

OTKA Nyilvántartási szám: T 043493

ÖSSZEFOGLALÓ, ZÁRÓJELENTÉS

Témavezető neve **Dr. Bencze Ferenc**

A téma címe:

Axiális átömlésű áramlástechnikai forgógépek korszerű tervezési módszerének kidolgozása a háromdimenziós áramlás figyelembevételével, szimulációs és kísérleti eszközök alkalmazásával

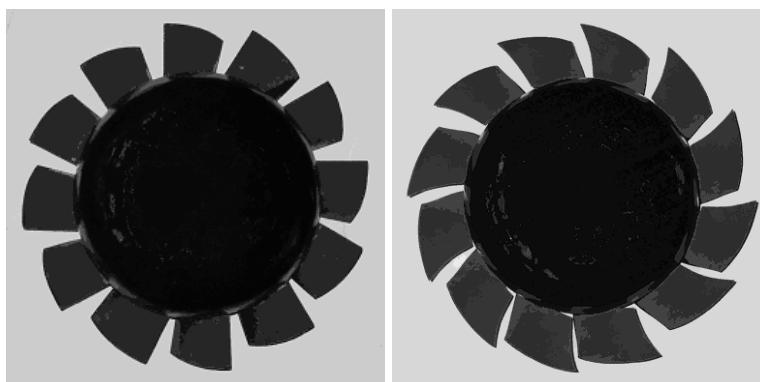
A kutatás időtartama: **2003 - 2005**

Az OTKA projekthez kapcsolódó, általunk készített publikációk időrendi jegyzéke a dokumentum legvégén található. A Zárójelentésben e publikációkra sorszámuk szerint hivatkozunk.

1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉS

Axiális átömlésű forgó munkagépek – ventilátorok, kompresszorok, szivattyúk – a műszaki élet számos területén alkalmazást nyernek. A korszerű axiális átömlésű munkagépeket számos esetben sugár mentén növekvő lapátcirkulációra méretezik. Ezáltal ún. fokozott fajlagos teljesítményű gépek állíthatóak elő, azaz előírt légtechnikai teljesítmény kisebb méretű és tömegű géppel, mérsékelt fordulatszámon valósítható meg. Az áramlástechnikai gépek méret- és fordulatszám-csökkentése fontos gyakorlati szempont ergonómiai (könnyebb szállítás, beépítés, karbantartás) és akusztikailag (zajcsökkentés) egyaránt.

A forgógépek fejlődésének egy másik jelenlegi irányvonala az ún. lapátnyilazás. Ennek lényege, hogy az eredetileg egyenes lapátok egyes metszeteit a lapáthúrral párhuzamosan eltoljuk (**1. ábra**). A lapát nyilazása révén javítható a gépek hatásfoka, mérsékelhető a zajuk és kiterjeszhető a leválásmentes, stabil üzemállapot-tartomány.



1. ábra. Egyenes és nyilazott járókerék-lapátozás

A sugár mentén változó cirkulációra történő tervezés lapátnyilazással történő kombinációja ígéretes kutatás-fejlesztési munka, nagy fajlagos teljesítményű, jó hatásfokú és széles stabil üzemi tartományú gépek kifejlesztése érdekében. Bonyolulttá teszi azonban a lapát-konstrukció tervezési kezelhetőségét, hogy mindkét fejlődési irányvonal bonyolult háromdimenziós (3D) jelenségeket okoz a lapátcsatorna-áramlásban. A sugár mentén növekvő cirkulációra történő tervezés elkerülhetetlen következménye, hogy a lapátok kilépő éléről örvények úsznak le, és így a lapátcsatornában jellegzetes háromdimenziós áramlás alakul ki a teljes lapátcsatorna-keresztmetszetben. A lapátnyilazás pedig önmagában is a lapátterhelés sugárirányban történő átrendeződését okozhatja, tehát akaratlanul is sugár mentén változó cirkulációt eredményezhet.

A nemzetközi szakirodalmat áttekintve megállapíthatjuk, hogy a lapátnyilazással széles körű irodalom foglalkozik. Azonban e közlemények sok esetben olyan nyilazási technikával foglalkoznak, amely a lapátvégekre, illetve a belépő él környezetére korlátozódik. Mindazonáltal szükséges lenne olyan mérnöki irányvonalak kidolgozása, amelyek tájékoztatást adnak arról, hogyan történjék a nyilazás a teljes lapátmagasság mentén. Különösen hiányoznak a szakirodalomból olyan irányvonalak, amelyek révén sugár mentén eleve változó cirkulációra méretezett lapátokhoz alkalmazható a lapátnyilazás, jól előrejelezhető eredménnyel.

Fentiek alapján az OTKA program fő célkitűzése: mérnöki támpontok felkutatása a nyilazott, sugár mentén változó cirkulációra méretezett lapát alakjának és a lapátcsatornában kialakuló 3D áramlásnak az összehangolására, az előírt áramlástechnikai teljesítmény megvalósulása és az összhatásfok fokozása érdekében. E célkitűzést a munkatervhez igazodva, azt kiegészítve az alábbi lépésekben valósítottuk meg. Az egyes pontok tárgyalásánál a vonatkozó publikációinkra hivatkozunk.

A/ 3D áramlási jellegzetességeket mutató (nyilazott, sugár mentén változó cirkulációra tervezett, illetve ezek kombinációját megvalósító) egyedülálló lapátok és axiális átömlésű lapátrácsok tervezése [1], [3], [6-8].

B/ Numerikus áramlástan (Computational Fluid Dynamics, CFD) módszertan kidolgozása, a lapátok és lapátok CFD vizsgálata [1-3], [5-7], [9], [12-13].

C/ Méréstechnikai módszertan kidolgozása, a lapátok és lapátok kísérleti vizsgálata [1-3], [6-8], [11], [14].

D/ A lapátok optimalizációja a numerikus áramlástan és kísérleti vizsgálatok alapján, iteratív tervezés [6-7], [12].

E/ A tervezési, numerikus áramlástan és kísérleti tapasztalatok alapján mérnöki támpontok megfogalmazása [2], [4], [6], [10].

A továbbiakban az OTKA program eredményeit a fenti célkitűzések szerinti bontásban foglaljuk össze.

A/ *Lapátok és lapátrácsok tervezése*

Tanulmányainkat a vizsgált lapátsűrűség szempontjából két irányba indítottuk. Az ipari axiálventilátorok lapátok száma számos esetben kis lapáthúr / lapátosztás viszonyú, úgynevezett híg lapátok, ennek megfelelően aerodinamikai viselkedésük megfeleltethető egy egyedülálló szárny működésének. A tervezési, numerikus áramlástan és mérési munka egyik vonulata nyilazott és nyilazatlan egyedülálló szárnyakra irányult [1], [3], [8]. A sugár mentén változó cirkulációt a lapáthúr lapátmagasság mentén történő változtatásával valósítottuk meg, ezzel

egyidejűleg a lapát-felfűzési vonalat a főáramlás irányában megdöntve hajtottuk végre a nyilazást.

Vizsgálatunk másik csoportja nagyobb rácssűrűséggel rendelkező forgó lapátozásokra irányult [6-7]. Ezeknél a sugár mentén növekvő lapátcirkulációt a sugár mentén közel állandó lapáthúrhossz és lapátszög megvalósításával értük el. A felfűzési vonal alakját úgynevezett kerületi irányú előferdítéssel szabtuk meg: a lapátmetszeteket a kerület mentén forgásirányban eltoltuk.

B/ Numerikus áramlástani módszertan, CFD vizsgálatok

A lapátozások numerikus áramlástani vizsgálatára a FLUENT véges térfogatok módszerén alapuló szoftvert alkalmaztuk. A numerikus áramlástani modelleket a lehetőségekhez mérten a későbbiekben ismertetett mérések eredményei alapján valamint szakirodalmi adatokra támaszkodva validáltuk. Az áramlás jellegzetességeit vizsgáltuk egyedülálló lapátok [1], [3], [13] valamint álló [5], [9] és forgó [6-7] lapátrácsok esetén egyaránt. A vizsgálatok fő szempontja volt az egymással áramlástechnikai szempontból összehasonlítható nyilazott és nyilazatlan lapátozások áramlási jellegzetességeinek összehasonlító vizsgálata.

A Technische Universität Graz, Institut für Hydraulische Strömungsmaschinen intézettel együttműködésben vizsgálatainkat szivattyú-járókerekre irányuló szimulációs vizsgálatokkal is kiegészítettük [2].

A CFD vizsgálatok alapján megkezdtük egy olyan módszertan kidolgozását, amelynek révén a lapátrácsok optimalizálása a klasszikus „trial-and-error” módszer helyett szisztematikus módon, genetikus algoritmus felhasználásával lesz megvalósítható [12].

C/ Kísérleti vizsgálatok

A megtervezett egyedülálló lapátokat legyártattuk és az Áramlástan Tanszék NPL szélcsatornájában kísérleti vizsgálatoknak vetettük alá. E kísérletek áramlás láthatóvá tételét, a szívott oldali határrétegben és a nyomban lézer Doppler anemométeres (LDA) sebesség- és turbulenciamérést, a lapátfelületen és a nyomban pedig statikus nyomáeloszlás-mérést foglaltak magukban [1], [3], [8].

A gödöllői Mezőgazdasági Gépesítési Intézet legyártatta és a telephelyén kiépített szélcsatornában üzembe helyezte a [6-7] publikációkban szereplő, ferdített lapátozású axiálventilátort. Ennek globális (jelleg- és hatásfokgörbe-) mérésére a gödöllői kollégák számunkra lehetőséget biztosítottak [11]. A közelmúltban fejlesztettünk ki egy többkomponensű hődrótos mérőrendszert [14], amelynek révén kimértük reprezentatív üzemiállapotokban a járókerék előtti és mögötti 3D sebességtér részleteit. A mérési adatok jelenleg kiértékelés alatt állnak; a [6-7] cikkekben bemutatott CFD eszköz validációját fogják szolgálni.

A Technische Universität Graz, Institut für Hydraulische Strömungsmaschinen intézettel együttműködésben lehetőségünk nyílt arra is, hogy a vizsgálatokat szivattyú-járókerék lapátozásának belsejében valamint a lapátozás mögött végzett lézer Doppler sebességmérés és össznyomás-mérés adataival egészítsük ki [2].

D/ Lapátózás-optimalizálási szempontok

A lapátalak optimalizálása során fontosnak bizonyultak az alábbi szempontok:

- Az optimalizálás kiindulási lépése az egyenes felfűzési vonalú, nyilazatlan lapát. Cél a nyilazatlan lapátózás légtechnikai teljesítményének megtartása, emellett a hatásfok feljavítása a felfűzési vonal módosítása mellett is [6-7].
- Nem elegendő a tervezési – névleges – munkapontban jó üzemviteli és energetikai jellemzőket elérni. Igen fontos szempont, hogy erősen fojtott üzemiállapotban a jelleggörbe ne törjön le drasztikusan, és a hatásfok viszonylag magas maradjon, a lapátnyilazás jótékony hatásának kihasználásával [6-7].
- Lapátnyilazás alkalmazásakor lehetőség szerint olyan egyszerűen paraméterezhető geometriai megoldást kell választani – pl. körív alakú felfűzési vonal –, amelyet a jövőbeli szisztematikus optimalizálási algoritmus [12] könnyen képes kezelni.

E/ Összefoglalás; mérnöki támpontok

Az OTKA projekt során nyert tervezési, szimulációs és mérési tapasztalatok alapján megfogalmazott, a sugár mentén változó cirkuláció és a lapátnyilazás kombinációjával kapcsolatos fő mérnöki támpontokat az alábbiakban foglaljuk össze. Az egyes megállapításoknál a legrepresentatívabb publikációkra hivatkozunk.

1/ Analitikus modellezés alapján [10], az analitikus modellt szimulációs és mérési tapasztalatokkal kiegészítve kimutattuk, hogy a szívott oldali lapát-határréteg anyaga radiális irányban kifelé mozog. Ez a fokozott veszteségekkel rendelkező közeg a lapátcsúcsnál összegyűlve pangó zónát alkot. Fojtott üzemiállapotban ez a pangó zóna kiterjedté válik, és általa jut el a lapátcsatorna a „leválás” (instabil üzem, emelkedő jelleggörbe-ág) állapotába. A radiális kifelé áramlás sugár mentén növekvő cirkulációra tervezett gépek esetén fokozottan jelentkezik, a lapátvégről leúszó örvények hatására. A lapát előrenyilazása hatására a pangó közegrész lapátcsúcsnál történő felgyülemlése mérsékelt, illetve ki tud ürülni a lapátcsatornából.

A fentiek folyamánya: sugár mentén növekvő cirkulációra tervezett gépek esetén a lapátózás előrenyilazásának jótékony hatása fokozottan érvényesül a széles leválásmentes üzemi tartomány megvalósulása szempontjából [6].

2/ Mind a lapátnyilazás, mind a sugár mentén változó cirkulációra történő tervezés 3D áramvonalakat eredményez a szívott oldali határrétegben. E két hatás összehangolásával, megfelelő lapátgeometriával elérhető, hogy a közegrészek minimális nyomásgradiens ellenében, a lehető legrövidebb úton eljussanak a kilépő élig. Ezáltal a lapátúrlódás és a növekvő nyomással szembeni áramlás kedvezőtlen hatásai – határréteg-vastagodás, leválás – mérsékelhetőek; a profilveszteségek csökkenthetőek [1], [3], [4].

3/ A túlzott mértékű előrenyilazás hatására a lapátterhelés a lapátcsúcstól a lapáttól felé tolódik el, így a sugár mentén csökkenő cirkuláció jön létre. Ennek eredményeképpen tervezési üzemiállapotban a szívott oldalon az agy felé mozoghat a közeg, miáltal nagyobb úthosszon távozik a lapátcsatornából. Emiatt a profilveszteségek megnövekednek, a gép hatásfoka csökken. Tehát az előrenyilazás, egyébként az 1. pontban leírt kedvező hatása mellett, a tervezési pontban hatásfokromlást eredményezhet [2].

4/ A szakirodalom kedvező hatásúnak tekinti a lapátcsúcsnál az előre-, a lapáttónél pedig a hátranyilazást. Ezek által ugyanis a lapátterhelés csökken és depressziócsúcs a kilépő él felé tolódik el. Ennek hatására a gyűrűfali veszteségek mérséklődéséről számolnak be.

Tapasztalatainak azt mutatják, hogy bár a veszteségek valóban csökkennek, a lapátherhelés csökkenése miatt az ideális össznyomás-növekedés („Euler-munka”) is csökken. Ha az utóbbi csökkenése dominál, a hatásfok helyi romlása következik be. Tehát a nyílazás jótékony hatását kritikátlanul nem szabad elfogadni, azt a veszteségek és az Euler-munka változásának együttes figyelembe vételével kell megítélni [2], [6].

5/ A fenti kvalitatív megállapítások előrevetítik, hogy a sugár mentén növekvő cirkulációra tervezett, nyílazott lapátozások optimalizációjának elengedhetetlen eszköze a számítógépes szimuláció, amely a lapátcsatorna-áramlás 3D, sűrűdés által jelentősen befolyásolt jelenségeit kvantitatíve is helyesen visszaadja. Kizárólag ilyen CFD eszköz alkalmazásával valósítható meg maradéktalanul a lapátrácsok szisztematikus optimalizációja.

E helyütt jegyezzük meg, hogy eredményeink nemzetközi közlésének hatékonyabbá tétele érdekében az OTKA projekt témájához kötődően az alábbi cikkeket nyújtottuk be a megjelölt impakt faktoros folyóiratokhoz. A cikkek bírálat illetve átdolgozás alatt állnak. A többfordulós bírálat hosszú átfutási ideje miatt az OTKA program időtartama alatt nem kerültek közlésre, de bennük hivatkozunk az OTKA projekt azonosítójára.

[I] Vad, J., Rábai, G., Lohász, M. M. „Aerodynamic Study on Linear Cascades of Straight, Arc-Swept and Twisted Blades”, International Journal of Heat and Fluid Flow (benyújtva 2005-ben, a bírálat első fordulója lezajlott, jelenleg átdolgozás alatt)

[II] Vad, J., Kwedikha, A. R. A., Jaberg, H. „Effects of Blade Sweep on the Performance Characteristics of Axial Flow Turbomachinery Rotors”, Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers, Part A – Journal of Power and Energy (benyújtva 2005-ben, a bírálat első fordulója lezajlott, az átdolgozott változat benyújtva 2006-ban, jelenleg a bírálat második fordulójában)

[III] Vad, J., Morlin, B. „Fluid Mechanical Model for Formation of Mineral Wool Fibers Applied in Polymer Composites”, Materials Science Forum (A nyílazott lapátozásokat kedvező rezgéstani tulajdonságai és mérsékelt költségei miatt célszerű polimer kompozitból gyártani. A cikk ezirányú kutatási eredményeinket tartalmazza. Benyújtva 2005-ben, a bírálat első fordulója lezajlott, az átdolgozott változat benyújtva 2006-ban, jelenleg a bírálat második fordulójában)

[IV] Vad, J., Koscsó, G., Gutermuth, M., Kasza, Zs., Tábi, T., Csörgő, T. „Study of the Aero-Acoustic and Aerodynamic Effects of Soft Coating upon Airfoil”, JSME International Journal, Series C (Benyújtva 2005-ben, a bírálat első fordulója lezajlott, az átdolgozott változat benyújtva 2006-ban, jelenleg a bírálat második fordulójában)

IRODALOMJEGYZÉK

[1] Vad, J., Constandinides, G., Peretti, F., Gutermuth, M., Régert, T. (2003), “Investigation on Combined Effects of Sweep and Spanwise Changing Design Circulation on Airfoil Aerodynamics”, Proc. **Conference on Modelling Fluid Flow (CMFF'03)**, Budapest, Hungary, Vol. 1, pp. 145-152.

[2] Vad, J., Kwedikha, A. R. A., Jaberg, H. (2004), „Influence of Blade Sweep on the Energetic Behavior of Axial Flow Turbomachinery Rotors at Design Flow Rate”, Proc. **2004 ASME TURBO EXPO**, Vienna, Austria, ASME Paper GT2004-53544 (CD-ROM)

- [3] Vad, J. (2004), „Effects of Sweep and Spanwise Changing Circulation Applied to Airfoils: A Case Study”, **Journal of Computational and Applied Mechanics**, Vol. 5, No. 2. pp. 383-400.
- [4] Van den Braembussche, R. A., Vad, J. (2004), „Challenges in Optimisation of Axial Flow Turbomachinery Blades for 3D Flow, Including Sweep and Dihedral Effects”, in: Vad, J., Lajos, T., Schilling, R. (Eds.), **Modelling Fluid Flow - State of the Art**, Springer Verlag Heidelberg, pp. 99-103.
- [5] Vad, J., Lohász, M. M., Rábai, G., Rácz, N., Tajti, Á., Vassatis, A., Corsini, A. (2005), „A Synthetic Method for Judging the Validity of a CFD Tool Applied to Axial Flow Cascades”, Proc. **6th European Conference on Turbomachinery Fluid Dynamics and Thermodynamics (ETC'05)**, Lille, France, pp. 10-19.
- [6] Vad, J., Kwedikha, A. R. A., Kristóf, G., Lohász, M. M., Rábai, G., Watanabe, K., Rácz, N. (2005), „Effects of Blade Skew in an Axial Flow Rotor of Controlled Vortex Design”, Proc. **6th European Conference on Turbomachinery Fluid Dynamics and Thermodynamics (ETC'05)**, Lille, France, pp. 46-55.
- [7] Vad, J., Kwedikha, A. R. A., Rábai, G. (2005), „A lapátózás kerületi irányú előferdítésének hatása sugár mentén növekvő cirkulációra tervezett axiális átömlésű járókerékben”, **GÉP**, LVI. Évf., 1. szám, pp. 39-47.
- [8] Vad, J., Koscsó, G., Gutermuth, M., Kasza, Zs., Tábi, T., Csörgő, T. (2005), „Reduction of Flow Generated Noise of Airfoils by Means of Acoustically Soft Coating”, Proc. **VSTech 2005, The First International Symposium on Advanced Technology of Vibration and Sound**, Hiroshima, Japan, Paper No. 050606, pp. 29-34.
- [9] Rábai, G., Vad, J. (2005): „Validation of a Computational Fluid Dynamics Method to Be Applied to Linear Cascades of Twisted-Swept Blades”, **Periodica Polytechnica**, Mechanical Engineering Series, Vol. 49, No. 2, pp. 163-180.
- [10] Vad, J. (2006), „Analytical Modeling of Radial Fluid Migration in the Boundary Layer of Axial Flow Turbomachinery Blades”, Proc. **2006 ASME TURBO EXPO**, Barcelona, Spain, ASME Paper GT2006-90523 (CD-ROM)
- [11] Vad, J., Kwedikha, A. R. A. (2006), „Experimental Investigation on an Axial Flow Wind Tunnel Fan by Means of On-Site Measurements”, Proc. **GÉPÉSZET'2006 Konferencia (Conference on Mechanical Engineering)**, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest, Hungary (CD-ROM)
- [12] Rábai, G., Vad, J., Lohász, M. (2006), „Systematic Optimization of the Inlet Flow Condition for an Axial Flow Blade Cascade”, Proc. **GÉPÉSZET'2006 Konferencia (Conference on Mechanical Engineering)**, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest, Hungary (CD-ROM)
- [13] Nagy, L., Vad, J., Lohász, M. (2006), „RANS Simulation of RAF6 Airfoil”, Proc. **GÉPÉSZET'2006 Konferencia (Conference on Mechanical Engineering)**, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest, Hungary (CD-ROM)
- [14] Horváth, Cs., Vad, J. (2006), „Development and Application of a Multi-Component Hot Wire Measuring System”, Proc. **GÉPÉSZET'2006 Konferencia (Conference on Mechanical Engineering)**, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest, Hungary (CD-ROM)