

A PGV-213 típusú gőzfejlesztők köpenyterében kialakuló kétfázisú áramlás szimulációja

Dr. Kristóf Gergely, Dr. Szabó K. Gábor, Dr. Réger Tamás*

CFD.HU Kft., 1118, Budapest, Ménesi út 7.

Két- és háromdimenziós numerikus áramlástani modellek készültek a paksi gőzfejlesztő köpenytéri áramlásának számítására. E modellek felhasználásával több különböző üzemállapotot vizsgáltunk, köztük az eredeti és megnövelt teljesítménynek, valamint az eredeti alsó és a jelenlegi felső tápvízbevezetésnek megfelelő állapotokat. Az alkalmazott matematikai modell leírja többek között a tápvíznek a melegedés okozta fajtérfogat-változását, a bekevert hideg tápvíz okozta helyi kondenzációt, továbbá a térben változó gőztartalmú és buborékméretű diszperz gőzfázis vízhez képesti elmozdulását. Mikromodellek eredményei alapján határoztuk meg a csököteg-ellenállás, a hőátadás és a tápvízbevezetés intenzitásainak térbeli eloszlását. A térben változó magasságú szabad vízfelszín alakjára kapott számítási eredmények a szakirodalomban publikált mérési adatokkal jó egyezést mutatnak.

Bevezetés

A paksi atomerőmű VVER-440-es blokkjaiban működő PGV-213 típusú gőzfejlesztők hőátadó csövei lassú korróziós folyamatnak vannak kitéve, ami a csőfal adott mértéket meghaladó vékonyodása esetén a csövek dugózását – és ezzel a hőátadó felület csökkentését – teszi szükségessé. Tekintve, hogy a gőzfejlesztők az erőmű élettartama szempontjából kritikus berendezéseknek számítanak, az üzemidő-hosszabbítás előkészítéséhez szükségessé vált leiszapoló rendszerük továbbfejlesztési lehetőségeinek vizsgálata. A leiszapoló rendszer célja a folyadékfázisban jelenlévő ionos szennyezők és diszperz korróziótermékek hatékony eltávolítása. Hatásos leiszapolás akkor érhető el, ha az elszívás azokban a pontokban történik, ahol az említett szennyeződések koncentrációdnak, így a hatékonyabb leiszapoló rendszer tervezésével megbízott LG Energia Kft. a folyadékfázisban lejátszódó transzportfolyamatok szimulációs vizsgálatával bízta meg cégünket.

A köpenytéri áramlást befolyásoló legfontosabb hatás a fűtés térbeli inhomogenitása. Minden gőzfejlesztő 5536 db 16 mm külső átmérőjű, vízszintes síkban meghajlított hőátadó csővel készül, amelyek a primerköri víz entalpiája árán telítési hőmérsékletre melegítik és felforraltják a szekunderköri vizet. Értelemszerűen az elosztó (meleg) kollektor oldalán nagyobb, a gyűjtő (hideg) kollektor oldalán kisebb a hőcsere intenzitása. Ezért a gőzképződés is jóval intenzívebb a gőzfejlesztő meleg oldalán, ami a köpenytéri vízfázis cirkulációját okozza a gőzfejlesztő keresztmetszetében. Ezt az áramlást a gőzfejlesztő nagy részében (a csőfordulók kivételével) kvázi-kétdimenzióssá

alakítják a tartály tengelyére merőleges síkokban elhelyezett, a vízfázis átáramlására nézve jelentős ellenállást képező csőtámaszok. A cirkuláció intenzitását a csököteg köpenyoldali hidraulikai ellenállása és az azok mellett található viszonylag nagy méretű – és ezért kisebb hidraulikai ellenállású – hézagok befolyásolják. A hőközlés térbeli eloszlását csövenkénti kapcsolt egydimenziós termo-hidraulikai modellel, a csököteg ellenállását kétdimenziós, a csőtámaszok ellenállását pedig háromdimenziós áramlástani mikromodellek alkalmazásával határoztuk meg.

Az átadott hő jelentős része a vízfázis túlhevítésére fordítódik, ezért a felúszó gőzbuborékok mérete nő, továbbá nagy helyi gőzkoncentráció esetén jelentős lehet a buborékok csoportosulása és összeolvadása is. E hatások eredményeként változik a gőzfázis vízhez képesti elcsúszási (felúszási) sebessége, melyre – a gőztartalom-eloszlás és a szabad felszín pontos meghatározása érdekében – egy mért korrelációra épülő matematikai modellt fejlesztettünk ki.

Jelentősen befolyásolja a köpenytéri áramlást a tápvíz bevezetése is. Az átadott hőteljesítmény 9,3 %-a a tápvíz telítési hőmérsékletre történő hevítésére (előmelegítésére) fordítódik, ezt részben a buborékos gőzfázis helyi kondenzációja fedezi. A tápvíz bevezetése lokálisan erőteljes gőztartalom- és fajtérfogat-csökkenést okoz, így a tápvíz a bevezetési ponttól lefelé törekszik.

Az előmelegítési és gőzképződési folyamatok szimulációjára egy a kontinuitási- és energiaegyenletet lokálisan kielégítő többfázisú áramlási modellt fejlesztettünk ki ANSYS-FLUENT rendszerben C nyelven írt felhasználói függvények (ún. UDF-ek) segítségével.

*Kontakt: kristof@cf.hu

© Magyar Nukleáris Társaság, 2008

Beérkezett: 2008. március 17.

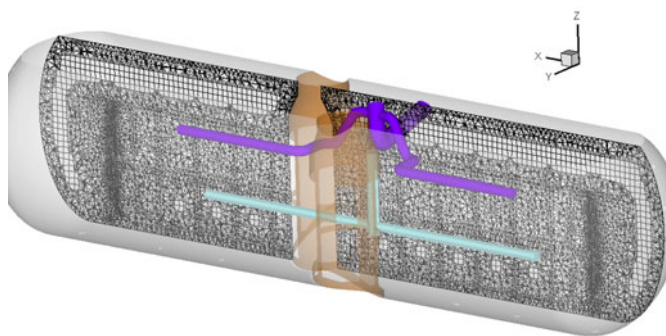
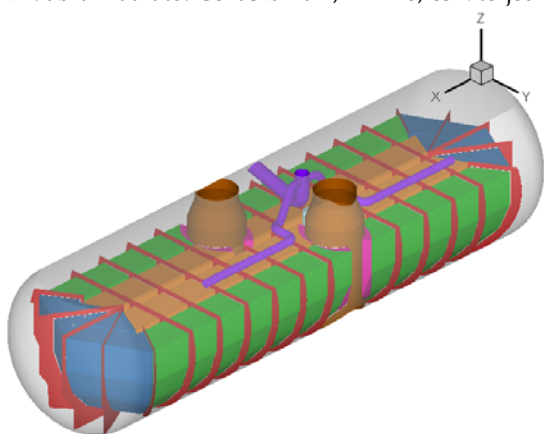
Közlésre elfogadva: 2008. szeptember 15.

Az áramlástani szimuláció teljes képet ad az áramlási sebesség és gőztartalom köpenytéri eloszlásáról, lehetővé teszi a diszperz korróziótermékek lerakódásának vizsgálatát, ezzel fontos adatokat szolgáltat egy hatékonyabb leiszapoló rendszer tervezéséhez és számos további felhasználási lehetősége is látható.

Geometriai modell, numerikus felbontás

A kétfázisú áramlás matematikai modelljének fejlesztése és a számítási idő csökkentése érdekében a gőzfejlesztő geometriájára két különböző felbontású háromdimenziós modellt és egy keresztmetszeti kétdimenziós modellt készítettünk.

A legrészletesebb felbontású háromdimenziós modellünk az 1. ábrán látható. Cellaszáma 1,2 millió, és kiterjed az alsó



1. ábra: Geometriai modell (balra) és a numerikus háló (jobbra) a gőzfejlesztő középsikjában

Matematikai modell

Hőbevezetés

A víz köpenytéri körforgását a csököteg által bevitt hőteljesítmény okozta fajtérfogat-növekedés tartja fenn, amely a tápvíz felmelegítése során 6,7%-os, a gőzképzés során pedig 33,8-szoros.

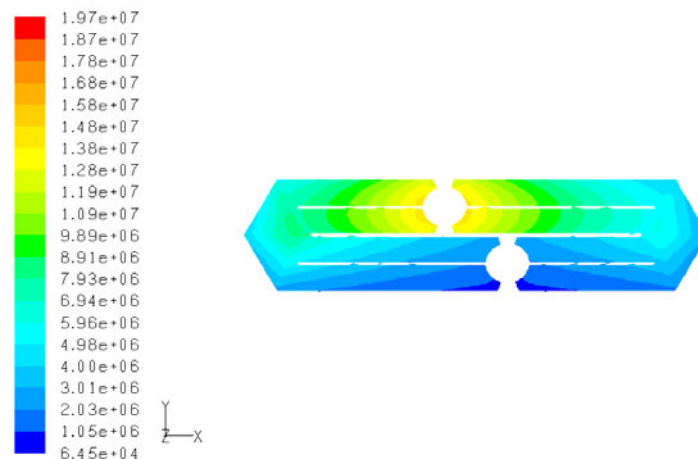
A hőteljesítmény kiszámításához a primer és szekunder oldali folyamatok csatolt leírása szükséges. A hőátadási modell egyik kulcseleme, hogy primer oldalról tekintve a hőátadó csövek a két kollektort összekötő egymással párhuzamos hidraulikai ellenállású vezetékének tekinthetők, rajtuk tehát azonos nyomásesés valósul meg (a meleg és a hideg kollektor közti nyomáskülönbség). Ugyanakkor az egyes csövek hossza jelentősen különbözik

és felső tápvízvezetékekre is. Az egyszerűsített háromdimenziós modell cellaszáma 0,5 millió. A cellaszám csökkentése érdekében az utóbbi modelltől kihagytuk az áramlási akadályt képező tápvízvezetéseket, a tartály végeiben található 4-4 ferdén beépített csőtámaszt és néhány további, kisebb jelentőségű geometriai részletet. Az egyszerűsített modell futási eredményeit kezdeti feltételként felhasználva a részletes modellen végzett szimuláció időigényét így 1/5 részére lehetett csökkenteni.

A kétdimenziós modell cellaszáma 4100, így a szimuláció futásideje még az egyszerűsített háromdimenziós modellhez képest is kb. 1/100 részére csökkent, ami nagy segítséget jelentett a matematikai modell fejlesztésének időszakában, ráadásul a vizsgált metszetben tartalmas eredményeket is szolgáltatott.

egymástól: a legbelső csövek hossza 8,3 m, a legkülsőké 12,5 m. A legbelső csöveken ezért nagyobb tömegáram halad, mint a külsőkön, a lehűlés mértéke pedig kisebb az előbbieken, mint az utóbbiakban. A primer oldali teljes tömeg- és entalpiaáram ismeretében a csövek mentén vett hőmérséklet- és hőáramprofilok megoldhatóak, ha a csöveken történő hőátadás paramétereit specifikáljuk. A hideg kollektorban az egyes csövekből érkező primer munkaközeg összekeveredik, a primer oldali kilépő hőmérséklet így az egyes csövek kilépő hőmérsékletének a tömegáramokkal súlyozott átlaga lesz.

Ezen eljárás során figyelembe vehetjük, hogy az egyes hőátadó csövek aktívak-e vagy esetleg le vannak dugózva. A 2. ábrán látható hőteljesítménysűrűség-eloszlás egy tipikus ledugózási állapothoz tartozik, amely 5478 aktív és 58 véletlenszerűen ledugózott csőnek felel meg.



2. ábra: A hőteljesítmény-sűrűség eloszlása véletlenszerűen ledugózott csövek esetén (MW/m^3)

A csőköteg és a csőtámaszok ellenállása

Az ANSYS-FLUENT szimulációs rendszer lehetőséget nyújt az erősen anizotróp hidraulikai ellenállás modellezésére porózus közegekben, melyekben a nyomásesést a

$$\vec{\nabla} p = - \left(\mu \cdot \hat{D} \cdot \vec{v}' + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot |\vec{v}'| \cdot \hat{C} \cdot \vec{v}' \right) \quad (1)$$

formula felhasználásával számolja. Az (1) képletben $\vec{v}' = \gamma \cdot \vec{v}$ a közeg porozitását figyelembe vevő effektív sebesség, \hat{D} és \hat{C} pedig szimmetrikus mátrixok, melyeket az ellenállási főirányok és az azok mentén vett ellenállási tényezők segítségével specifikálunk a csőköteg eltérő elrendezésű résztartományain más-más értékekkel. A porozitás (bizonyos helyeken inhomogén) értékét a csőköteg geometriai adatai szabják meg, a \hat{D} és \hat{C} mátrixok elemeit pedig mikromodellek segítségével határoztuk meg.

A tápvíz-előmelegítés és a gőzképződés modellje

A valódi berendezés kétfázisú gőz-víz rendszerében lezajló párolgás, lecsapódás, hőátadás és tápvíz-előmelegítés összetett és csatolt folyamatát egy fiktív harmadik fázis, a tápvíz-fázis segítségével modelleztük. Modellünkben a számítási tartomány minden pontjában az alábbi folyadékfázisok lehetnek jelen: telített gőz, telített víz és hideg tápvíz; ezek mennyiségét a numerikus modellben a térben és időben változó térfogati koncentrációjukkal írtuk le. Lokális termodinamikai egyensúlyban csak az előző kettő vagy az utóbbi kettő fázis valamilyen arányú keveréke lehet jelen: telített gőz-víz elegy, vagy forráspontnál hidegebb tiszta víz.

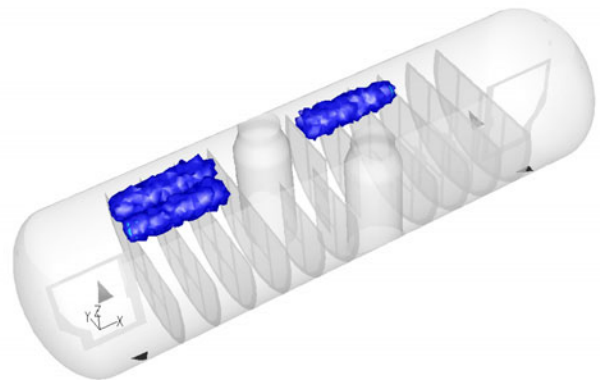
A rendszerben fellépő természetes áramlást a közeg inhomogén sűrűségeloszlása hozza létre. Mindhárom tiszta fázis sűrűsége az adott nyomáson ismert, állandó érték. A keverék sűrűségét a három fázis sűrűségének a térfogati koncentrációkkal súlyozott átlagaként adtuk meg; ez a cseppfolyós víz lineáris hőtágulását feltételezve pontosan

adja meg a közeg sűrűségét lokális termodinamikai egyensúlyban.

Mivel a lokális hőmérséklet a fázisok koncentrációjának egyértelmű függvénye, annak direkt nyilvántartására és számítására – tehát a hővezetési (energia-transzport) egyenlet megoldására – nincs szükség. Ezzel tehát a feladat számításigényét jelentősen csökkentettük.

A közeg fázisösszetételének meghatározásához elégséges a hátróból kettő független térfogati koncentráció transzportegyenletével kiegészíteni a szokásos hidraulikai egyenleteket (kontinuitás, Navier-Stokes egyenlet, turbulencia-egyenletek). Az egyenletrendszer megoldására az ANSYS-FLUENT rendszerben rendelkezésre álló keverékáramlás-modellt alkalmaztuk. Az egyenletekben forrástagokként jelentkeznek az egyes fizikai folyamatok hatásai, melyeket C nyelven írt megfelelő felhasználói függvényekkel (UDF-ekkel) adtunk meg.

A forrástagok egy része a belépő tápvíz modellezésére szolgál. A tápvízbevezetés intenzitását a fűvókák végpontjainak környezetében felvett tartományban, a tartályhossz mentén lineárisan változó függvénnyel közelítettük egy külön erre az alrendszerre kidolgozott hidraulikai modell alapján. (A felső tápvízbevezetési tartomány a 3. ábrán látható.)



3. ábra: A felső tápvízbevezetés helye

A forrástagok hasonló csoportját használtuk a leiszapoló csonkokon történő anyagelvezetés pontos leírására.

A forrástagok harmadik csoportja a fázisátalakulásokat írja le. Ezeket szintén UDF-ekkel adtuk meg a lokális energia-megmaradás figyelembe vételével. A fázisátalakulások a lokális termodinamikai egyensúly felé viszik a rendszert, úgy hogy a lokálisan rendelkezésre álló energia – az egyes fázisokhoz kapcsolódó látens hő és a hőbevezetés miatt megjelenő valódi hő összege – megmarad. (A fázisátmenetekhez tartozó anyagmegmaradást az ANSYS-FLUENT rendszer automatikusan teljesíti.) Ezek a forrástagok teljes mértékben leírják a víz melegítését, a párolgást, továbbá a tápvízbevezetések környékén jelentős mértékű visszahűtést, illetve az esetleges lecsapódást is.

A hőmérséklet térbeli eloszlása a tápvízfázis mennyiségéből közvetlenül meghatározható az eredmények utólagos feldolgozása során.

Fázisok elcsúszási sebessége

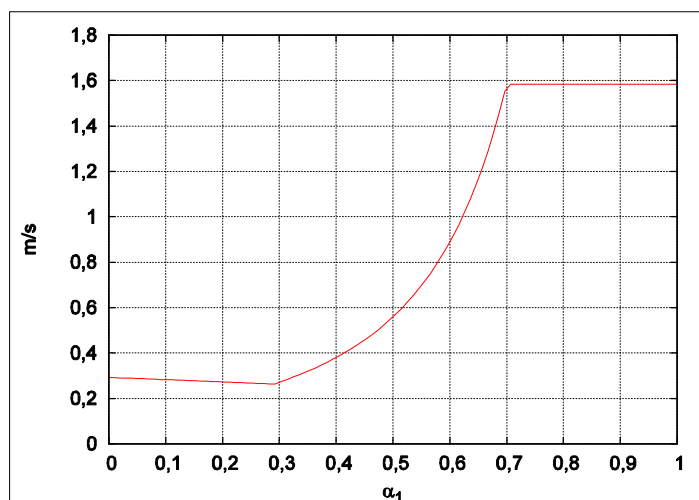
A gőz- és vízfázisok egymáshoz viszonyított elcsúszási sebességét a gőz térfogat-koncentrációja, valamint a nehézségi és tehetetlenségi erők eredőjének figyelembevételével modelleztük mért korreláció [1, 2] alapján. Speciálisan, függőleges irányú homogén stacionárius áramlás esetén a paksi gőzfejlesztők üzemi körülményei esetén az elcsúszási sebesség a 4. ábrán látható

módon függ a gőzkoncentrációtól. Az UDF-ekkel megadott elcsúszási sebességből adódó járulékokat az ANSYS-FLUENT rendszer automatikusan integrálja a megfelelő transzportegyenletekbe.

Szint szabályzás

A gőzfejlesztő üzemi vízszintjét a szintmérés adatai alapján szabályozzák, amely szintmérők a megcsapolási pontjaik közötti hidrosztatikai nyomással arányos jelet szolgáltatnak, ezért a gőzfejlesztőben lévő munkaközeg összes tömege függ az alsó megcsapolási pont alatti víztér gőzkoncentrációjától is. A többfázisú áramlás matematikai modellje – a numerikus hibáktól eltekintve – megőrzi a telített állapotú vízfázis tömegét a köpenytérben, azonban a szükséges víztömeg értéke nem tudható előre, mert az függ a számítás eredményeként kiadódó gőztartalom-eloszlástól is, tehát szint szabályzást a numerikus szimuláció esetében is alkalmazni kell.

A numerikus szint szabályzás feladata, hogy gyorsan vigye a szimulációs modellt az állandósult vízszintnek megfelelő állapotba, ezért a numerikus rendszerben a valóságos szint szabályzásnál gyorsabb, 1 másodperces időállandójú szabályzást alkalmazunk. A szabályzás 10 másodperc elteltével 1 mm-es sávon belül tartotta a vízszintet.

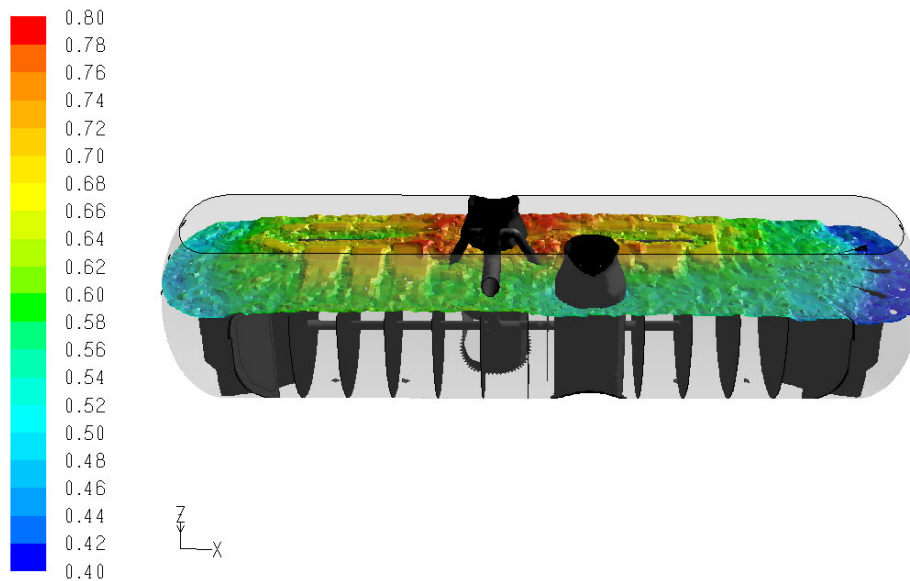


4. ábra: Fázisok elcsúszási sebességének számítása

Számítási eredmények, diszkusszió, a modell validációja

A gőzfejlesztő köpenytéri áramlásának szimulációját, véletlenszerű ledugózás feltételezésével, eredeti (224 MW) és növelt (251 MW) egység teljesítmény esetére is elvégeztük. Az előbbi esetet mind alsó, mind pedig felső tápvízbevezetés esetére megvizsgáltuk. A köpenytéri áramlás szimulációs eredményei alapján az alábbi fontosabb következtetéseket vonhatjuk le:

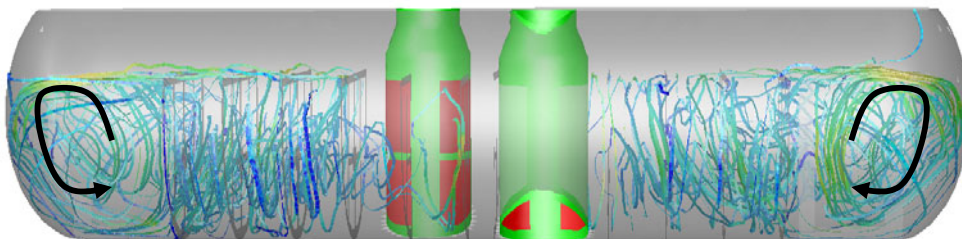
- 1.) A folyadékfázisban a maximális térfogati gőzkoncentráció kb. 55%, jól definiált felszín alakult ki, felette a gőz koncentrációja a 100%-ot megközelíti.
- 2.) A felszín legmagasabb pontja a (ld. 5. ábra) a meleg kollektor környezetében található, a legmélyebb pontja a meleg kollektortól távolabb lévő tartályvégnél jön létre (a szintkülönbség közelítőleg 40 cm), itt a felszín a felső csősort megközelíti, vagy el is érheti.



5. ábra: A szimuláció során kialakult szabad felszín (színek: szintmagasság m-ben)

- 3.) Várakozásoknak megfelelően a köpenytéri fő áramlás egy a meleg oldalon felszálló, hideg oldalon lefelé irányuló örvény. E mellett egy másodlagos örvény is kialakul a csököteg hideg oldalán – a külső és belső körön futó csövek eltérő hosszából a hőteljesítmény-sűrűségben adódó jelentős különbség miatt –; a hideg oldal belső részén feláramlás, a külső részén és a tartályfal melletti résben leáramlás jön létre. Hasonló, de jóval keskenyebb cirkulációs zóna figyelhető meg a meleg oldalon, a tartályfal melletti résben leáramló víz miatt.
- 4.) Erőteljes áramlás alakul ki a tartály végeinél (ld. 6. ábra), melyet elsősorban a csököteg és a tartályfal közötti átlagosnál jóval nagyobb hézag hoz létre.
- 5.) A tápvíz bevezetésének helye jelentősen befolyásolja a köpenytéri áramlást (ld. 7. ábra). A tápvíz által csökkentett gőztartalmú víz gyorsan áramlik lefelé, még felső tápvízbevezetés esetén is majdnem a tartály fenekéig jut. Felső tápvízbevezetés mellett nagyobb meleg oldali gőztartalom és intenzívebb köpenytéri cirkuláció alakult ki.
- 6.) A részletes háromdimenziós modell esetében mód volt összehasonlítani az ún. „realizable k- ϵ ” turbulenciamodellel és egy rögzített turbulens viszkozitás ($\mu_t = 100\mu$) feltételezésével készült számítások eredményeit. Jelentős eltérést nem tapasztaltunk.
- 7.) A különböző felbontású háromdimenziós modellek eredményei sem tértek el jelentősen, azonban a részletes modellel számított felszínalak pontosabban egyezett a mérési eredményekkel.

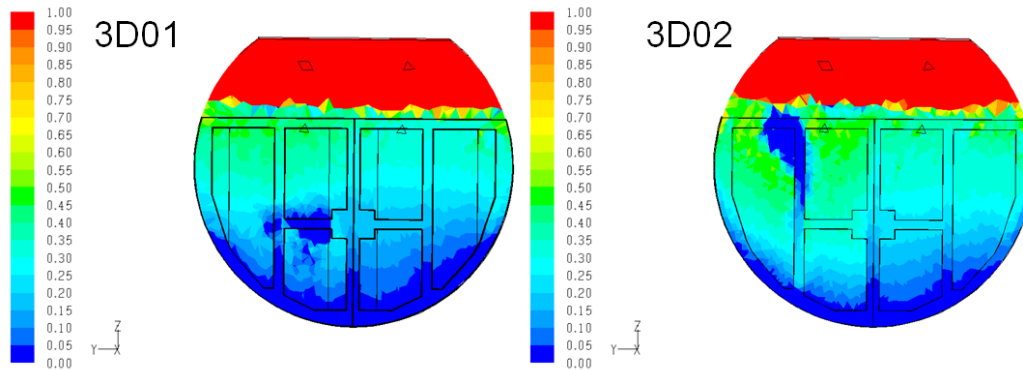
A gőzfejlesztő áramlási képére kapott numerikus eredményeink validációja független mérési adatokkal való egybevetéssel történt. Mivel a köpenytérbe mérőberendezések telepítése nem volt lehetséges, ezért kizárólag a rendelkezésre álló szakirodalmi adatokra kellett hagyatkoznunk. (Sajnálatos módon erre a berendezésre vonatkozó mérési adatok rendkívül ritkák, a VVER-1000-es reaktorok gőzfejlesztőire lényegesen több mérési adat található.) Ezek alapján megállapíthatóak a következők.



6. ábra: A tartályvégeknél kialakuló örvény

- 1.) A szimuláció során kialakuló kvázistacionárius felszín alakja (ld. 5. ábra) jó egyezést mutat a szakirodalomban fellelhető 10 pontban felvett mérési eredményekkel [3].
- 2.) A gőzkoncentrációra csupán 5 pontban vannak mérési eredmények [4], melyek jelentős ingadozást mutatnak. A számításból kapott értékek az ingadozás határain belül esnek.

A numerikus modell futtatása során az 5 beépített szintmérőnél lévő szintadatokat le lehet menteni. Ezzel elvileg lehetőséget teremtettünk az üzemi szintadatok idősorával való összevetésére is, amennyiben az általunk használt (az állandósult állapot elérését és fenntartását szolgáló) vízszint-szabályozási modult a valódi üzemi szabályozórendszer szimuláló modullal helyettesítjük. Ennek szükség és igény esetén technikai akadályja nincs. Egy ilyen alkalmazásnak elsősorban a tranziens állapotok (indítás, leállítás) modellezése esetén látjuk hasznát.



7. ábra: A gőz térfogat-koncentrációja a gőzfejlesztő középpontjától 1,5 m távolságban képzett metszetben alsó (balra) és felső (jobbra) tápvízbevezetés esetén az egyszerűsített háromdimenziós geometriai modellben

Összefoglalás

Az általunk kifejlesztett numerikus modell alkalmas a gőzfejlesztők áramlási és hőátadási folyamatainak részletes vizsgálatára. Első alkalmazásként a lebegő korrózióter-

mékek transzportját és lerakódását vizsgáltuk. A modell alkalmas az egyes csőledugózási konfigurációk hőátadásra vonatkozó hatásának elemzésére is. A modell továbbfejlesztéssel üzembizalmi állapotok numerikus szimulálására is alkalmassá tehető.

Irodalomjegyzék

- [1] Z. Stosic, V. Stevanovic: *Advanced three-dimensional two-fluid porous media method for transient two-phase flow thermal-hydraulics in complex geometries*, *Numer. Heat Transfer*, A 41 (2002) 263-289.
- [2] M. Pezo, V. D. Stevanovic, Z. Stevanovic: *A two-dimensional model of the kettle reboiler shell side thermal-hydraulics*, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 49 (2006) 1214-1224.
- [3] A. I. Dmitrijev, Ju. V. Kozlov et. al.: *Opit ispolzovanija zsaljuznuh szeparatorov v sziszteme AESZ*, *Teploenergetika*, 1989.12. 11-14.
- [4] N. B. Trunov, Sz. A. Logvinov, Ju. G. Dragunov: *Gidrodinamiceszkije i tyeplohimiceszkije processzije v parogeneratorah AESZ sz VVER*, *(Energoatomizdat, Moszkva, 2001) 81. o.*