



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Közlekedésmérnöki Kar
Repülőgépek és Hajók Tanszék

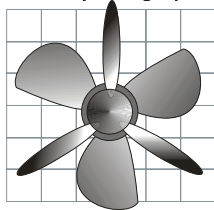
NUMERIKUS MÓDSZEREK ÉS ALKALMAZÁSOK A HŐ- ÉS ÁRAMLÁSTECHNIKAI GÉPEKBEN LEZAJLÓ FOLYAMATOK MODELLEZÉSÉRE

Tézisfüzet

Készítette: Veress Árpád

Témavezető: Dr. Sánta Imre egyetemi docens
BME
Repülőgépek és Hajók Tanszék

BME Repülőgépek



és Hajók Tanszék

Budapest, 2004

Bevezetés

Az áramlástani jelenségeket leíró nemlineáris parciális differenciálegyenleteknek, mint például az Euler- vagy a Navier–Stokes-(NS) egyenleteknek¹, komplexitásuk miatt ez ideig nem létezik zárt alakú, általános érvényű megoldása. A számítógépek gyors fejlődésének, valamint napjaink összetett mérnöki tevékenységeivel szemben támasztott egyre magasabb szintű elvárásoknak köszönhetően azonban egyre inkább előtérbe kerülnek az áramlástan numerikus módszerei (angolul CFD (Computational Fluid Dynamics), amelyek az alapegyenletek numerikus megoldása során nyújtanak hathatós segítséget az áramlástani-mérnöki problémák megoldásában.

Az intenzíven fejlődő olyan modern CFD módszereknek, mint pl. a DNS (Direct Numerical Simulation {közvetlen numerikus szimuláció}) [6,8,12 és mások] vagy a LES (Large Eddy Simulation {nagy örvények szimulációja}) [11,3,17,10 és mások] az ipari alkalmazásban való elterjedése a nagy számítógépi kapacitásigény miatt még várat magára.

Napjaink gyakorlati-mérnöki alkalmazásaiban leginkább használható, legpontosabb közelítést adó matematikai modellje a Reynolds-átlagolt Navier–Stokes-egyenletek. A különféle turbulenciamodellek (pl. Baldwin-Lomax, Spalart-Almaras, k- ϵ [14 és mások]) alkalmazását azonban nagy mennyiségű empirikus és tapasztalati összefüggés használata jellemzi, amelynek köszönhetően jelentős eltérés is adódhat a különféle modellek eredményei és a valóság között. Ez a probléma különösen igaz az átváltási szám körüli szimulációk esetében.

A súrlódásmentes ideális áramlás feltételezésével élve a NS-egyenletek a viszkózus és a hővezetési tagok elhanyagolásával az Euler-egyenletekre vezethetők vissza, amelyek az áramlásban megjelenő diszkontinuitások – lökéshullámok, kontakt- és az örvényfelületek – kezelhetősége szempontjából a nem viszkózus áramlás legmagasabb fokú approximációját jelentik². Az Euler-egyenletek elsősorban a határrétegen kívüli és a nagy Reynolds-számú leválás nélküli összenyomható áramlás modellezésére alkalmasak. Mivel napjaink ipari-áramlástani folyamataiban lezajló folyamatokra a nagy Reynolds-szám jellemző, ezért ebből a szempontból az Euler-egyenletek jó közelítésnek tűnnek.

¹ A modern irodalomban a NS-, illetve az Euler-egyenletek alatt nem csak az impulzusmegmaradás egyenletei értendők, hanem beletartoznak a tömeg- és az energia-megmaradás egyenletei is.

² Az “Euler-egyenletek” kifejezés minden esetben a kiindulási egyenletekre utal.

A különféle numerikus módszerek tekintetében a viszkózus és a nem viszkózus áramlásmoделlek esetén az elvégzendő műveletek száma ez utóbbi esetben a turbulencia modellek hiánya miatt kisebb, így a számítható szükséges gépidő is rövidebb. Másrészt, a legtöbb komplex 3D-s áramlás, a megfelelő szimmetria-feltételek, illetve közelítések figyelembevételével, visszavehető 2D-s folyamatokra. Az Euler-egyenletek esetén pl. a határréteg és ezáltal a szekunder-áramlások modellezésének hiánya miatt a 2, illetve a 3D-s eredmények közötti eltérés kisebb, mint a viszkózus áramlásmoделlezések esetén. Mindezek figyelembevételével – elsősorban az előtervezési folyamatok lerövidítésének érdekében – a kisebb gépidő-igény jól kompenzálhatja a lehető legnagyobb approximációs fokú 2D-s ideális áramlásmoделlekben rejlő közelítést.

A kutatás célja és a disszertáció összefoglalása

A disszertáció célja új, a hő- és áramlástechnikai gépek tervezésére és vizsgálatára alkalmas – saját fejlesztésű (2D-s Euler-alapú), kereskedelmi és a von Kármán Institute for Fluid Dynamics (VKI) kutatóintézetben kidolgozott programok segítségével felépített – eljárások kidolgozása. Az új tervezési módszerek bemutatása egy konkrét berendezés kifejlesztésén keresztül történik, azonban az eljárás során megállapított irányelvek és főbb lépések általános érvényűen alkalmazhatók a hasonló típusú berendezések tervezésében. Az újfajta eljárásrendszerek kidolgozása mellett fontos szempont volt a saját numerikus programok kompaktsága és továbbfejleszhetősége (pl. a 3D-s, időfüggő és viszkózus áramlás modellezésére) a minél szélesebb körű áramlásmoделl problémák megoldhatóságának érdekében.

Az értekezés alapvetően két fő részre bontható. Az első a gáz halmazállapotú közegek, míg a második a folyadékok áramlásának modellezésével foglalkozik. Mindkét részben a fejezetek felépítése hasonló. A matematikai modellek és a numerikus módszerek részletes ismertetése után az eljárások validálása (érvényesítése) következik. A gyakorlati szempontból fontos utolsó alfejezetekben pedig a különféle hő- és áramlástechnikai gépekben lezajló áramlásmoделl folyamatok modellezése során – a numerikus analízis vagy a tervezés által nyújtott eredmények elemzéséből – vonható le mérnöki szempontból fontos következtetés a vizsgált tervezési eljárásrendszerre vonatkozóan.

Az összenyomható ideális áramlás numerikus modellezése egy újfajta konvergencia gyorsító karakterisztikus és egy forgó gépek modellezése esetén alkalmazható peremfeltétel számítási eljárás bemutatásával kezdődik. A peremfeltételek adaptálására Jameson mesterséges disszipációs módszere [9], valamint napjaink legfejlettebb upwind eljárása: Roe által közelített Riemann módszer [7] került a számítógép által kezelhető formában kidolgozásra és validálásra a 2D-s Euler-egyenletek numerikus megoldására. Az eljárások összehasonlítása a Fluent kereskedelmi program és Van Leer fluxusvektor megosztáson alapuló módszer [14] számítógépes kidolgozásának segítségével történt. A forgógépekben lezajló folyamatok modellezésre kifejlesztett peremfeltétel számítási eljárás alkalmazhatóságának bemutatása egy transzszonikus áramlásba helyezett 2D-s lapátrács karakterisztikus görbéinek meghatározásán keresztül történik.

Modern kereskedelmi (CFX-TASCflow) és a VKI kutatóintézetben kidolgozott numerikus programok segítségével egy új eljárásrendszer kifejlesztésével a többfokozatú centrifugálkompresszor fokozatokat összekötő csatorna lapátmozgásának tervezése, optimalizálása valósítható meg. A számítógépes modellezés alapja egy 3D-s, állandó lapátheliségen alapuló lapátheliségi módszer. A VKI-s Euler-alapú inverz tervező eszköz és negatív lapátheliségi alkalmazásával jelentős javulás érhető el a tervezési paraméterek tekintetében.

A folyadékok és gázok kompaktabb, egy sémában történő modellezésének érdekében a véges térfogat módszerre átdolgozott Chorin pszeudo-kompresszibilitási módszere [1] alkalmazható leginkább az összenyomhatatlannak feltételezett 2D-s áramlás Euler-egyenleteinek numerikus megoldására. A program megvalósításához kapcsolódóan egy új abszorpciós szilárd fal és egy statikus nyomás bemeneti peremfeltétel számítási eljárás kifejlesztése fontos részét képezi a számítás gépidő csökkentésének és a környezeti beáramlások modellezésének irányába tett lépéseknek. A numerikus módszer alkalmazásával új tervezési irányelvek kidolgozása vált lehetővé a fordító típusúhoz hasonló folyadék sugárszivattyúk numerikus optimalizálásában. A számítógépes modellezések arra a következtetésre vezettek, miszerint a torokban alkalmazott letörés, az áramlásterelő fül, továbbá egy megfelelően megválasztott geometria-méret kombináció segítségével optimalizálható a hasonló típusú szivattyúk folyadékszállítására (5. ábra).

Tézisgyűjtemény

Az összenyomható áramlások numerikus modellezése

Numerikus eljárásokat dolgoztam ki és validáltam a kétdimenziós, nem viszkózus és összenyomható áramlás numerikus modellezésére, amelyeknek kiinduló egyenleteit a konzervatív formában felírt Euler-egyenletek alkotják [4]:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} &= 0; \\ \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2 + p)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} &= 0; \\ \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2 + p)}{\partial y} &= 0; \\ \frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u h_0)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v h_0)}{\partial y} &= 0;\end{aligned}$$

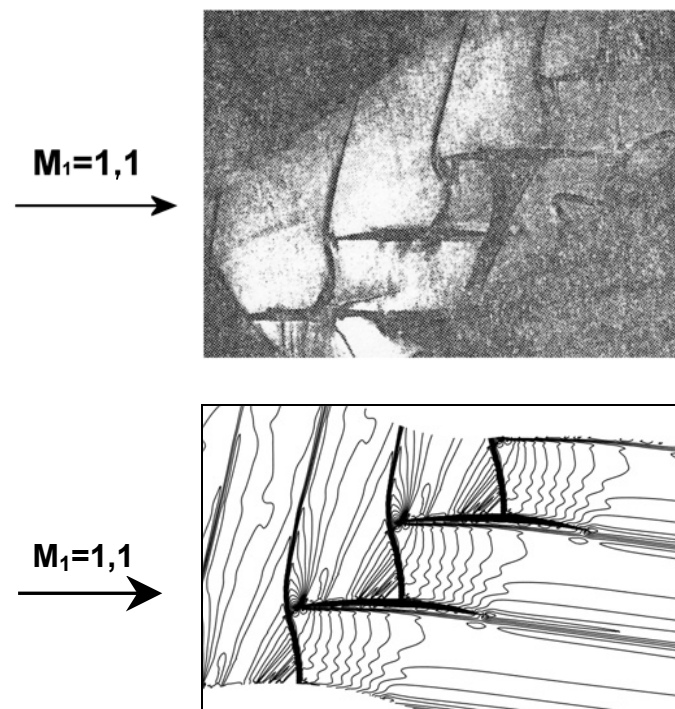
1. A lökeshullámok nagypontosságú megoldásának (high resolution method), illetve az 1.1. alponban kidolgozott újfajta peremfeltétel alkalmazása érdekében a számítógép által kezelhető formára dolgoztam át és validáltam Roe fluxus különbség megosztáson alapuló közelítő Riemann (upwind) módszerét [7] (2.2.1.2/b. alfejezet). (Megj.: a séma másod-, illetve magasabbrendű kiterjesztésekor a lökeshullámok közelében fellépő – a nem monoton tulajdonság okozta – oszcilláció elkerülésének érdekében Mulder-határolót alkalmaztam [5].)

1.1. Új, a karakterisztikák módszerén alapuló be- és kilépő peremfeltétel számítási eljárást dolgoztam ki, melyben a numerikus peremfeltételeket a cella normális irányú Mach-szám nemlineáris egyenletének segítségével számítottam ki (2.4.3. alfejezet). (Megj.: az áramlástan paramétereit leképeztem a cellából kifelé mutató egységvektor irányába. A szakadások nélküli belépő perem esetén a Riemann invariánsok állandóságának biztosítása érdekében a következő nemlineáris egyenltre jutottam:

$$a(M_B^{-2} + \frac{\gamma-1}{2})^{\frac{1}{2}} - b\left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_B^2\right)^{\frac{1}{2}} - k = 0;$$

A $df(M_B)/dM_B$ derivált meghatározása után a Newton–Raphson-eljárás segítségével határoztam meg a peremen érvényes M_B Mach-számot. Az eljárás során csökkent a peremről visszavert zavarások intenzitása, amely gyorsabb konvergenciához vezetett.)

2. A folyadékok és a gázok áramlásának ugyanazon sémában történő modellezése és a transzszonikus áramlás egyik legjobb hatásfokú



1. ábra. Lökeshullám-mintázat DCA lapátrácsban (fent: Schlieren felvétel [13], lent: saját számítás iso-Mach-szám görbékkel)

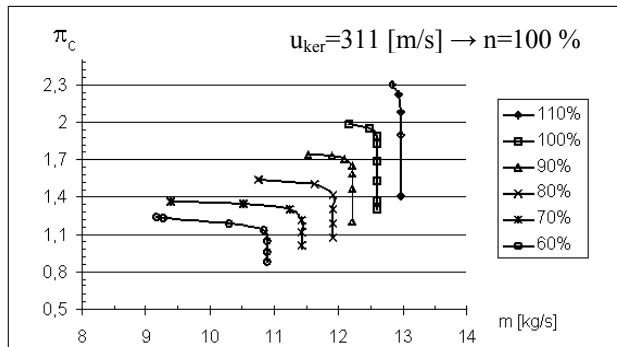
szimulációja érdekében (egyszerű programozhatóság, kis gépidő, illetve kis számítógépi kapacitás mellett megfelelő pontosság), valamint a 2.1. alponban leírt újfajta peremfeltétel alkalmazására egy cella-központú véges térfogat módszert dolgoztam ki (2.2.1.1. alfejezet). (Megj.: az eljárás időben állandósult ideális folyamatok modellezésére alkalmas, amelyben a negyedrendű Runge-Kutta módszer biztosítja – egy tetszőleges kezdeti állapotból kiindulva – az állandósult állapot elérését. A centrális diszkretizáció okozta oszcilláció elkerülését, illetve a szakadási felület közelében jelentkező pontatlanságok megszüntetését egy beépített numerikus szenzor segítségével Jameson [9] által kidolgozott mesterséges disszipáció biztosítja.)

2.1. Az összenyomható közegek numerikus áramlástan modellezése során új, a transzszonikus axiálkompresszorok forgó lapátsorának

2D-s matematikai modellezésébe integrálható olyan bemeneti peremfeltétel számítási eljárást dolgoztam ki, amely figyelembe veszi a forgórész fordulatszámát és a futólapátmozás mögött kialakult nyomásnövekedést, ezáltal teremtve meg a kapcsolatot az abszolút és relatív jellemzők között (2.6. alfejezet). (Megj.: ennek értelmében az általában előírt (T_0, p_0, α) , és az ismert (p) bemeneti peremfeltételek közül kettő nem független, vagyis a kialakult nyomásnövekedés és a fordulatszám határozza meg a tömegáramot, illetve a belépő áramlás irányát.

Az eljárás validálását egy transzszonikus áramlásba helyezett 2D-s DCA ((Double Circular Arc) kettős körívű álló) profilú lapátrács segítségével végeztem el (1. ábra).

A módszer alkalmazásaként meghatároztam egy előperdítés nélküli DCA profilú rotor karakterisztikáját (2. ábra). A numerikus analízis

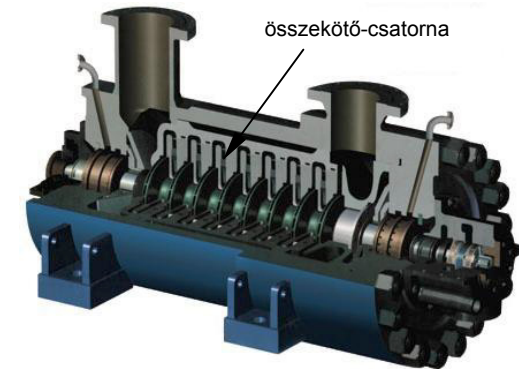


2. ábra. 2D-s kompresszor rotor karakterisztika

során a 2D-s lapátrácsot a lapátmozás külső felületén elhelyezkedő áramfelület síkba vetítésével állítottam elő.)

3. Modern kereskedelmi és a VKI-ban kifejlesztett numerikus-tervezési és optimalizálási programok felhasználásával a többfokozatú centrifugálkompresszor két fokozatát összekötő csatorna (3. ábra) lapátmozás-tervezésének újfajta irányelveit határoztam meg és dolgoztam ki, amelyet egy gyakorlati alkalmazáson keresztül mutatok be (2.7. alfejezet):

3.1. A számítógépes modellezés során egy új, állandó lapátterhelésen alapuló (ÁLT) lapáttervezési módszert fejlesztettem ki (2.7.3. alfejezet). (Megj.: Az analitikus eljárásban zérusértékű cirkuláció feltételezéséből indultam ki, amelyet a szívott és a nyomott oldal,



3. ábra. A-C többfokozatú centrifugál kompresszor

valamint két állandó sugarú kör által közrezárt ellenőrzőfelületre irtam fel. Az állandó lapátterhelés feltételét a lapát két oldalán kialakult sebességkülönbség állandóvá tételével értem el:

$$W_{ps} - W_{ss} = \cos \beta_{bl} \left(\frac{2\pi}{z} - \frac{\delta_{th}}{R \cos(\beta_{bl})} \right) \frac{d}{dm} (W_m R \operatorname{tg}(\beta_{bl})) = C$$

Ezek után numerikus-integrálással meghatároztam a lapátszöget a csatorna külső és belső oldalán. A lapátvastagság-eloszlást a vázvonala első 75%-ban egy ellipszis kis tengelyével párhuzamos metszékeivel modelleztem. A lapát másik felében lineáris eloszlást alkalmaztam a maximális vastagságtól az előírt kilépő él vastagságáig.)

3.2. Numerikus áramlástan vizsgálatok arra engedtek következtetni, hogy jelentős javulás érhető el a két tervezést meghatározó paraméter, a veszteségi tényező és a nyomásnövekedési tényező tekintetében:

$$\omega = \frac{\overline{p}_{in} - \overline{p}_{out}}{\overline{p}_{in} - \overline{p}_{in}}; C_p = \frac{\overline{p}_{out} - \overline{p}_{in}}{\overline{p}_{in} - \overline{p}_{in}};$$

ha a lapátok belépő élét kiterjesztem a lapát nélküli diffúzor kimenetéig (1. táblázat). Ebben az esetben megszűnt a fordítókönyökbe történő belépéskor kialakult leválási buborék. (Megj.: a numerikus analízist minden esetben a CFX-TASCflow kereskedelmi szoftver segítségével végeztem, amely az áramlástan gépekben lezajló folyamatok modellezésének napjaink élenjáró eszköze.)

Tervezés	Nem kiterjesztett	ÁLT + kiterjesztett	ÁLT + inverz tervezés
P_2^o [Pa]	299699,1	299526,6	299696,6
P_2^s [Pa]	159038,5	182298,2	174936,4
P_3^o [Pa]	236665,3	261108,8	264954,2
P_3^s [Pa]	225215,1	258238,	258414,2
ω	0,448	0,327	0,278
C_p	0,470	0,647	0,669
\dot{m} [kg/s]	4,68	4,5	4,64

1. táblázat. A lapátfejlesztések eredményei

- 3.3. A további optimalizáció érdekében egy 3D-s inverz lapáttervezési eljárás segítségével tovább tudtam javítani a tervezési paramétereket (2.7.4. alfejezet). (Megj.: a szoftver a VKI-ban kifejlesztett numerikus-tervező eszköz [2]. A program az általam előírt Mach-szám eloszlás alapján úgy módosította a lapátprofil, hogy sikerült megszüntetni a visszatérő ágban, a lapát szívott oldalán idáig minden esetben előálló leválást (1. táblázat)).
- 3.4. A további hatásfoknövelés érdekében elvégeztem a pozitív és negatív lapátelhajlítás másodlagos áramlás csökkentésére gyakorolt hatásvizsgálatát. Ennek eredményeként további javulást sikerült elérnem negatív lapátelhajlítás esetén a tervezési paraméterek tekintetében (2. táblázat) (2.7.6. alfejezet).

	Lapátelhajlítás nélkül	Negatív lapátelhajlítás	Pozitív lapátelhajlítás
ω	0.278	0.263	0.280
C_p	0.669	0.681	0.638

2. táblázat. A lapátelhajlítás hatása

Az összenyomhatatlan áramlások numerikus modellezése

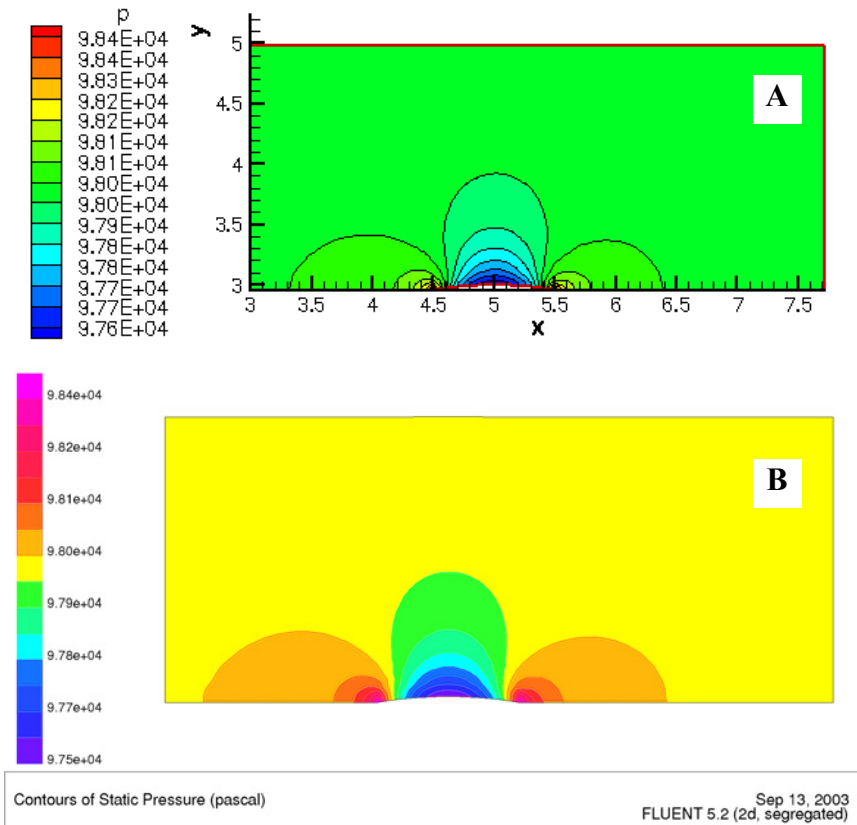
4. A folyadékok és a gázok áramlásának ugyanazon eljárásban történő modellezése, valamint Chorin módszerének [1] a Jameson-féle disszipációval [9] figyelembe vett és a véges térfogat modellre kidolgozott változatának megvalósítása érdekében numerikus eljárást dolgoztam ki és validáltam a kétdimenziós nem viszkózus, összenyomhatatlannak feltételezett áramlás numerikus modellezésére

(3.1. alfejezet), amelynek kiinduló egyenleteit a konzervatív formában felírt Euler-egyenletek alkotják [4]:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 ;$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial(u^2 + p/\rho)}{\partial x} + \frac{\partial(uv)}{\partial y} = 0 ;$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial(uv)}{\partial x} + \frac{\partial(v^2 + p/\rho)}{\partial y} = 0 ;$$



4. ábra. Állandó statikus nyomás görbék (A: saját eredmény, B: FLUENT)

(Megj.: az időben beállt folyamat elérésére a kis memóriagényű negyedrendű Runge-Kutta módszert alkalmaztam. A numerikus séma stabilitását Jameson [9] mesterséges viszkozitás segítségével értem el.)

4.1. Újfajta, alkalmazásfüggő peremfeltételt dolgoztam ki olyan speciális feltételek esetére, amelyekben a bemeneti torlóponti nyomás helyett a statikus nyomás megadásával lehet a környezeti beáramlásokat szimulálni (3.1.1. alfejezet).

4.2. Kidolgoztam egy újfajta abszorpciós fal peremfeltétel számítási eljárást az összenyomhatatlannak feltételezett áramlások numerikus modellezésébe. A módszer alkalmazásával 30-50 %-kal növelhető a konvergencia sebessége (3.2. alfejezet).

(Megj.: az előzőekben tárgyalt új eljárások validálását a FLUENT kereskedelmi szoftver segítségével végeztem el (4. ábra).)

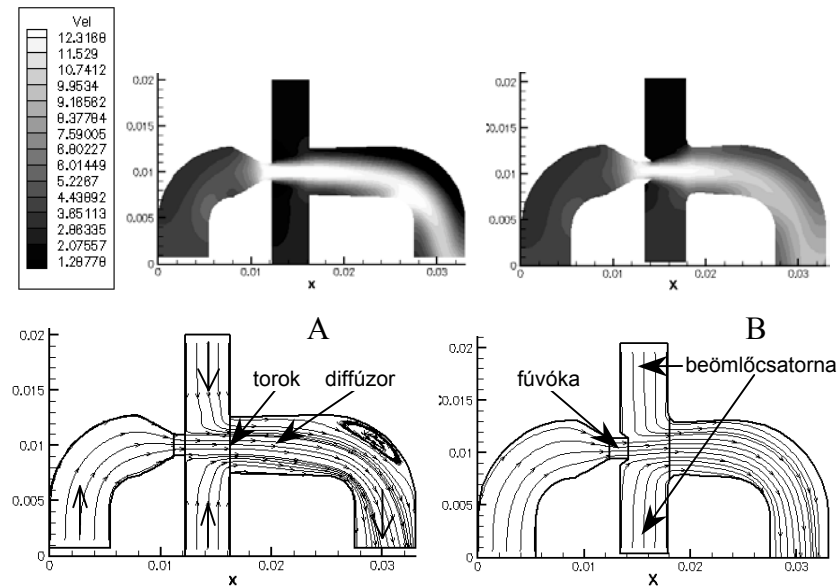
5.A 4. pontban kidolgozott numerikus eszköz segítségével új tervezési irányelveket határoztam meg és dolgoztam ki a fordító típusúhoz hasonló sugárszivattyúk numerikus optimalizálására. A tervezési eljárásrendszer kidolgozása egyben egy ipari-fejlesztői munka része volt [15], amelynek

célja egy új termék előállítása, azonban az eljárás során megállapított irányelvek általános érvényűen alkalmazhatók minden hasonló típusú szivattyú tervezésében. A munka során meghatároztam azokat a fontosabb irányelveket, amelyek figyelembevételével növelhető a folyadékcsállítás a hasonló típusú sugárszivattyúkban (3.3. alfejezet):

5.1. Az előzetes numerikus analízis során megállapítottam, hogy a folyadéksugár visszafordításakor a könyvekben előálló leválási buborék a torok beáramlási keresztmetszetében alkalmazott letörés segítségével megszüntethető (5. ábra).

5.2. Bebizonyítottam továbbá, hogy a fúvóka külső felületének konfúzoros kialakítása minden esetben növelte a folyadékcsállítást (5. ábra).

5.3. A direkt numerikus optimalizálás eredményeként egyértelműen meghatározható egy olyan szerkezeti kialakítás, amely a torok beáramlási keresztmetszet átmérőjének, a diffúzor hosszának, illetve a beömlőcsatorna méretének olyan kombinációja esetén áll elő, amikor maximális a szállítóképesség (5. ábra) [15].



5. ábra. Sebességeloszlás [m/s] (fent) és áramvonalak (lent) az 1,9 mm-s fúvóka átmérőjű sugárszivattyúban; A: Alap geometria, B: Optimalizált geometria

Hivatkozások

- [1] **Chorin, A. J.:** A Numerical Method for Solving Incompressible Viscous Flow Problems. *Journal of Computational Physics*, 2, 12-26., 1967.
- [2] **Demeulenaere, A.:** Conception et development d'une methode inverse pour la gmeration d'aubes de turbomachines, *Ph.D Thesis at VKI*, 1997.
- [3] **Germano M., Piomelli U., Moin P. and Cabot W. H.:** A Dynamic Subgrid-Scale Eddy Viscosity Model. *Phys. Fluids*, A3 (7), pp. 1760-1765. 1991.
- [4] **Hoffmann K. A., Chiang S. T. L. Siddiqui M. S. and Papadakis M.:** Fundamental Equations of Fluid Mechanics. *Engineering Education System*, ISBN 0-9623731-9-2, 1996.
- [5] **Mulder W. A. and Van Leer B.:** Implicit Upwind Methods for the Euler Equations. *AIAA 6th Computational Fluid dynamics Conference*, pages 303-310, *AIAA paper 83-1930*, 1983.
- [6] **Orszag S. A. and Patterson G.S.:** Numerical Simulation of Three-Dimensional Homogeneous Isotropic Turbulence. *Phys. Rev. Lett.*, 28:76-79, 1972.

- [7] **Roe, P. L.:** Approximate Riemann Solvers, Parameter Vectors, and Difference Schemes. *Journal of Computational Physics, Vol. 43 pp. 357-372.*, 1981.
- [8] **Rogallo R. S.:** Numerical Experiments in Homogeneous Turbulence. *NASA TM 81315*, 1981.
- [9] **Schmidt, W., Jameson, A.:** Recent Developments in Finite-Volume Time-Dependent Techniques for Two and Three Dimensional Transonic Flows. *Lecture Series at VKI: Computational Fluid Dynamics*, 1982.
- [10] **Shen L. and yue D. K. P.:** Large-Eddy Simulation of Free Surface Turbulence. *J. Fluid Mech.*, 440, pp. 75-116, 2001.
- [11] **Smagorinsky J.:** General Circulation Experiments With the Primitive Equations. *Mon. Weather Rev.*, 93, pp. 99-164, 1963.
- [12] **Spalart P. R.:** Direct Numerical Simulation of a Turbulent Boundary layer up to $Re_\theta = 1410$. *J. Fluid Mech.*, 187:61-98, 1988.
- [13] **Starken, H.:** Untersuchung der Strömung in ebenen Überschallverzögerungsgittern, *DLR-Forschungsbericht 71-99.*, 1971.
- [14] **Van Leer B.:** Flux Vector Splitting for the Euler Equations. *8th International Conference on Numerical Methods in Fluid Dynamics, Berlin Springer Verlag*, 1982.
- [15] **Veress, Á. (témavezető), Bányai, T., Berke, P. and Bitvai, I.:** Numerical Simulation and Semi-Optimisation on 1.9 Orifice Fuel Jet-Pump. *BME, DAS-VISTEON Project Report 2003*, 23 January, 2003.
- [16] **Wilcox D. C.:** Turbulence Modelling for CFD. *DCW Industries ISBN 0963605151*, 1998.
- [17] **Zang Y., Street R. L., and Koseff J. R.:** A Dynamic Mixed Subgrid-Scale Model and Its Application to Turbulent Recirculating Flows. *Phys. Fluids A5 (12)*, pp. 3186-3196, 1993.

A témában született jelentősebb publikációk

- 1) Veress, Á. – Braembussche, R.: Inverse Design of a Return Channel for a Multistage Centrifugal Compressor: **ASME Journal of Fluids Engineering**, Log Number 6069BS.
- 2) Veress, Á. – Sánta, I.: A 2D Mathematical Model on Transonic Axial Compressor Rotor Flow: Budapest University of Technology and Economics, **Periodica Polytechnica Transportation Engineering**, 2002 30/1-2, 53-68 p.
- 3) Veress, Á.: Computational Investigation on Deswirl Vanes for Multistage Centrifugal Compressors, **Periodica Polytechnica Transportation Engineering** 2003 31/1-2, 53-78 p.

- 4) Veress, Á.: Incompressible Flow Solver by Means of Pseudo-Compressibility Method, **Periodica Polytechnica Transportation Engineering** (www.pp.bme.hu) (elfogadó levél rendelkezésre áll). A cikk eredeti kiadása elektronikus formátumban a <http://hej.szif.hu> honlapon található az alkalmazott és numerikus matematika szekcióban a közlésre elfogadott cikkek oldalán. 2003
- 5) Veress, Á.: Simplified Theory on Mathematical Model of Compressor Characteristic Working over Sound Speed, **22nd International Congress of Aeronautical Sciences** konferencia, Harrogate, Nagy-Britannia, 2000.
- 6) Veress, Á. - Sánta, I.: High Resolution Euler Solver for 2D Transonic Flow: **8th Mini Conferences on Vehicle System Dynamics, Identifications and Anomalies VSDIA'2002** konferencia, Budapest, 2002.
- 7) Veress, Á. – Braembussche, R.: New Approach to Radial Compressor Return Channel Design, **Conference on Modelling Fluid Flow (CMFF'03)**, The 12th International Conference on Fluid Flow Technologies, Budapest, Hungary, 2003.
- 8) Veress, Á.: Rumsey's Approximated Riemann Solver for 2D Transonic Axial Compressor Rotor Performance Map, **Conference on Modelling Fluid Flow (CMFF'03)**, The 12th International Conference on Fluid Flow Technologies, Budapest, Hungary, 2003.

A témához kapcsolódó kutatási jelentések

- 1) Veress, Á. (témavezető)– Bányai, T. – Bitvai, I. – Berke, P.: Numerical Simulation and Semi-Optimisation on 1.9 Orifice Fuel Jet-Pump, **VISTEON Hungary Kft.**, 8000 Székesfehérvár, Aszalvölgyi út 9-11. Tel.: (06-22) 530-122. 2003.
- 2) Veress, Á. (témavezető) – Bitvai, I. – Nagy, L. – Korody, E.: Jaguar X400 Fuel Tank Internal Fuel Delivery System and Suction Type Jet Pump Analysis and Developments – Project, **VISTEON Hungary Kft.**, 8000 Székesfehérvár, Aszalvölgyi út 9-11. Tel.: (06-22) 530-122. 2003.

Budapest, 2004-01-06

.....
Veress Árpád