

A „Fokozott terhelésű axiális átömlésű járókerék-lapátrácsok aerodinamikai és zajkeltési mechanizmusainak együttes vizsgálata”

című OTKA K 83807 projekt záró beszámolója

1. ELŐZETES MEGJEGYZÉSEK

A beszámolóban az egyes feladatrészeket, a projekt eredményeit dokumentáló – megjelent vagy elfogadott – közleményeinkre hivatkozunk, melyek feltüntetik az OTKA támogatást. A publikációk listája a dokumentum végén található, az OTKA közleményjegyzékének megfelelő formátumban. A közlemények elkészítésének időtartama és a publikációs folyamat átfutási ideje miatt az elvégzett feladat és a közlemény elfogadási / megjelenési dátuma között jelentős eltérések adódhatnak. Ennek megfelelően a hivatkozott közlemények nem időrendi sorrendben szerepelnek.

Az eredeti munkaterv végrehajtásában a következő akadályozó körülmények adódtak. E körülményeket a Kollégium felé írásban jeleztük; azokat a Kollégium tudomásul vette. A személyi változásokat a ”Kutatás adatai” rovatban a weboldalon külön részleteztük. Túlmenően a Lohász Máté kilépése miatti átmeneti emberi erőforrás-hiányon – amit új kollégák bevonásával orvosoltunk –, a következő akadályozó körülmények is felmerültek. Az OTKA Iroda a tervezett projekt-költségvetés átütemezését kérte, rajtunk kívül álló ok miatt. Az átütemezés miatt a Tóth Péter kutatói alkalmazásához szükséges személyi keret nem állt rendelkezésünkre az 1. projekt-évben. A műszerbeszerzésre fordítható támogatási összeg az 1. projekt-éven belül viszonylag későn állt rendelkezésünkre.

E körülmények miatt a munkaterv szerinti időbeli ütemezéstől el kellett térnünk. Az időtervtől való eltéréseket az 1. és 2. részjelentésekben már részleteztük, azokra a projektzáró beszámolóban már nem térünk ki.

Az akadályozó körülmények ellenére a munkatervet tartalmilag összességében megvalósítottuk, a kitűzött projekt-célokat kompromisszumok révén elértük. A szövegben **vastag betűvel emeltük ki a projekt munkatervében szereplő feladatrészek címszavait**, majd ismertetjük az adott feladatrész teljesítésének részleteit. A projekt kidolgozása során a munkatervben szereplő feladatrészeket maradéktalanul lefedtük, ennek megfelelően a projekt célkitűzéseit megvalósítottuk.

2. BEVEZETÉS; A PROJEKT CÉLKITŰZÉSEI

Axiális átömlésű ventilátorok széles körben alkalmazást nyernek az alábbi területeken:

- Fűtés, hűtés, szellőztetés, levegőkezelés (pl. hűtőventilátorok),
- Speciális áramlástechnikai feladatok (pl. szélcsatorna-méréstechnika),
- Ipari légtechnikai feladatok (pl. technológiai levegő áramoltatása).

A korszerű axiális átömlésű ventilátorok járókerekeivel kapcsolatban egyidejűleg jelentkeznek a következő elvárások:

- Fokozott fajlagos teljesítmény – azaz előírt légtechnikai teljesítmény megvalósítása mérsékelt gépmérettel, fordulatszámmal és / vagy lapátszámmal, a méret- és tömegcsökkentés, valamint a lapátozás mechanikai igénybevételének mérséklése érdekében. A fokozott fajlagos teljesítmény megvalósításának alapvető eszköze a járókerék-lapátozás sugár mentén növekvő lapátcirkulációra való méretezése – a továbbiakban: *változó cirkulációjú üzemállapot*. Az így előálló lapátozás nagyobb sugarakon lévő lapátmetszetei *fokozott terhelésűek*: fokozott mértékben hozzájárulnak a globális össznyomás-növekedés és térfogatáram megvalósulásához.
- A fokozott terhelés mellett is jó összhatásfok: a hajtás energiahatékonyságának, a hajtó motor teljesítmény-, méret- és árcsökkentésének elérésére.
- Mérsékelt zajkibocsátás, a ventilátor-üzem környezetterhelésének mérséklésére.

A fenti kívánalmak egyidejű teljesítése szükségessé teszi a járókerék-lapátcsatornában kialakuló áramlás *aerodinamikai-energetikai jellegzetességeinek és az azokhoz kötődő széles sávú zaj-keltési mechanizmusoknak az összehangolt vizsgálatát*. A változó cirkulációjú üzemállapot, a fokozott lapátterhelés olyan speciális áramlási jelenségekkel jár együtt, amelyek akusztikai szemszögű rendszerezett vizsgálata hiánypótló. A projekt munkaterv szerinti célkitűzése e speciális jelenségek kombinált aerodinamikai-energetikai-akusztikai vizsgálata, és ez által a következő alapkérdések megválaszolása, számszerűsített tervezői irányvonalak formájában:

- Hogyan szabjunk határt a változó cirkulációjú tervezés során még megengedhető maximális lapátterhelésnek, a fokozott fajlagos teljesítmény elérése érdekében, azonban úgy, hogy a lapát-határréteg extrém megvastagodása miatt fokozódó zajt még elfogadható szinten tarthassuk?
- Milyen mértékben járulnak hozzá a változó cirkulációjú üzemállapothoz kötődő speciális áramlási jelenségek a ventilátorzaj kialakulásához?
- Axiális ventilátor-járókerek energetikai javítása és zajcsökkentése érdekében gyakran alkalmazzák a lapátmozgás *előrenyilazását*. A lapát nyilazása során a kiindulási (nyilazatlan) lapát hengerfelületekre illeszkedő lapátmetszeteit a lapáthúrral párhuzamosan eltoljuk. Előrenyilazás esetén egy adott sugáron lévő lapátmetszet a rááramlás irányában előretolva, előrébb helyezkedik el, mint a kisebb sugáron lévő szomszédos lapátmetszet. Hogyan tudjuk a változó cirkulációjú üzemállapothoz kötődő áramlási jelenségeket jótékonyan befolyásolni előrenyilazással, a zaj csökkentése érdekében, az előírt légtechnikai teljesítmény megtartása és az összhatásfok javítása mellett?

A projekt kidolgozásának módja: mérési és numerikus számítási módszerek célzott együttműködése, a mikrofontömbös méréstechnika (Phased Array Microphone, **PAM**) valamint a numerikus áramlástan és numerikus aero-akusztika (Computational Fluid Dynamics, **CFD**; Computational Aero-Acoustics, **CAA**) korszerű eszközeinek bevonásával. A tervezői irányvonalakat konkrét esettanulmányok mérési adatainak és részletes numerikus számítási eredményeinek feldolgozása alapján számszerűsítjuk.

Vizsgálataink tárgyát a következő axiális átömlésű ventilátorok, ill. ventilátor-csoportok képezték. E ventilátorok gyakorlati szempontból reprezentatívak, eltérő alkalmazásokat és konstrukciós megoldásokat képviselnek, illeszkedve az e fejezet elején felsorolt felhasználási területekhez. A vizsgált ventilátorok közös jellemzője a *változó cirkulációjú üzemállapot* és az *előrenyilazás*.

- Villamos motorok hűtésére szolgáló ventilátor-csoport, iteratív lépésekben tervezve / áttervezve; a továbbiakban: **hűtőventilátorok**.
- Szélcsatornát kiszolgáló ventilátor; a továbbiakban: **szélcsatorna-ventilátor**.
- Általános ipari légtechnikai célokat szolgáló, pl. hőcserélők átszellőztetését biztosító, cső nélküli – „fali” – ventilátor; a továbbiakban: **légtechnikai ventilátor**.

A záró beszámolóban részletezett feladatokat e három esettanulmánynak megfelelően tagoljuk.

3. CSAPATÉPÍTÉS; ALAPOZÓ MUNKÁLATOK

E helyütt ismerjük el az OTKA projekt szerepét a tanszéki forgógép-kutatócsoport építésében. A projekt támogatásával lépett be Benedek Tamás most másodéves doktorandusz, és lép be terveink szerint 2014 szeptemberétől Tóth Bence doktorandusz a kutatócsoportba (a projektben kezdetben diplomatervező M.Sc. diák-ként vettek részt, számos más diákkal együtt – ahogyan azt cikkeink szerzői listái is érzékeltetik). A projekt támogatta Horváth Csaba Ph.D. fokozatszerzését (fokozatszerzési eljárás elindítva 2014-ben; a fokozatszerzés 2014-re vagy 2015-re várható), és Vad János MTA doktori címének megszerzését.

A PAM rendszer szükséges komponenseit beszereztük. Ez azt is jelenti, hogy az OTKA projekt jóvoltából *meghonosítottuk* a PAM technikát az áramlástechnikai forgógépek alapkutatásában:

korábban Magyarországon nem állt rendelkezésre e célra szolgáló mérőrendszer és szaktudás. **A PAM technikát üzembe helyeztük.**

Alapkísérletek révén – hangszórók vizsgálatával – megkezdtük a **PAM üzemeltetési tapasztalatok gyűjtését** [1], már kezdettől bevonva Benedek Tamás Áramlástechnika szakirányos Gépész M.Sc. diákot, aki ma már doktoranduszként erősíti kutatócsoportunkat. Oktatást, konzultációt szerveztünk a PAM rendszer gyártójának bevonásával.

A PAM üzemeltetési tapasztalatok bővítéséhez igen hatékonyan hozzájárult a National Aeronautics and Space Administration (**NASA**) (USA) külföldi partnerrel kiépített együttműködésünk. A NASA az elmúlt években világviszonylatban is úttörő munkát végzett az axiális átömlésű áramlástechnikai forgógépekre alkalmazott PAM technika terén. Horváth Csaba kollégánk – aki egyébként a forgógépekre alkalmazott PAM technika meghonosítását indítványozta – tanulmányutak keretében repülőgépek propulziós hajtásának („open rotors”) kiterjedt PAM vizsgálatában vett részt. E vizsgálatok felölelték a PAM technikával nyert adatok kiértékelését, együttműködve a CAA eszköztárával, és ez által kimutatva az alkalmazhatóság specialitásait, korlátait [2-3]. Külön tanulmány készült a PAM technika széles sávú zaj vizsgálatában való alkalmazását illetően [4].

A PAM üzemeltetési tapasztalatok igényes jelfeldolgozási eljárásokon kell, hogy alapuljanak. A járókerekekre alkalmazott PAM technika kiértékelési eljárásának előkészítése érdekében Tóth Péter kollégánk speciális numerikus kiértékelési algoritmust dolgozott ki, a Von Karman Institute for Fluid Dynamics (**VKI**) (Belgium) kutatóintézetrel együttműködésben. A kiértékelés lehetővé teszi a forgógép-járókerekekhez kötődő, forgó zajforrásokból adódó PAM jelek hatékony feldolgozását, adaptív akusztikai forrásmodell révén [5].

A lapátozáson kialakuló határréteg sajátosságai jelentősen összefüggenek a lapátozás veszteségeivel és a lapátozás által keltett zajjal egyaránt. (Ezt a tényt a nemzetközi szakirodalom is alátámasztja, melyet e helyütt nem részletezünk.) Ezért elemi fontosságúnak ítéltük, hogy **a CFD/CAA stratégia kidolgozása** során olyan numerikus eszközöket vonultassunk fel, amelyek az áramlás irányában növekvő statikus nyomásnak kitett, szívott oldali lapát-határréteg jellegzetességeit megfelelően visszaadják. Ennek érdekében végeztünk **szimulációs előtanulmányokat**, a nagy örvény szimuláció (Large Eddy Simulation, **LES**) módszerének bevonásával [6]. A szimulációs előtanulmányokat szélcsatorna-kísérletekkel támogattuk, hődrótos és lézer Doppler anemometriai mérések [7] valamint statikus nyomáseloszlás mérése [8] révén. A szimulációs előtanulmányokat és az azokat támogató méréseket Nagy László koordinálta.

Előzetes vizsgálataink azt mutatták, hogy a változó cirkulációra méretezett lapátozásokban kialakuló szívott oldali határréteg vastagodása mérsékelhető, ha a lapátokat súroló háromdimenziós (**3D**) folyadékpályákat rövidítjük, a változó cirkulációra méretezés és az előrenyilazás célirányos összehangolásával. Ez által a gép összhatásfoka javítható. A lapát-határréteg alakulásának jótékony befolyásolása – a határréteg vastagodásának tervezési eszközökkel történő mérséklése – feltevésünk szerint a széles sávú zaj mérséklésének irányába is hat. Ezért különös figyelemmel kezeltük azon elveket, amelyek révén már az előtervezés fázisában előírható egy adott lapátcirkuláció-eloszláshoz a vékony lapát-határréteget biztosító nyilazási szög. Ezeket az elveket diffúzoros áramlások általános vizsgálata alapján kezdtük megfogalmazni [9], mely vizsgálatok kvázi 1-dimenziós (kúpdiffúzorok), kétdimenziós (lassító sík lapátrácsok), és 3D (lassító körrácsok) esetekre terjedtek ki. A megfogalmazott elveket a változó cirkulációjú járókerék-lapátozások előtervezési módszerébe beépítettük; a továbbfejlesztett lapátozás-tervezési eljárás alkalmazását esettanulmány keretében igazoltuk [10]. A változó cirkulációjú üzemiállapot és a lapát-előrenyilazás kölcsönös hatásait, az előrenyilazás jótékony hatásának vizsgálatát kiterjesztettük a gyűrűfalaktól távolabbi és a lapátcsúcs-közi áramlási zónákra egyaránt [11-12]. Az e bekezdésben tárgyalt munkával támogattuk az **esettanulmányként szolgáló járókerekek tervezését**. A változó lapátcirkulációjú lapátozásokra alkalmazott nyilazás hatásvizsgálata, és az e vizsgálaton alapuló előtervezési módszer [9-12] képezte alapját Vad János MTA doktori értekezésének [13]. A vonatkozó szakirodalom széles körű felkutatásával és feldolgozásával kimutattuk, hogy a megfelelő mértékű előrenyilazás a változó cirkulációra méretezett lapátozások esetén fokozott mértékben kihasználható az

összhatásfok javítása érdekében: a sugár menti cirkuláció-gradiens növekedésével fokozódik az előrenyilazásnak tulajdonítható hatásfok-javulás, egy bizonyos határig [14].

Felhasználva a [9-13] szerinti tapasztalatokat, **esettanulmányként szolgáló járókerekeket terveztünk**. Egyszerű, az aerodinamikai előtervezésben használatos rácsparaméterek (pl. be- és kilépő áramlási szögek, Lieblein-féle diffúziós tényező) révén jellemeztük a járókerék-lapátozások működését. A hűtőventilátorok iteratív, numerikus eszközökkel támogatott tervezését a [15] cikkben foglaltuk össze. A szintén saját tervezésű szélcsatorna-ventilátor fő jellemzőit a [16] cikk mutatja be. A légtechnikai ventilátor járókerék-lapátozását, rácsparaméterek alapján, a [17] cikk jellemzi, Tóth Bence jóvoltából, aki mint diplomatervező M.Sc. diák kapcsolódott be a projektbe, és terveink szerint szeptembertől doktoranduszként erősíti a forgógép-kutatócsoportot.

Méréstechnikai vizsgálatok érdekében **legyártattunk esettanulmány-járókerekeket**. Egyes hűtőventilátorok prototípusait 3D nyomtatási technikával készítettük el, a BME Gépészmérnöki Kar Polimertechnika Tanszék segítségével.

A szélcsatorna-ventilátor járókeréke a tervezésünk alapján végzett egyedi gyártás után állt rendelkezésünkre. A szóban forgó járókerék a Mezőgazdasági Gépesítési Intézet szélcsatornájába beépítve üzemel. Ennek az esettanulmány-járókeréknek az előnyei: viszonylag nagy mérete ($\varnothing$ 2000 mm lapátcsúcs-átmérő) révén a részletes méréstechnikai (PAM) vizsgálatoknak kedvező alanya lehet, továbbá a szélcsatorna-környezet félüzemi körülményeket reprezentál, miáltal tesztelhető, hogy a környezetből érkező zavaró hatások a PAM technika révén milyen mértékben szűrhetőek ki.

Az esettanulmányként szolgáló légtechnikai ventilátor korábbi vizsgálati projektünkől állt rendelkezésre.

4. MÉRÉSTECHNIKAI VIZSGÁLATOK

Elvégeztük az esettanulmányul szolgáló járókerekek kísérleti vizsgálatát.

A hűtőventilátorok esetén kiterjedt mérési programot hajtottunk végre. E helyütt kiemeljük a résáramlás térfogatáramára vonatkozó méréseket, melyeket a vonatkozó CFD vizsgálatok validációjában használtunk fel. Az **aerodinamikai és akusztikai méréseket** a [15, 18-19] cikkekben foglaltuk össze. A szélcsatorna-ventilátor aerodinamikai mérési eredményei korábbi projektből már rendelkezésre álltak.

A légtechnikai ventilátor aerodinamikai vizsgálata során a jelleggörbe-adatokat vettük alapul, továbbá a járókerékre belépő közeg axiális sebességprofiljának mérésére szorítkoztunk, ipari helyszíni mérések során is felhasználható Mini-Air turbinás anemométer alkalmazásával [17, 20].

Akusztikai méréseket végeztünk a PAM technika felhasználásával. Az esettanulmányul választott mindhárom ventilátortípus esetén felhasználtuk az akusztikai mérések során a projekt keretében beszerzett és beüzemelt PAM berendezést. E méréseket a hűtőventilátorok esetén a [19] cikk, a szélcsatorna-ventilátor esetén a [16] cikk, a légtechnikai ventilátor esetén – a szívóoldal felőli mérésekre vonatkozóan – a [20] közlemény mutatja be.

A PAM eszköz általi méréseket célirányosan finomítottuk, a CFD/CAA eredmények alapján.

A hűtőventilátorok esetén a résáramlás hatásvizsgálatára fókuszáltunk [19]. A légtechnikai ventilátor esetén, szakirodalmi ismeretekre támaszkodva, megállapítottuk, hogy fokozott zajforrások jelentkeznek a lapátcsúcs közelében [20]. Beazonosítottuk a járókerék szöghelyzetét, és ennek alapján megállapítottuk, hogy a domináns zajforrás vagy a lapátcsúcs belépő éle, vagy a légrés-áramlás. Ennek eldöntése, további részletes vizsgálatok révén, jövőbeli feladat.

5. NUMERIKUS MÓDSZEREK

A hűtőventilátorok iteratív tervezése, **összehasonlító vizsgálata** során felhasználtuk a járókerekek **CFD/CAA modellezésével** nyert eredményeket. A ventilátorokban kialakuló áramlást az ANSYS FLUENT, véges térfogatok módszerén alapuló szoftverrel modelleztük, stacionárius, a Reynolds-

átlagolt Navier-Stokes egyenleten alapuló szimuláció révén. Az ANSYS szoftvercsomag beépített CAA eszköztárát használtuk fel. Ahol az lehetséges volt, a **CFD/CAA adatokat mérési adatokkal hasonlítottuk össze**, ezzel is támogatva a **CFD/CAA modellek validációját, továbbfejlesztését**. A CFD eszközt a résméret-függő légrés-áramlás térfogatáramának, mint reprezentatív mérési adatnak az alapján validáltuk. A CAA eredmények – az akusztikai mérésekkel összhangban – tükrözték, hogy a légrésméret nemcsak a légrés-áramlás térfogatáramát, de a keltett zajt is befolyásolja. A hűtőventilátorokra irányuló CFD/CAA módszereket és eredményeket, és azok kiértékelését a [19] cikk foglalja össze.

A légtechnikai ventilátor CFD/CAA modelljét iteratív lépésekben fejlesztettük. A **CFD/CAA modell továbbfejlesztési igényeként** fogalmazódott meg a lapátózásra belépő áramlás helyes figyelembe vétele. Nem megfelelő modellezés esetén a légbeszívás belépő peremén „virtuális” leválási zóna alakul ki, amely egyrészt zajforrásként dominál a lapátózás által keltett zaj fölött, másrészt alapvetően megváltoztatja a lapátózásra belépő közeg sebesség-eloszlását, anomáliákat okozva a lapátcsatorna-áramlásban (pl. kiterjedt visszaáramlási zónák). A lapátózásra belépő áramlás és a lapátcsatorna-áramlás valósághű modellezési módszerének kidolgozása a jövőbe nyúló feladat.

6. AZ ELÉRT ÚJ EREDMÉNYEK

Illeszkedve a projekt célkitűzéseire, sőt túlmutatva azokon, a projekt során elért új tudományos eredményeket az alábbiakban foglaljuk össze.

E helyütt jegyezzük meg, hogy a munkaterv szerint összesen 3 magyar nyelvű konferenciatick, 2 nemzetközi konferenciatick, és 4 nemzetközi folyóiratcikk elkészítését vállaltuk. E vállalat jelentősen túlteljesítettük, 4 magyar nyelvű konferenciatick [1, 6, 7, 8], 6 nemzetközi konferenciatick [2, 4, 11, 15, 18, 20], 5 impakt faktoros nemzetközi folyóiratcikk [3, 9-10, 12, 19], továbbá 3 magyar nyelvű folyóiratcikk [5, 14, 17], 1 magyarországi angol nyelvű folyóiratcikk [16], és 1 MTA doktori értekezés [13] elkészítése révén.

1) Bővítettük a szakirodalmi ismereteket, üzemi környezetbe beépített ventilátorok PAM alapú helyszíni akusztikai diagnosztikai lehetőségeire vonatkozóan [16]. Az ipari axiális átömlésű ventilátorokra alkalmazott, a zajforrások lokalizálására használatos (PAM eszközt is bevető) szakirodalmi mérési eljárásokat kiegészítettük egy áramlástechnikai vizsgálati módszerrel, amely a belépő axiális sebességeloszlás mérésén és szakirodalmi lapátrács-mérési eredményeken alapul. Az így nyert kapcsolt akusztikai-áramlástechnikai diagnosztikai eljárást esettanulmányban mutattuk be. Túlmenően a laboratóriumi alkalmazáson, a kiegészített eljárás lehetővé teszi olyan cső és terelőlapátózás nélküli – pl. fali – ventilátorok helyszíni diagnosztikáját, amelyek már beépítve üzemelnek, ezen belül azokat is, amelyek csak a szívóoldal felől hozzáférhetőek. Az eljárás alkalmazásával a járókerék-lapátózást jellemző hangnyomás és a veszteségi mérőszámok – össznyomás-veszteségi tényező, Lieblein-féle diffúziós tényező – sugár menti eloszlása egyaránt feltárható. Az e jellemzők közötti korrelációt az esettanulmányon belül *számszerűsítettük*. A korrelációs eljárás továbbfejlesztése révén javaslat tehető a lapátózás áttervezésére, a zajkibocsátás és a veszteség összehangolt mérséklése érdekében [20].

2) Esettanulmányok alapján a következő *számszerű* megállapításokat tesszük. A sugár mentén növekvő cirkulációra történő lapát-előtervezési módszer és a lapátózás előrenyilazása a hatásfok-javítás érdekében *számszerűen* összehangolható – a [10-13] cikkekben részletezett módon –, a szívott oldali határréteg vastagodásának mérséklése révén. Az így elérhető maximális összhatásfok-javulás nagyságrendje – függően a lapátcirkuláció sugár menti változékonyságától is – $2 \div 3$ % [14]. A határréteg-vastagodás mérséklése a széles sávú zaj csökkenésének irányába is hat. A [19] esettanulmány szerint lehetséges volt olyan fokozott fajlagos teljesítményű axiális átömlésű járókerék megvalósítása, amely a Cordier-diagram alapján már inkább a félaxiális ventilátorok családjába tartozna (mennységi szám > 0.12 , össznyomásszám > 0.32). Tehát erősen kiterhelt lapátózással és jelentősen megvastagodott szívott oldali határréteggel rendelkezik. Mégis hatásfok-javulást és 7 dB(A) zajcsökkenést sikerült rajta elérni a kiindulási lapátózáshoz képest [19].

3) A [19-20] esettanulmányok és korábbi vizsgálatok során nyert CFD/CAA és/vagy mérési adatok által *számszerűsítve* a következő eredményeket értük el.

- a) Félempirikus modellt alkottunk a résáramlás térfogatáramára vonatkozóan [19].
 - b) Megállapítottuk, hogy létezik egy közbenső légrésméret, amely a résáramláson belül a legintenzívebb turbulenciát, és ez által a legerőteljesebb zajkibocsátást eredményezi [19].
 - c) A következő, változó cirkulációjú üzemiállapot által befolyásolt speciális áramlási jelenségeket azonosítottuk be [19-20], amelyek az akusztikai vizsgálatok szerint hozzájárulnak a ventilátor-zajhoz is. Az esettanulmányokon belüli *számszerűsítés* alapján a zajforrások jelentőségi sorrendjét fejezi ki az alábbi felsorolás (legfelső: legjelentősebb).
- Lapátcsúcs-közeli jelenségek; a lapátozás és a járókerék környezete (burkolat, csatornafal) közötti légrésemben kialakuló áramlás, amely kölcsönhatásban áll a lapátcsatornában kialakuló 3D áramlással.
 - A fokozott veszteségű szívott oldali határréteg-közeg radiális kiáramlásából és lapátcsúcs-közeli felgyülemeléséből adódó veszteségi zóna; leválási zónák a lapátcsúcs közelében.
 - A változó cirkulációjú üzemiállapotnak megfelelően a nagyobb sugarakon fokozott mértékben megvastagodott szívott oldali lapát-határréteg,
 - A sugár mentén változó lapátcirkuláció miatt kialakuló 3D lapátcsatorna-áramlás, és ehhez illeszkedően a lapátról leúszó örvények.

7. JÖVŐBENI FELADATOK

A projekt folytatásaként a következő feladatokat tervezzük, melyek Benedek Tamás és Tóth Bence doktori programjának alapját képezik. E feladatok támogatására nyújtottuk be a K 112277 OTKA projekt-pályázatot.

- A fali légtechnikai ventilátor-konfiguráció PAM által támogatott aerodinamikai-akusztikai diagnosztikai eljárásának kiterjesztése: nyomóoldali PAM vizsgálatok; az akusztikai vizsgálatok kiegészítése kézi hangnyomásszint-méréssel; a turbinás anemométeres sebességprofil-mérések kiegészítése finomabb felbontású hődrótos mérésekkel; a lapátcsúcs-közeli jelenségek részletesebb vizsgálata; a jelenleginél pontosabb és szélesebb alkalmazási körű korreláció felkutatása a lapátozás aerodinamikai + geometriai jellemzői és a hangnyomás között a sugár mentén; továbbfejlesztett CFD/CAA módszerek a lapátozás továbbfejlesztésének támogatására.
- A fent részletezett módszer továbbfejlesztése és kiterjesztése szívó- és nyomóoldali csőtoldattal ellátott gép – pl. sugárventilátor – esettanulmányának keretein belül, a cső hatásának vizsgálatát (pl. csőmódusok) is bevonva. Zajcsökkentő lapátvégi elemek részletes akusztikai vizsgálata.
- Az esettanulmányok alapján: általánosított érvényű, a ventilátorok helyszíni diagnosztikáján alapuló, a hatásfok javítását és a zaj mérséklését célzó kvantitatív áttervezési irányvonalak kidolgozása.

8. AZ OTKA TÁMOGATÁST FELTÜNTETŐ KÖZLEMÉNYEK JEGYZÉKE

- [1] Benedek T: Mikrofontömbös akusztikai mérési módszerek a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Áramlástan Tanszékén, XX. Nemzetközi Gépészeti Találkozó - OGÉT 2012, Kolozsvár, pp. 61-64, 2012
- [2] Horváth Cs, Envia E, Podboy G G: Limitations of phased array beamforming in open rotor noise source imaging, Proc. 19th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Berlin, Germany, pp. 1-10, 2013
- [3] Horváth Cs, Envia E, Podboy G G: Limitations of phased array beamforming in open rotor noise source imaging, AIAA JOURNAL, Vol. 52, DOI: 10.2514/1.J052952 (published online), 2014

- [4] Horváth Cs: Investigating counter-rotating open rotor noise sources from a broadband point of view, Proc. Berlin Beamforming Conference (BeBeC), Berlin, Germany, pp. 1-14, Paper BeBeC-2014-13, 2014
- [5] Tóth P: Adaptív akusztikai forrásmodell mikrofontömb jelfeldolgozáshoz, GÉP, Vol. LXIV (3), pp. 21-25, 2013
- [6] Nagy L: Szárny körüli turbulens áramlás numerikus szimulációja nyílt forráskódú és kereskedelmi szoftverrel, XX. Nemzetközi Gépészeti Találkozó - OGÉT 2012, Kolozsvár, pp. 318-321, 2012
- [7] Berkó B, Nagy L: RAF-6E szárnyszegmens szívott oldali nyom mérése Lézer Doppler Anemométer és hődrót mérés technikával az NPL szélcsatornában, XX. Nemzetközi Gépészeti Találkozó - OGÉT 2012, Kolozsvár, pp. 65-68, 2012
- [8] Gulyás A, Nagy L: RAF-6E szárnyprofil nyomás vizsgálata a szárny körül, XX. Nemzetközi Gépészeti Találkozó - OGÉT 2012, Kolozsvár, pp. 145-148, 2012
- [9] Vad J: Correlation of flow path length to total pressure loss in diffuser flows, Proc. Institution of Mechanical Engineers – Part A: Journal of Power and Energy, Vol. 225, pp. 481-496, 2011
- [10] Vad J: Incorporation of forward blade sweep in preliminary controlled vortex design of axial flow rotors, Proc. Instn Mech. Engrs, Part A, J. Power and Energy, 226, pp. 462-478, 2012
- [11] Vad J: Forward blade sweep applied to low-speed axial fan rotors of controlled vortex design: an overview, Proc. 2012 ASME TURBO EXPO, Copenhagen, Denmark, ASME Paper GT2012-70103. (CD-ROM), 2012
- [12] Vad J: Forward blade sweep applied to low-speed axial fan rotors of controlled vortex design: an overview, ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Paper No. GTP-12-1152, 135, pp. 012601-1: 012601-9, 2013
- [13] Vad J: Blade sweep applied to axial flow fan rotors of controlled vortex design (Lapátnyilazás alkalmazása sugár mentén növekvő lapátcirkulációra tervezett axiális átömlésű ventilátor-járókerekek), MTA doktori értekezés (benyújtás éve: 2011), 2013
- [14] Vad J: Energiahatékony axiális átömlésű ventilátor-járókerekek tervezése, Energiagazdálkodás, Vol. 53 (4), pp. 8-10, 2012
- [15] Vad J, Horváth Cs, Lohász M M, Jesch D, Molnár L, Koscsó G, Nagy L, Dániel I, Gulyás A: Redesign of an electric motor cooling fan for reduction of fan noise and absorbed power, Proc. 11th European Conference on Turbomachinery Fluid Dynamics and Thermodynamics (ETC'11), Istanbul, Turkey, pp. 69-79, 2011
- [16] Benedek T, Tóth P: Beamforming measurements of an axial fan in an industrial environment, Periodica Polytechnica, Mechanical Engineering, Vol. 57 (2), pp. 37-46, 2013
- [17] Tóth B: Axiális átömlésű ventilátor áramlástechnikai vizsgálata lapátrács-mérési adatok alapján, GÉP, Vol. LXV (2), pp. 50-53, 2014
- [18] Vad J, Horváth Cs: Study on the effects of axial clearance size on the operation of an axial flow electric motor cooling fan, 10th European Conference on Turbomachinery Fluid Dynamics and Thermodynamics (ETC10), Lappeenranta, Finland, pp. 543-552, 2013
- [19] Vad J, Horváth Cs, Kovács J G: Aerodynamic and aero-acoustic improvement of electric motor cooling equipment, Proc. Institution of Mechanical Engineers – Part A: Journal of Power and Energy, 228, pp. 300-316, 2014
- [20] Benedek T, Vad J: Concerted aerodynamic and acoustic diagnostics of an axial flow industrial fan, involving the phased array microphone technique, Proc. 2014 ASME TURBO EXPO, Düsseldorf, Germany, ASME Paper GT2014-25916. (CD-ROM), 2014