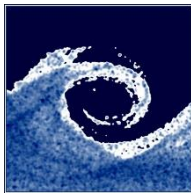


**Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem  
Gépészmérnöki Kar  
Áramlástan Tanszék**



## **Axiális átömlésű ventilátor mikrofontömbös diagnosztikája**

*Tézisfüzet*

*készítette: **Benedek Tamás**, okleveles gépészmérnök*

*témavezető: **Dr. Vad János**, egyetemi tanár*

*Budapest, 2017*

## 1 Bevezetés

A piacon megjelenő axiális átömlésű ventilátorok hatásfokára egyre szigorodó előírások vonatkoznak. Amennyiben a gép közelében emberek tartózkodnak, a ventilátor által kibocsátott zaj is kritikus kérdés. Ez alapján az axiálventilátorok tervezésénél elsődleges szempontok közé tartozik a kívánt légtechnikai jellemzők elérése és a jó hatásfok mellett a széles üzemi tartományban alacsony zajkibocsátással történő működés. Az ipari környezetbe beépített ventilátorok esetében azonban előfordulhat, hogy a gép a tervezésitől illetve katalógus szerinti mérésektől eltérő körülmények között üzemel, ezért mind a bevezetett teljesítmény, mind a kibocsátott zaj jelentősen eltérhet a katalógusban megadott adatoktól. Ez esetben szükség van a ventilátor beépítési körülményeket figyelembevevő, áramlástani és akusztikai diagnosztikájára, amely vizsgálat eredményei alapján lehetőség nyílik a hasznos teljesítmény megtartása mellett a jobb hatásfokú, csendesebb működést biztosító beépítési környezet kialakítására, esetleg az adott körülményekhez jobban illeszkedő járókerék tervezésére. Egy ilyen diagnosztikai vizsgálat lefolytatása során cél mind áramlástani, mind akusztikai szempontból a részletes, lehetőleg térben felbontott információszerzés a veszteség- és zajforrások megértése végett.

Egy ventilátor által kibocsátott zaj jelentős része áramlási eredetű, ezen belül többféle forrásból származik, amelyek a következők:

- *Forgási zaj:* egy a járókerék középsíkjában lévő pontban a lapátok elhaladásakor nyomásingadozás keletkezik, amely a forgási zaj forrása.
- *Egymásrahatás zaj:* egy a forgó járókerék közelébe helyezett álló tárgy (terelőlapátózás, tartóbak, stb.) körül zavart áramlás alakul ki, amely miatt a járókerék lapátjai periodikusan más-más sebességtérbe lépnek, és ez által periodikusan váltakozó erő keletkezik rajtuk, amely egy tisztahangot eredményez.
- *Turbulens zaj:* az áramló levegőben kialakuló turbulens ingadozások által keltett zaj.
- *A lapátok saját zaja:* a lapátok, mint áramlásba helyezett testek által keltett zaj.

A lapátok saját zaja mögött szintén többféle áramlástani jelenség is szerepet játszik, amelyeket a szakirodalom alapján az alábbi felsorolás foglal össze:

- *Turbulens megfűvás zaja:* a szárnyat elérő turbulens áramlás miatt a belépő élen kialakuló nyomásingadozásból származó zaj.
- *Turbulens határréteg zaja:* a lapátózás felületén a turbulens határréteg okozta nyomásingadozásból származó zaj.
- *Határréteg-leválás zaja:* nagy megfűvási szögek esetén a lapátok tompatestként viselkednek, a szívott oldali határréteg leválik a szárny felületéről. Ez a jelenség jelentős zajnövekedéssel jár.
- *Örvényleválás zaja:* a lapát felületéről és a tompa kilépőél mögül leúszó koherens örvény struktúrák okozta zaj.
- *Kilépőéli zaj:* a kilépőél felett elhaladó turbulens határréteg által sugárzott zaj.
- *Légrés-áramlás zaja:* a lapátvég felett elhaladó turbulens résáramlás - amely lapátvégi örvényt képezhet - erős zajt eredményez.

Egy ventilátor által lesugárzott zaj teljesítményének meghatározása többféle módszerrel lehetséges: I) a ventilátor munkapontját jellemző adatokból történő becsléssel, II) a zajforrás-erősség számításával helyi áramlástani jellemzőkből, III) méréssel.

Az I) esetben elméleti vagy félempirikus úton felállított, a hangteljesítmény és a ventilátor üzemállapotát jellemző mennyiségek kapcsolatát kifejező modelltörvények használatával lehet a ventilátor által kibocsátott zajt becsülni. Ezen összefüggések hátránya, hogy az alkalmazási tartományuk általában korlátozott és pontosságuk mérsékelt.

A II) esetben szükséges a ventilátor-lapátózásban kialakuló áramlási jellemzők (sebesség, nyomás) időben és térben felbontott meghatározása mérés vagy szimuláció segítségével. A lokális sebesség- és nyomásingadozásból akusztikai analógiákat felhasználva az inhomogén akusztikai hullámegyenletben szereplő forrástagok meghatározhatóak.

III) A ventilátor által kibocsátott zaj mérése többféle módon történhet. Egyetlen mikrofonnal történő zajmérés esetén adott a lehetőség az összesen kibocsátott zaj meghatározására. A lesugárzott összhangteljesítmény egy

mikrofonnal történő meghatározása pontos eredményt ad, azonban költséges, ugyanis a mérés igényli a speciális infrastruktúra (süketszoba vagy zengőtér) alkalmazását.

Több mikrofonnal történő zajmérés esetén a helyileg kibocsátott zaj meghatározható. A módszer használata a szakirodalomban sok esetben bizonyos lokális áramlási jellemzők mérésével is kiegészül, azonban a szükséges infrastruktúra bonyolultsága és az akusztikai méréséhez szükséges alacsony háttérzaj végett alkalmazásuk körülményes.

Több mikrofont ismert pozíciókba helyezve és velük szinkronizáltan mintavételezve mikrofontömb készíthető. A mikrofontömbös mérési adatok feldolgozása a nyálábformálás technológiájával történik. A nyálábformálás végeredményeként egy a zajforrás-erősséget mutató, frekvenciatartományban is felbontott forrástérkép származtatható.

Az értekezés célja:

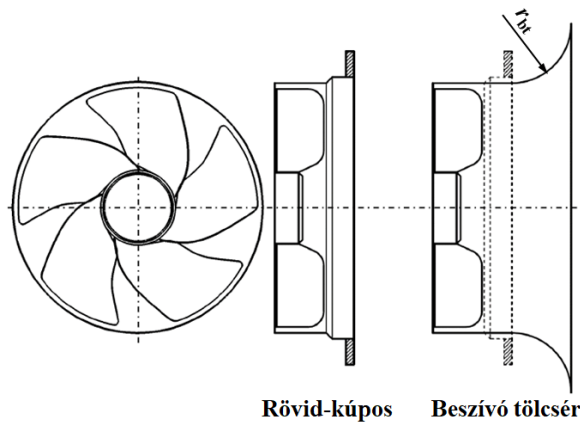
- Rövid hengeres házban elhelyezkedő, egyedül álló axiálventilátor-járókerekekre az előbbieken megfogalmazott célt teljesítő akusztikai diagnosztikai módszer kifejlesztése A szakirodalmi ismeretek kiegészítése az axiálventilátorok jellemző két áramlási eredetű a ventilátor szívóoldala felé sugárzó két zajforrására, a kilépőéli zajra és a légrés-áramlás zajára koncentrálva.
- A kilépőéli zaj esetén axiálventilátoron végzett mikrofontömbös mérési eredményeinek összevetése félempirikus akusztikai modell eredményeivel.
- A lapátcsúchoz köthető zaj esetén a mikrofontömbös zajtérképeken kialakuló zajforrás-bizonytalanság feloldása.
- Beszívó idom által a légrés-áramlás okozta zajra gyakorolt hatás vizsgálata.

## 2 Vizsgálati módszerek

A kutatás során a vizsgálatokat egy 5 db lemezlapáttal rendelkező, 300 mm átmérőjű, rövid-kúpos belépéssel rendelkező hengeres házban elhelyezkedő, egyedülálló axiálventilátor-járókeréken (1. ábra) végeztem négy különböző fordulatszámmon. Az akusztikai méréseket mikrofontömbbel végeztem el a ventilátor szívóoldala irányából. A mérési adatokat *ROSI* nyálábformáló algoritmussal dolgoztam fel, amellyel járókerékkel együttforgó vonatkoztatási rendszerben készíthetőek zajforrás-térképek, így lehetővé téve a lapátózás által lesugárzott zaj vizsgálatát. Az akusztikai mérések minden esetben kiegészültek belépő sebességprofil méréssel is.

A kilépőéli zaj vizsgálata során 2D empirikus lapátrács összefüggésekkel számítottam ki a lapátok szívott oldalán kialakuló határréteg kiszorítási vastagságának sugár menti eloszlását. Az így kapott kiszorítási vastagság eloszlásokból félempirikus modellel becsültem a kilépőéli zaj spektrumát.

A lapátcsúccsal kapcsolatos zajforrások esetén további mikrofontömbös méréseket végeztem különböző íveltségi sugarú beszívó tölcsekkel, továbbá a vizsgálatokat kiegészítettem CFD szimulációval is.



1. ábra: Az esettanulmány-ventilátor elől nézete és oldalmetszete

### 3 A kutatás eredményei

A kilépőéli zaj esetén nehézséget jelentett a mérésekből származó zajforrás-térképek és a modellezett eredmények összehasonlítása. A problémát az okozta, hogy egy nyalábformálással készített zajforrás-térképeken egy darab pontforrás esetén a forrás erősségétől, helyétől, frekvenciájától és a mikrofonelrendezéstől függő pontszórásfüggvény értékeit látjuk, míg több inkohereus forrás esetén ezek szuperpozícióját. A probléma feloldására kidolgoztam egy módszert, mellyel a mért és az általam alkalmazott *BPM modellből* [T1.1] és mikrofontömbös mérésekből származó forraserősség-szintek sugár menti eloszlása a pontszórásfüggvények hatásának figyelembevételével összevethetőek. (2. ábra) A módszer segítségével bizonyítottam, hogy az egyedül álló szárnyakra kidolgozott *BPM modell* axiálventilátor-járókerekek esetén az esetek 90%-ban +/- 3 dB pontossággal visszaadja a mért forraserősség-szint értékeit.

A eredményeket az értekezés **I. tézise** foglalja össze.

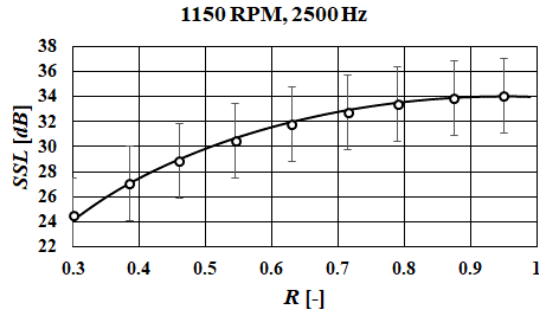
A lapátcsúcs közelében megjelenő zajforrások esetén (3/a ábra) bizonytalanságba ütköztem: a zaj okaként a légrés-áramlás és a belépőél turbulens megfűvása is valószínűsíthető volt. Az így kialakuló zajforrás-bizonytalanság megszüntetése érdekében kifejlesztettem egy módszert, amellyel a bizonytalanság a mikrofontömbös mérések és a kapott adatok kiértékelése során megszüntethető. Továbbá megismételtem az akusztikai méréseket különböző íveltégi sugarú beszívó tölcserékekkel, és CFD szimulációkat futtattam.

A zajforrás bizonytalanság megszüntetésére kidolgozott módszer lényege, hogy a ventilátor egyik lapátján a résméretet lecsökkentve a légrés-áramlás is mérséklődik. A mikrofontömbös méréseket megismételve, és a csökkentett résméretű lapátot követő lapátcsatornában figyelve a forrascúcsok alakulását, a zaj oka meghatározható. Az esettanulmányban a csökkentett résméretű mérések esetén (3/c ábra) a zaj a csökkentett résméretű lapátot követő első és második (1-es és 2-es címke az ábrán) lapátcsatornában is mérséklődött, amely intenzív légrés-áramlásra és *másodlagos résáram* jelenlétére utal. Az eredményeket a CFD szimulációk is igazolták. A 4. ábra bal oldalán látható a rövid-kúpos esetben a légrés-áramlás áramvonalas megjelenítése, az ábrán a BÉ és KÉ jelölések a lapátcsúcs be- és kilépőélét jelölik. Piros kör jelöli az előző lapátról származó légrés-áramlás felütközését, és a *másodlagos résáram* kialakulását.

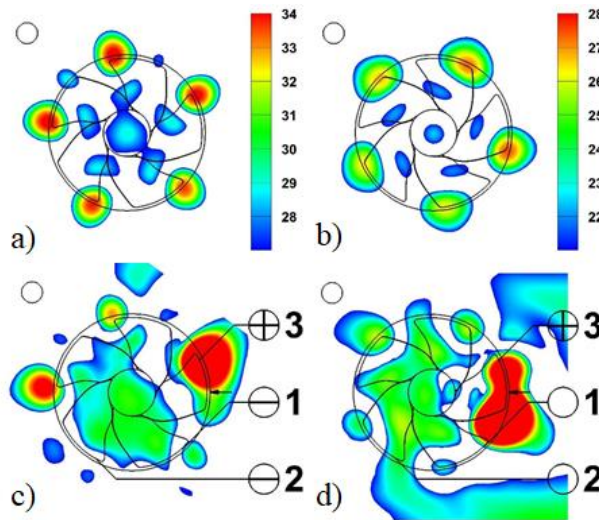
Beszívó tölcserék felhelyezésével a zajforrás-térképeken a lapátcsúcs és a belépőél találkozásánál található erős zajforrások mérséklődtek, illetve megszűntek. (3/b ábra) A vizsgálatok eredményeként bizonyítottam, hogy a beszívó tölcserék zajcsökkentő hatása hengeres házban elhelyezett axiálventilátorok esetén a házfal közelében kialakuló pangó zóna és ezzel a légrés-áramlás valamint a *másodlagos résáram* mérséklésének illetve megszüntetésének köszönhető. (4. ábra jobb oldal) A zajforrás-bizonytalanság megszüntetésére kidolgozott módszer is alátámasztotta az eredményeket, ugyanis a beszívó tölcserék esetén nem volt észlelhető rövid-kúpos belépés esetén tapasztalt forraserősség-szint csökkenés. (3/d ábra)

Az eredményeket az értekezés **II.**, **III.** és **IV. tézise** foglalja össze.

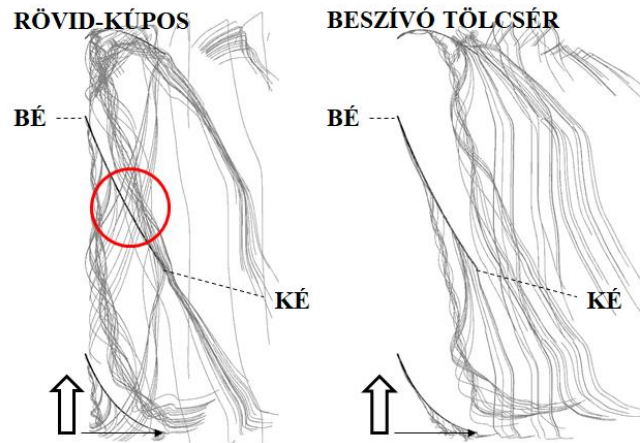
Az értekezés témáját számos a közelmúltban született nemzetközi publikáció érinti. Az [1]-ben egyedül álló szárny esetén vetik össze mikrofontömbös mérések és az általam is alkalmazott BPM modell eredményeit a kilépőéli zajra vonatkozóan, valamint a lapátvégi örvény okozta zajt is becsülik. A [2]-ben egy 3 szárnyból álló járókerekre hasonlítják össze a kilépőéli zaj modell és mikrofontömbös mérési eredményeit, azonban az általuk vizsgált eset nem valós ventilátor geometria. A [3] irodalomban valós ventilátor geometriákon végeztek mikrofontömbös méréseket, azonban eredményeiket nem vetik össze szakirodalmi modellekkel, valamint vizsgálataik jó részt a be- és kilépőéli zajforrásokra szorítkozik. Dolgozatommal ezeken túlmutató módon bemutattam, hogy a BPM modell valós ventilátor geometriák esetén is alkalmazható valamint, hogy mikrofon tömb alkalmazható a lapátcsúcsához kötődő zajforrások vizsgálatára is.



2. ábra: Példa a forráserősség-szintek sugár menti eloszlására  
 ○ BPM modell, — mikrofontömbös mérés



3. ábra: Zajforrás-térképek [dB],  $f_{mid} = 5 \text{ kHz}$ ,  $n = 1400 \text{ [RPM]}$ , forgásirány: az óra járásával ellentétes  
 a): rövid-kúpos eset; b): tölcséres eset; c): rövid-kúpos eset csökkentett részmérettel; d): tölcséres eset csökkentett részmérettel



4. ábra: A légérés-áramlás áramvonalas megjelenítése,  
 $n = 1400 \text{ [RPM]}$  (CFD)  
 BÉ: belépőél, KÉ: kilépőél  
 fekete nyíl: axiális irány, fehér nyíl: forgásirány

## 4 Tézisek

**I. TÉZIS:** A T1.1 ábrán bemutatott folyamat a következő célokat szolgálja:

- a kilépőéli zaj szakirodalmi modelljének [T1.1] kiterjesztése ívelt lemezlapátokból álló, hengeres házba elhelyezett, egyedülálló axiális ventilátor-járókerék esetére
- a modell eredményeinek összehasonlítása a ventilátor szívóoldalának irányába lesugárzott zaj mikrofontömbös méréseivel

A folyamat lépései a következők:

I.  $v_{1ax}$  sugár menti eloszlásának lemérése alapján, empirikus lapátrács összefüggések segítségével  $\theta$  sugár menti eloszlásnak kiszámítása, majd ebből a [T1.2]-[T1.7] alapján meghatározott, a T1.3 táblázatban javasolt  $H$  eloszlást felhasználva  $\delta^*$  sugár menti eloszlásának meghatározása

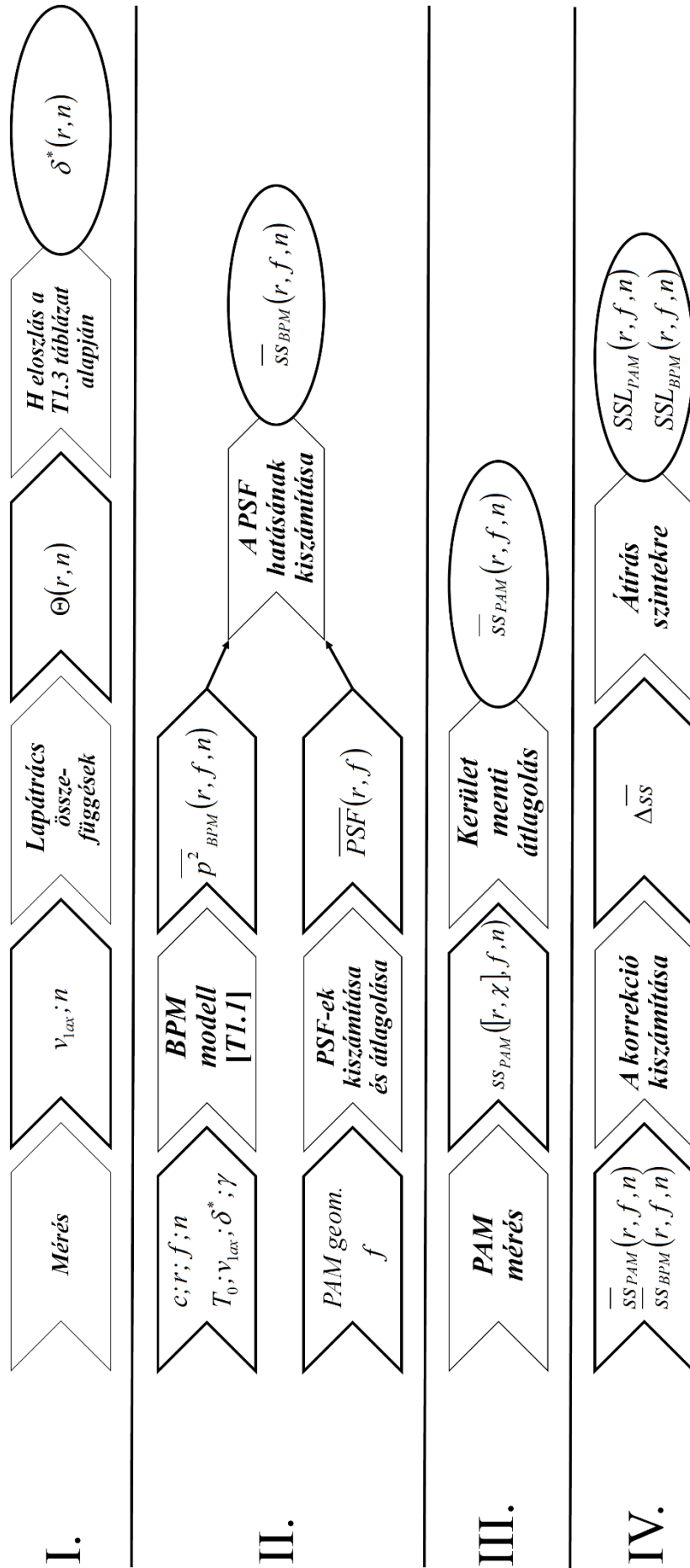
II. A kilépőéli zajból származó  $\overline{p^2}$  eloszlások kiszámítása a kívánt frekvenciasávokon, majd ezekből  $\overline{SS_{BPM}}$  eloszlások számítása a mikrofon elrendezés alapján kiszámítható  $\overline{PSF}$ -ek segítségével

III. Mikrofontömbös mérések alapján zajforrás-térképek készítése a kívánt frekvenciákon, ezekből  $\overline{SS_{PAM}}$  eloszlások meghatározása kerület menti átlagolással

IV. A kétféle módszerből származó forráserősség eloszlások átszámítása forráserősség-szintekre, majd közös szintre hozása egy egyszeri, frekvencia- és sugár-független eltolással.

A mérések és a modell eredmények közti eltérés nem haladja meg +/- 3 dB a vizsgált esetek 90%-ban, 40 dB-t átfogó forráserősség-szint tartományban az összehasonlítás T1.4 táblázat szerinti érvényességi tartományain. Az eltérés eloszlását a T1.2 ábra foglalja össze.

A tézishoz kapcsolódó saját publikációk: [P1] [P2] [P3] [P4] [P5] [P6] [P7] [P8] [P9]



T1.1 ábra - A mikrofontömbös mérések és a BPM modell összehasonlításának folyamata

T1.1 táblázat - Irodalomjegyzék

| Szám   | Hivatkozás   |
|--------|--|
| [T1.1] | Brooks, T. F., Pope, D. S. & Marcolini, M. A., 1989. <i>Airfoil Self-Noise and Prediction</i> , NASA Langley Research Center: NASA Reference Publication 1218.   |
| [T1.2] | S. Deutsch and W. C. Zierke, "The Measurement of Boundary Layers on a Compressor Blade in Cascade at High Positive Incidence Angle," NASA Contractor Report 179491, Cleveland, Ohio, USA, 1986.  |
| [T1.3] | P. Kool, J. DeRuyck and C. Hirsch, "The Three-Dimensional Flow and Blade Wake in an Axial Plane Downstream of an Axial Compressor Rotor," in ASME International Gas Turbine Conference and Products Show, ASME Paper 78-GT-66, London, Anglia, 1978. |
| [T1.4] | S. Lieblein, "Experimental Flow in Two-Dimensional Cascades," in <i>Design of Axial-Flow Compressors, Chapter VI</i> , Washington D. C., NASA SP-36, 1965.   |
| [T1.5] | S. Lieblein and W. H. Roudebush, "Low-speed wake characteristics of two-dimensional cascade and isolated airfoil sections," National Advisory Committee for Aeronautics, Technical Note 3771, Cleveland, Ohio, 1956.                                 |
| [T1.6] | A. Ravindranath and B. Lakshminarayana, "Rotor Wake Mixing Effects Downstream of a Compressor Rotor," <i>Journal of Engineering for Power</i> , vol. 104, no. 1, pp. 202-210, 1981.  |
| [T1.7] | B. Reynolds and B. Lakshminarayana, "Characteristics of Lightly Loaded Fan Rotor Blades," NASA Contractor Report 3188, Hampton, Virginia, USA, 1979.   |

T1.2 táblázat - Jelölésjegyzék

| Jelölés                     | Megnevezés                                      | Jelölés                           | Megnevezés                                       |
|-----------------------------|---|-----------------------------------|--|
| $c$ [m]                     | húrhossz  | $s$ [m]                           | lapátosztás                                      |
| $D$ [-]                     | Lieblein-féle diffúziós tényező                 | $ss$ [ $Pa^2$ ]                   | forráserősség                                    |
| $f$ [Hz]                    | frekvencia                                      | $\overline{ss}$ [ $Pa^2$ ]        | kerületmentén átlagolt forráserősség             |
| $f_{mid}$ [Hz]              | a harmad-oktávsáv középfrekvenciája             | $\overline{\Delta ss}$ [ $Pa^2$ ] | forráserősség korrekció                          |
| $H$ [-]                     | alaktényező                                     | $SSL$ [dB]                        | forráserősség-szint                              |
| $i$ [m]                     | lapát vázvonala íveltégi magassága              | $St$ [-]                          | Strouhal-szám                                    |
| $Ma$ [-]                    | Mach-szám                                       | $T_0$ [ $^{\circ}C$ ]             | környezeti hőmérséklet                           |
| $n$ [1/s]                   | fordulatszám                                    | $v_{1ax}$ [m/s]                   | belépő axiális sebesség                          |
| $\overline{p^2}$ [ $Pa^2$ ] | hangnyomás négyzet                              | $\alpha$ [ $^{\circ}$ ]           | megfűvási szög                                   |
| $PSF$ [-]                   | pontszórásfüggvény                              | $\delta^*$ [m]                    | szívott oldali határreteg kiszorítási vastagsága |
| $\overline{PSF}$ [-]        | kerület mentén átlagolt pontszórásfüggvény      | $\gamma$ [ $^{\circ}$ ]           | lapátbeállítási szög (kerületi iránytól mérve)   |
| $r$ [m]                     | sugár   | $\Theta$ [m]                      | szívott oldali határreteg impulzus vastagsága    |
| $R$ [-]                     | a lapátcsúcs sugarával dimenziótlantított sugár | $\chi$ [ $^{\circ}$ ]             | középponti szög                                  |
| $Re_c$ [-]                  | húrhosszal számolt Reynolds-szám                | $\mathcal{F}$ [-]                 | tapasztalati eloszlásfüggvény                    |
| <b>Rövidítések</b>          |   |                                   |  |
| $BPM$                       | Brooks-Pope-Marcolini                           | $PAM$                             | mikrofontömb                                     |

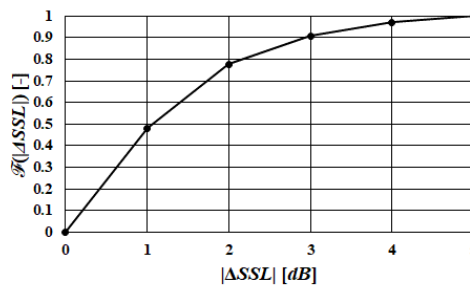
T1.3 táblázat - Az alaktényező sugár menti eloszlása

| Lapátmagasság % | 0   | 0.25 | 0.50 | 0.75 | 1 |
|-----------------|-----|------|------|------|---|
| $H$ [-]         | 1.8 | 1.1  | 1.1  | 1.1  | 1 |



T1.4 táblázat - Érvényességi tartomány

| Mennyiség    | alsó határ | felső határ |
|--------------|------------|-------------|
| $Re_c$ [-]   | 23000      | 200000      |
| $c/s$ [-]    | 0.69       | 1.5         |
| $i/c$ [-]    | 0.0615     | 0.0138      |
| $\gamma$ [°] | 27         | 35          |
| $\alpha$ [°] | 0          | 5.5         |
| $D$ [-]      | 0.33       | 0.58        |
| $f$ [Hz]     | 2000       | 3150        |
| $St$ [-]     | 0.125      | 1.5         |
| $Ma$ [-]     | 0.012      | 0.07        |



T1.2 ábra - A mikrofontömbös mérések és a BPM modell eredményei közötti eltérés eloszlása

**II. TÉZIS:** Rövid csöbe beépített axiális ventilátor esetén a rövid-kúpos beszívó idom kiváltása negyedkörös beszívó idommal a következő áramlási hatásmechanizmusokon keresztül járul hozzá a lapátsúcs környezetéből a szívóoldal felé kisugárzott szélessávú zaj hangteljesítményének csökkenéséhez:

- A rövid-kúpos beszívó idomnak tulajdonítható kerületi leválási zóna mérséklése.
- Ez által az elsődleges részáramlás kerületi iránnyal bezárt átlagos szögének növelése.
- Ez által annak megszüntetése, hogy a részáramlás elérje a következő lapátot és részben annak ütközve hagyja el a lapátsatornát, részben pedig másodlagos részáramlást alakítson ki.

A tézishoz kapcsolódó saját publikációk: [P10]

**III. TÉZIS:** Axiális ventilátor járókerékkel együttforgó vonatkoztatási rendszerében készített zajforrástérképein a járókerék lapátsúcsainak belépőle környezetében széles sávú forrásereőség-csúcsok jelenhetnek meg, „lapátsúcs zajforrás-bizonytalanságot” okozva a kiértékelésben. E csúcsok ugyanis a következő zajforrásokkal egyaránt összefüggésbe hozhatóak:

- Az adott lapátsúcs belépőle környezetéhez köthető jelenségek, vagy
- forgásirányban az adott lapát előtti lapát légrés-áramlásához köthető jelenségek.

A lapátsúcs zajforrás-bizonytalanság feloldására a következő módszer javasolt:

- a) Tetszőlegesen kiválasztott egyetlen lapát légrésének – és így a részáramlásának – mérséklése az által, hogy a lapátsúcsra könnyű, hajlékony, mereven rögzíthető kiegészítő lemezt ragasztunk.
- b) Ebben az állapotban ismételt mikrofontömbös mérések elvégzése, forrástérképek származtatása. Az egyenletes és a csökkentett légrésű esetekre származtatott forrástérképek összehasonlítása azon harmad-oktávsávokban, amelyekben a szóban forgó csúcsok megfigyelhetőek.

c) Ha forgásirány szempontjából a csökkentett légrésű lapát utáni lapát csúcsának belépője környezetében lévő forráserősség-csúcsok a vizsgált tercsávokban szisztematikusan mérséklődnek, akkor a megfigyelt csúcsok elsősorban a légrés-áramláshoz kötődnek.

A tézishoz kapcsolódó saját publikációk: [P7] [P9]

**IV. TÉZIS:** Axiális ventilátor a járókerékkel együttforgó vonatkoztatási rendszerben készített zajforrás-térképei révén diagnosztizálható a másodlagos résáramlás jelenléte, és vizsgálható annak zajkeltő hatása, a lapátcsúcs zajforrás-bizonytalanság feloldására javasolt módszer kiterjesztésével. Ha a csökkentett légrésű lapát utáni második lapát csúcsának környezetében lévő forráserősség-csúcsok is szisztematikusan mérséklődnek a vizsgált tercsávokban, ez a másodlagos résáramlás jelenlétének közvetett bizonyítéka.

A tézishoz kapcsolódó saját publikációk: [P7] [P9]

## A tézisekhez tartozó publikációk

- [P1] T. Benedek, "Mikrofontömbös akusztikai mérési módszerek a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Áramlástan Tanszékén," in *OGÉT 2012, XX: Nemzetközi Gépészeti Találkozó*, pp. 61-64, Kolozsvár, Románia, 2012.
- [P2] T. Benedek and P. Tóth, "Beamforming Measurements of an Axial Flow Fan in an Industrial Environment," *Periodica Polytechnica, Mechanical Engineering*, vol. 57, no. 2, pp. 37-46, 2013.
- [P3] T. Benedek and J. Vad, "Concerted Aerodynamic and Acoustic Diagnostics of an Axial Flow Industrial Fan, Involving the Phased Array Microphone Technique," in *ASME Turbo Expo 2014, Paper GT2014-25916*, Düsseldorf, Németország, 2014.
- [P4] T. Benedek, "Axiális átömlésű ventilátor mikrofontömbös diagnosztikája a zajcsökkentés és a hatásfoknövelés érdekében," *Energiagazdálkodás*, vol. 55, no. 3, pp. 2-5, 2014.
- [P5] J. Vad, G. Halász and T. Benedek, "Efficiency gain of low-speed axial flow rotors due the forward sweep," *Proceedings IMechE, Part A - Journal of Power and Energy*, vol. 229, no. 1, pp. 16-23, 2015.
- [P6] T. Kalmár-Nagy, B. D. Bak, T. Benedek and J. Vad, "Vibration and Noise of an Axial Flow Fan," *Periodica Polytechnica - Mechanical Engineering*, vol. 59, no. 3, pp. 109-113, 2015.
- [P7] T. Benedek and J. Vad, "Spatially Resolved Acoustic And Aerodynamic Studies Upstream And Downstream Of An Axial Flow Fan," in *Proceedings of 11th European Conference on Turbomachinery - Fluid Dynamics and Thermodynamics. ID: 128*, Madrid, Spanyolország, 2015.
- [P8] T. Benedek and J. Vad, "Case-specific Empirical Guidelines For Simultaneous Reduction Of Loss And Noise In Axial Flow Fans," in *Proceedings of Conference on Modelling Fluid Flow (CMFF'15), Paper 108*, Budapest, Magyarország, 2015.
- [P9] T. Benedek and J. Vad, "An industrial on-site methodology for combined acoustic-aerodynamic diagnostics of axial fans, involving the Phased Array Microphone technique," *International Journal of Aeroacoustics*, vol. 15, no. 1-2, pp. 81-102, 2016.
- [P10] T. Benedek and J. Vad, "Study on the Effect of Inlet Geometry on the Noise of an Axial Fan, with Involvement of the Phased Array Microphone Technique," in *ASME Turbo Expo 2016, Paper GT2016-57772*, Szöul, Dél-Korea, 2016.

## A szerző egyéb, a témához kapcsolódó publikációi

- [E1] T. Benedek és C. Horváth, „Különböző Turbulenciamodellek Összehasonlítása Axiális Átömlésű Ventilátor CFD Vizsgálatában,” in *OGÉT 2010 - XVIII. Nemzetközi Gépészeti Találkozó*, pp. 64-67, Nagybánya, Románia, 2010.
- [E2] C. Horváth, B. Tóth, P. Tóth, T. Benedek and J. Vad, "Reevaluating Noise Sources Appearing on the Axis for Beamforming Maps of Rotating Sources," in *International Conference on Fan Noise, Technology and Numerical Methods, Paper 13*, Párizs, Franciaország, 2015.

## Hivatkozások

- [1] D. J. Moreau, C. J. Doolan, W. N. Alexander, T. W. Meyers and W. J. Devenport, "Wall-Mounted Finite Airfoil-Noise Production and Prediction," *AIAA Journal*, vol. 54, pp. 1637-1651, 2016.
- [2] B. Zajamsek, C. J. Doolan, D. J. Moreau, J. Fischer and Z. Prime, "Experimental investigation of trailing edge noise from stationary and rotating airfoils," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 141, pp. 3291-3301, 2017.
- [3] G. Herold, F. Zenger and S. Ennes, "Influence of blade skew on axial fan component noise," *International Journal of Aeroacoustics*, vol. 16., no. 4-5., pp. 418-430., 2017.