

Szivattyúk szívócsonkjai felett kialakuló örvénytölcsérek numerikus vizsgálata

Pandazis Péter, Frank Blömeling, Andreas Schaffrath

TÜV NORD SysTec GmbH & Co. KG,

D-22525 Hamburg, Große Bahnstr. 31, Tel.: (+49)40-8557-2400

Elégtelen vízszint esetén örvény alakulhat ki a víz felszínén a szivattyú szívócsonkjai felett. Az örvényképződés megnövelheti a beáramlás perdületét, ill. levegő beszívását is eredményezheti, ami veszélyezteti a szivattyúk biztonságos üzemét. Könnyűvízes reaktorokban, különösen a kisnyomású zóna üzemzavari hűtővízrendszer szivattyúinál, amelyek primer hűtőközegvesztéses baleset esetén a reaktor hosszú távú hűtéséről gondoskodnak, releváns ez a probléma. Egy ANSYS CFX szimuláción és a Burgers és Rott által levezetett [2] örvénymodellel alapuló számítási eljárást dolgoztunk ki az örvénytölcsér paramétereinek, ill. a kritikus feltöltési magasság (örvénytölcsér keletkezésének megakadályozásához szükséges minimális vízszint) meghatározására. Az alábbi cikkben a kapcsolt módszer validálását mutatjuk be Moriya [3] mérési eredményei alapján. A kapcsolt módszer segítségével eredményesen határoztuk meg az örvénytölcsér paramétereit a vizsgált áramlási tartományban.

Bevezetés

Könnyűvízes reaktorokban fellépő hűtőközegvesztéses baleset esetén a kisnyomású zóna üzemzavari hűtővízrendszerek (ZÜHR) gondoskodnak a fűtőelemek hosszú távú hűtéséről. A rendszer szivattyúi ilyenkor a ZÜHR-tartályokban rendelkezésre álló, ill. a konténment gyűjtőzompjaiban összegyűlő hűtőközeget szállítják a fővízkörbe. A folyamatos, zavarmentes betáplálás fenntartásához elegendő hűtőközegre és a szivattyúk megbízható működésére van szükség.

A szivattyúk megbízható üzemének előfeltétele a homogén, perdületmentes hozzáfolyás biztosítása a szívócsonkokhoz [1]. Amennyiben ezek a feltételek nem teljesülnek, az többek között az üzemi zajszint megnövekedését, a szállítási jelleggörbe ingadozását, vibrációkat, megnövekedett járókerék terhelést, valamint akár a szivattyú meghibásodását is okozhatja. Az áramlási zavarok egyik leggyakoribb oka a felszíni örvényképződés a szivattyúk szívócsonkjai felett.

Az örvényképződést általában a szivattyúk szívása miatti nyomáscsökkenés és az áramlási térben lévő aszimmetria okozza [1]. Felszíni örvények a tartályban lévő víz szabad felszíne és a szivattyú szívócsonkja között alakulhatnak ki. Ha a feltöltési magasság egy kritikus szint alá csökken, a víz felszínén először csak egy kis horpadás figyelhető meg. A vízszint további csökkenésével egy örvénytölcsér alakul ki, ami akár a szívócsonkot is elérheti. Ennek következtében a felszíni örvények perdület mellett levegőt is szállíthatnak a szivattyúba, ami akár a folyadékszállítás teljes megszakadását is okozhatja.

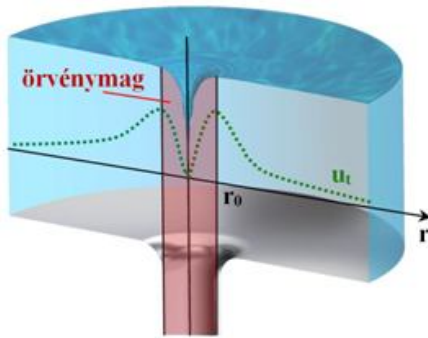
A szívócsonkok feletti minimális vízszintet, amelynél a vízfelszín már deformálódni kezd, kritikus feltöltési magasságnak nevezzük. Az utóbbi évtizedekben számos vizsgálatot végeztek, amelyekből különböző egyszerű összefüggéseket vezettek le a kritikus feltöltési magasság

meghatározására. Ezek a gyakran konzervatív összefüggések többnyire csak korlátozott paraméter-tartományban érvényesek. Amennyiben a vizsgált áramlás jellemzői kívül esnek ezen az érvényességi tartományon vagy a kritikus feltöltési magasság pontos értékét kell meghatározni, modellkísérlet elvégzésére van szükség. Emellett egy kevésbé költséges alternatívát jelenthet még az utóbbi időben jelentősen fejlődő numerikus áramlási módszerek alkalmazása.

A TÜV NORD SysTec GmbH & Co. KG analitikus és numerikus kapcsolt módszer segítségével vizsgálta a felszíni örvényképződést egy, a német Gazdasági és Technológiai Minisztérium („Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie BMWi”) által támogatott kutatási projekt („Kritikus feltöltési magasság numerikus vizsgálata a szivattyú hozzáfolyásánál”, Reactor Safety Research, Project No.: 1504110) keretében. A projekt további célja a kifejlesztett kapcsolt eljárás értékelése, ill. felhasználási lehetőségeinek vizsgálata az atomenergia biztonságos felhasználását felügyelő szervek eljárásai számára.

Kapcsolt eljárás a felszíni örvények számításához

Előzetes számítások megmutatták, hogy míg a kétfázisú (itt: levegő és víz) ANSYS CFX szimulációk egy tartályürítés modellezése során az áramlási teret az erősen forgó örvénymag közelében csak közelítőleg, addig az örvénymagtól távolabb pontosan írják le (lásd 4. ábra). Az örvénymag közeli áramlási tér pontosabb modellezése azonban a számítási kapacitás rendkívüli megnövekedéséhez vezet. A felszíni örvények áramlási terének és a felszín deformációjának pontos és effektív kiszámításához ezért a Burgers és Rott által kidolgozott analitikus örvénymodellel [2] kapcsoltuk össze a CFX eredményekkel.



1. ábra: A Burgers és Rott modell.

Az örvények áramlási tere magas sebesség-gradiensekkel jellemezhető és számos paramétertől függ (pl. geometria, cirkuláció, viszkozitás, stb.). Burgers és Rott egy közelítő analitikus modellt vezetett le ennek a komplex áramlási jelenségnek a leírásához.

Burgers és Rott a stacionárius, összenyomhatatlan Navier-Stokes egyenletekből vezette le modelljét tengelyszimmetrikus felszíni örvényekre [2]. Bevezetve az ún. szívási-jellemzőt (\sim vertikális sebesség gradiens), az összes sebességkomponensre egy egzakt megoldás vezethető le, amelyek közül azonban csak a tangenciális sebességeloszlás leírása realizisztikus (lásd az (1) egyenletet). Az axiális sebességkomponens megoldása független a sugártól, a radiális sebességkomponens pedig végtelenhez tartó sugárnál végtelen nagy értéket vesz fel [2]. A szívási-jellemző (a) a kinematikai viszkozitás (ν) és az örvénymag-sugár (r_0) négyzetének a viszonyát fejezi ki.

$$u_t = \frac{\Gamma_\infty}{2\pi} \left[1 - \exp\left\{-\left(\frac{r}{r_0}\right)^2\right\}\right], \text{ ahol:} \quad (1)$$

$$r_0 = 2\sqrt{\frac{\nu}{a}}$$

Az (1) egyenletben u_t a tangenciális sebesség, r a radiális koordináta és Γ_∞ az örvénymagon kívüli cirkuláció. Az 1. ábra a Burgers és Rott modellje szerinti tipikus tangenciális sebességeloszlást mutatja. Ito és társai a Navier-Stokes egyenletekben lévő konvektív tagok elhanyagolásával továbbfejlesztették a modellt, és levezették a (2)-es összefüggést a felszín deformációjának a leírására [3]:

$$\frac{dh}{dr} = \frac{u_t^2}{rg} \quad (2)$$

A (2) egyenletben g a gravitációs együtthatót, h pedig a feltöltési magasságot jellemzi. Integrálva a (2) egyenletet egy, az örvénytölcsér hosszának (L_g) a számítására alkalmas összefüggést kapunk:

$$L_g = \lim_{r \rightarrow \infty} h(r) - h(0) \approx \frac{a \cdot \ln(2)}{\nu \cdot g} \left(\frac{\Gamma_\infty}{4\pi}\right)^2 \quad (3)$$

A (3) egyenlet használatához ismerni kell az áramlási mező két fontos jellemzőjét, a Γ_∞ (örvénytől távoli) cirkulációt és az a szívási-jellemzőt. Ezek a jellemzők azonban nehezen becsülhetők vagy mérhetők meg, ezért mi az ANSYS CFX segítségével határoztuk meg őket.

A szívási-jellemző a közepes vertikális sebesség-gradiens egy mértéke, amelynek lokális értékei közvetlenül a CFD

számításokból elérhetőek. A számításához a vertikális sebesség-gradienseket átlagoltuk egy, a szabad felszín közelében felvett horizontális síkon, az örvénymag kerülete mentén. Az örvénymag kerületét a Q-kritérium alapján határoztuk meg [2].

Az örvénymagtól távolabbi áramlási térben a cirkuláció közel konstans. Az értékét fokozatosan távolodva az örvénymagtól a CFX által számolt tangenciális sebességekből határoztuk meg.

Az így kapott cirkulációt és szívási-jellemzőt az (1) és a (3) egyenletbe behelyettesítve meghatároztuk a tangenciális sebességeloszlást és az örvénytölcsér hosszát. A szívási jellemző és a cirkuláció függ az adott térfogatáramtól, ezért a CFD szimulációkat az összes vizsgált térfogatárammal elvégeztük.

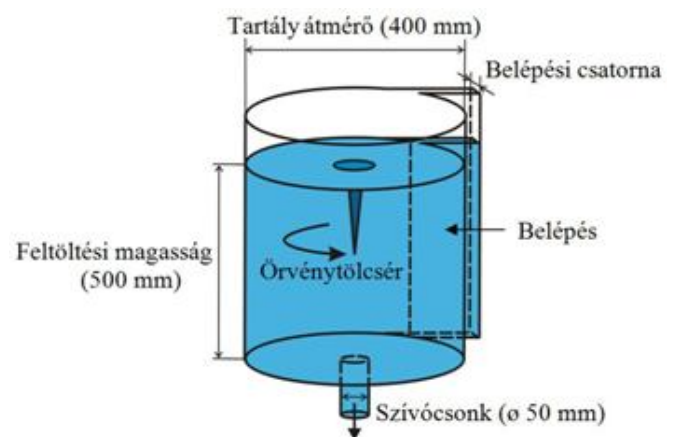
A kapcsolt eljárás validálása

A kapcsolt számítási eljárást a Moriya által végzett mérések eredményei [3] alapján validáltuk. A továbbiakban vázlatosan bemutatjuk a mérést, a mérés CFD modelljét és a validációs számítások legfontosabb eredményeit.

Moriya mérései

Moriya stacionárius felszíni örvények kialakulását vizsgálta a mérései során. A mérőberendezés fő eleme egy hengeres tartály, a tartály alján közepesen kialakított szívócsonkkal [3]. A kiszivattyúzott vizet a tartály oldalán tangenciálisan, egy 40 mm széles vertikális csatornán keresztül vezetik vissza. Ez a kialakítás lehetővé teszi a stacionárius méréseket állandó vízszint mellett. A 2. ábrán a mérőberendezés vázlata látható.

A méréseket több különböző tömegáram mellett végezték, amellyel a cirkulációt, ill. a belépési tangenciális sebességet is változtatták. A belépési tangenciális sebesség növelésével párhuzamosan mélyült a keletkezett örvénytölcsér. A tömegáramot addig növelték a mérések során, amíg az örvénytölcsér a szívócsonkot el nem érte. A mérések során stacioner, de nem tengelyszimmetrikus örvények alakultak ki, ezért a CFD számítások során a teljes mérőtartályt modelleztük.

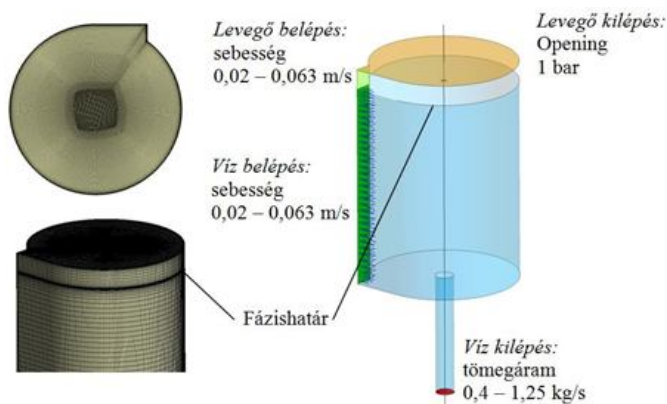


2. ábra: A Moriya mérés felépítése

CFD modell

Az ANSYS CFX egy, a véges térfogatok módszerén alapuló numerikus áramlási szoftver [4]. A szoftver numerikus módszerrel oldja meg a specifikus transzportegyenletekkel (pl. a turbulencia modellezéséhez) kiegészített transziens Navier-Stokes egyenleteket. A numerikus megoldáshoz

szükséges az egyenletrendszer diszkretizálása térben és időben. A térbeli diszkretizálás a számítási háló celláin történik. A háló minősége és felbontása jelentősen befolyásolja a számítási időt, a megoldás konvergenciáját és az eredmények pontosságát. Ezért az optimális hálófelbontáshoz mindig szükséges egy hálóvizsgálat végrehajtása.



3. ábra: A számítási háló (balra) és a CFD modell (jobbra), illetve a peremfeltételek

A Moriya méréshez készített CFD modellhez strukturált, hexaéder elemekből álló hálót generáltunk. A hálóvizsgálat megmutatta, hogy a horizontális felbontásnak lényegesen nagyobb hatása van a számított felszíni deformációra, mint a vertikális felbontásnak. Továbbá a tangenciális sebességeloszlás és az örvénykeletkezés helye alapján megvizsgáltuk a számítási háló befolyását a kapott eredményekre. Az örvényképződés helyét és a tangenciális sebességeloszlásokat az örvénymagon kívül hálófüggetlenül számították a CFD analízisek.

A validáláshoz elkészített háló 4,15 millió elemből áll, 1,2 mm-es horizontális felbontással az örvényképződés várható helyének a közelében.

A CFX szoftverben számos fizikai modell és modellezési eljárás elérhető. A fizikai modell optimális összeállításához, a megfelelő turbulencia és fázismodell kiválasztásához további vizsgálatokat végeztünk.

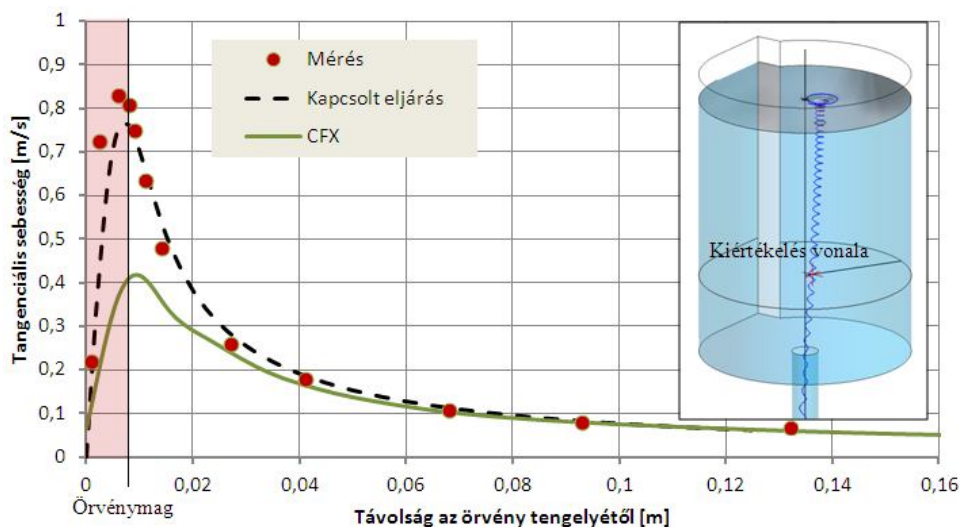
Háromféle turbulencia-modellt vizsgáltunk meg, a standard SST örvényviszkozitás turbulencia-modellt, annak az erősen görbült áramlások számításához az ún. *curvature correction* faktorról kiegészített változatát (SST-cc). ill. egy Reynolds-feszültség modellt (SSG) [4]. A különböző modellekkel végzett számítások eredményeit összehasonlítottuk a mérési eredményekkel. A legjobb egyezést az SST-cc turbulencia-modellel érték el, ezért a számításokhoz ezt a modellt választottuk.

A kétfázisú számításokat vízzel és levegővel végeztük. A fázisok modellezéséhez az inhomogén fázismodell használtuk [4]. Az inhomogén fázismodellezés során külön egyenletrendszerrel számítjuk a fázisok sebességtereit. A fázishatáron az impulzusátadást egy állandó ellenállástényezővel modelleztük, amelynek értéke az ANSYS ajánlása alapján 0,44 volt [4]. A levegő fázist egy 50 mm magas oszlopban modelleztük a vízszint felett, elegendő távolságot biztosítva ezzel a vizsgált fázishatárnak az a feletti *Opening* peremfeltételtől. A 3. ábra az elkészített hálót és a CFD modellt ábrázolja a főbb peremfeltételekkel a vizsgált paraméter tartományon.

Validációs számítások

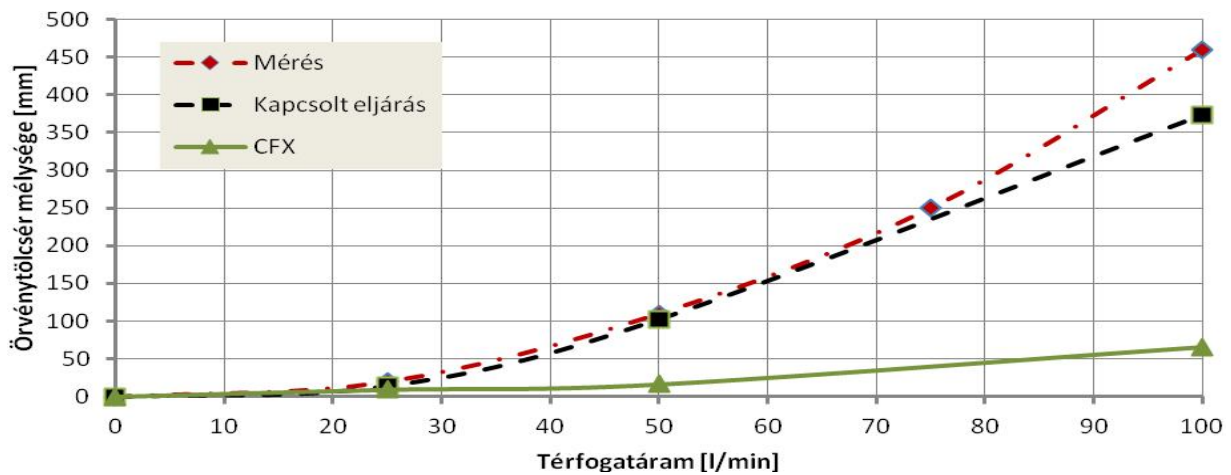
A számításokat három térfogatáram mellett végeztük el (25, 50 és 100 l/min), miközben a vízszintet 500 mm-es állandó értéken modelleztük. Az eredményül kapott tangenciális sebességeloszlásokat és örvénytölcsér-mélységeket hasonlítottuk össze a mérési eredményekkel.

A sebességeloszlások kiértékelését, a méréshez hasonlóan, egy horizontális síkon végeztük 0,15 m távolságra a tartály aljától. A 4. ábrán a mért, a tisztán CFX szimulációval és a kapcsolt eljárással számított tangenciális sebességeloszlások láthatóak, 50 l/min térfogatáram mellett. Az örvénymagon kívüli áramlási térben hűen adják vissza a CFD számítás eredményei a mért sebességeloszlást. Az örvénymag közelében lévő tangenciális sebességeket, és ez által az örvénytölcsér mélységét azonban a nem elégséges hálófelbontás miatt alábecsülik a CFD számítások (lásd 4. és 5. ábra). Ezzel szemben a kapcsolt eljárással számított értékek jól visszaadják a mérési eredményeket a teljes áramlási térben.



4. ábra: Tangenciális sebességeloszlás 50 l/min térfogatáramnál

A mért örvénytölcsér-mélységeket az 5. ábrán ábrázoltuk a CFX szimulációval és a kapcsolt eljárással számított mélységekkel együtt.



5. ábra: Mért és számított örvénytölcser-mélységek

A CFX szimulációk és a mérési eredmények összehasonlításából látható, hogy annak ellenére, hogy megnövekedett térfogatáramnál alapvetően mélyebb örvénytölcserreket számol, a CFX jelentősen alábecsüli ezek mélységét, ami a korábbi tapasztalatainkkal megegyezik. Ennek az oka szintén az örvénymagot nem megfelelő finomságú elemekre bontó számítási háló. A kapcsolt eljárás eredményei ugyanakkor jól tükrözik a mérési eredményeket. A legnagyobb eltérés az eredményekben (kb. 18 %) a legnagyobb térfogatáramnál (100 l/min) lép fel. Ennél az eredménynél figyelembe kell venni, hogy a modell 50 l/min térfogatáram mellett lett optimalizálva, mivel a vizsgálatok célja elsősorban a kritikus feltöltési magasság meghatározása, azaz közepes örvénytölcserék modellezése volt. Így nem meglepő, hogy nagyobb térfogatáramoknál a számított és mért eredmények közötti eltérés is nagyobb. Nagyobb térfogatáramoknál az örvénymagon kívüli háló további finomítása szükséges. 50 l/min térfogatáramnál ugyanakkor ez az eltérés kevesebb, mint 7%.

Konklúzió

A TÜV NORD SysTec GmbH & Co. KG kifejlesztett egy új kapcsolt eljárást a kritikus feltöltési magasság meghatározásához szabad felszíni örvények esetén.

Köszönetnyilvánítás

Az ebben a cikkben közölt kutatást a német Gazdasági és Technológiai Minisztérium („Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, BMWi”) támogatta a 1501410 finanszírozási szám alatt. A publikáció tartalmáért kizárólag a szerzők felelősek.

Külön köszönet illeti Babcsány Boglárkát a kitartó és lelkes szakmai lektorálásáért.

Supported by:



on the basis of a decision
by the German Bundestag

Irodalomjegyzék

- [1] J. Knauss: *Swirling Flow Problems at Intake: IAHR Hydraulic Structures Design Manual*; 1987
- [2] J.-Z. Wu, H.-Y. Ma, M.-D. Zhou: *Vorticity and Vortex Dynamics*; Springer-Verlag, 2006
- [3] K. Ito, T. Sakai, Y. Eguchi, H. Monji, H. Ohshima, A. Uchibori, Y. Xu: *Improvement of Gas Entrainment Prediction Method –Introduction of Surface Tension Effect–*; *Journal of Nuclear Science and Technology*, 2010, Vol. 47, No. 9, 771-778
- [4] ANSYS Germany GmbH: *ANSYS CFX Users Manual*; www1.ansys.com/customer