320 reactor pressure vessel. Annals of Nuclear Energy, Volume 197, 2024, 110274, ISSN 0306-4549
- [13] Wilcox, David C (1998). Turbulence Modeling for CFD. Second edition. Anaheim: DCW Industries (1998).
- [14] Menter, F. R. (1993), Zonal Two Equation k - ω Turbulence Models for Aerodynamic Flows. AIAA Paper 93-2906.

9. Függelék: Saját eredmények

Fentebb bemutatott kutatómunkám során az alábbi tudományos (rész)kérdésekre kerestem, illetve adtam saját választ:

- Egy VVER-1000 típusú reaktor primerkörének 1-es számú hurokjában a gőzleválasztó szelep elzáródása a hurok hűtőközegének felmelegedését okozza. A hőmérséklet-eloszlás aszimmetrikussá válik, a hőmérsékleti profil pedig a zónabelépésnél a beömlő csonkokhoz képest elcsavarodik. **Visszakapható-e a hőmérséklet-eloszlásra kapott mérési eredmény az erről szóló benchmark óta dinamikusan fejlődő CFD technikával?**
- **Hogyan érdemes áramlástanai szempontból modellezni a problémát?**
- **Milyen pontossággal reprodukálható szimulációkkal a zónabelépésnél kialakuló hőmérséklet-eloszlás?**
- **Érdemes-e bizonyos geometriai, illetve különféle áramlástanai egyszerűsítéseket, közelítéseket tenni a valósághű eredmények érdekében?**

A problémára sajátkezűleg fejlesztettem teljeskörű CFD modellt az ANSYS CFD programcsomagjának használatával. A modellt hálófüggetlenségi vizsgálattal validáltam, és különféle turbulencia modellek alkalmazásával végeztem számításokat. Vizsgáltam továbbá a csonkkiosztásban tett közelítések elhagyásának hatását, és a szimulációs eredmények méréshez való viszonyát. Az elért eredményeim a következők:

- A zónabelépésnél kialakuló hőmérséklet-eloszlás reprodukálható. Az adekvát modellezéshez a korábban megjelent tanulmányok számításaihoz képest jócskán nagyobb elemszámú numerikus háló mellett elegendőek a kétegyenletes turbulencia modellek. Kíváncsú továbbá állandósult állapotú (angolul: *steady state*) számításokat végezni a globális pontosság érdekében.
- A hőmérséklet-eloszlásra kapott szimulációs eredmények átlagosan hibahatáron belülre esnek a mérési eredményekhez képest.
- A benchmark csonkkiosztásban tett közelítéseinek elhagyása csökkenti az abszolútértékben vett hibát, de az elcsavarodási effektus jellegzetességeit természetesen a benchmarkban használatos geometriával kapjuk vissza jobban.