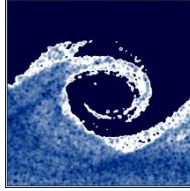


**Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem**  
**Gépészmérnöki Kar**  
**Áramlástan Tanszék**



**Axiális ventilátor lapát alapmodellek aerodinamikai és  
aeroakusztikai viselkedése kis Reynolds-számokon**

*Tézisfüzet*

*Balla Esztella Éva*

*Okleveles gépészeti modellező mérnök*

*Témavezető: Dr. Vad János, egyetemi tanár*

*Budapest, 2020*

# 1 Bevezetés és célkitűzések

A forgógépek széleskörű alkalmazást nyernek, kezdve a repülőgépiparban megtalálható nagy nyomásváltozást létrehozó hajtóművektől egészen a szellőztető vagy hűtőventilátorokig [1]. A kis nyomásnövekedést létrehozó ventilátorok családjába különböző járókerék átmérőjű, kerületi sebességű és lapátgeometriájú gépek tartoznak. Ezen felül a ventilátorok a levegő szállításának iránya szerint is csoportosíthatók. Három típust különböztetünk meg: axiál, radiál és keresztáramú ventilátorokat. A disszertáció középpontjában az axiális ventilátorok állnak.

A kis sebességű forgógépek, mint az axiális ventilátorok, zajkibocsátása több okból is időszerű kutatási témának számít. Először is, az ilyen típusú gépek gyakran az emberek közvetlen közelében üzemelnek, melynek következtében szükségessé válik a zajcsökkentésük annak érdekében, hogy az emberek komfort érzete javuljon. Továbbá, a kibocsátott zaj aerodinamikai jelenségekhez köthető veszteségek tünete is lehet. Ha úgy tervezik át a forgógépeket, hogy kisebb legyen a zajkibocsátásuk, akkor várhatóan a hatásfokuk is nőni fog a zajszintjük csökkenése mellett. Bár a kis sebességű ventilátorokat hagyományosan a szellőztetésben használják, új, feltörekvő területeken is megjelennek a kis Reynolds-számú forgógépek, mint például a drónipar [2].

Annak érdekében, hogy tervezési irányelveket lehessen megfogalmazni a ventilátorok zajcsökkentésére vonatkozóan, a ventilátor lapátok aerodinamikai és aeroakusztikai viselkedését alaposan meg kell vizsgálni. Az aerodinamikai viselkedés kis Reynolds-számokon (100 000 alatt) merőben különbözik a nagy Reynolds-számon tapasztalhatóaktól: a lapátokra jellemző ellenállás- és felhajtóerőtényezők Reynolds-szám függővé válnak [3, 4, 5]. Mivel az említett jelenségek rendkívül bonyolultak, ezért a ventilátorok egyszerűsített modelljén végeztem vizsgálatokat. Egy teljes ventilátor helyett egyedülálló lapátmetszeteket tanulmányoztam. A ventilátortervezés szakirodalmában az ilyen jellegű modellezés bevett gyakorlat [3, 6].

Ventilátorok esetén aerodinamikai okokra visszavezethető zajt okozhatnak a lapátokról leúszó örvények [7]. Az örvényleválásnak is több fajtája létezik, az egyik ilyen a profil örvényleválás. Ezidáig a profil örvényleválás jellemző frekvenciájának meghatározására nem állt rendelkezésre egyszerűen használható modell [7, 8, 9, 10, 11]. Céлом egy olyan módszer kifejlesztése, mely alkalmas az örvényleválás frekvenciájának becslésére már a ventilátortervezés fázisában.

Az Európai Unióban a 125W feletti motorteljesítményű ventilátorok hatásfokának el kell érnie egy minimális előírt értéket [12]. Annak érdekében, hogy a hatásfokot növeljék, bonyolultabb lapátgeometriákat használnak, ami megnöveli a gyártási költségeket. Egy elterjedten használt technika lemezlapátok esetén a lapátok élének lekerekítése, azonban a lekerekítés hatását még nem vizsgálták részletekbe menően. Ha a lekerekítés pontos aerodinamikai hatása ismert, akkor megállapítható, hogy valóban szükséges-e a lekerekítés alkalmazása. Ennek eredményeképpen a hatásfok növekedés, akár egyszerűbb lapátgeometriák alkalmazásával is elérhető, ami gyártási költség megtakarítást jelenthet. A disszertációban egy empirikus modellt dolgozok ki, mellyel a lekerekített, vagy tompa élű ívelt lemez lapátok aerodinamikai teljesítménye meghatározható.

A mikrofontömbös mérési technológián alapuló nyalábformálás egy korszerű módszer, mely alkalmas térben felbontott akusztikai információt szolgáltatni áramlásba helyezett lapát- vagy szárnymetszetekről. A mikrofontömbös mérések, nyalábformálással kiegészítve egyre nagyobb

teret nyernek a zajforrások lokalizálásában. A mikrofontömb előnye az egyedülálló mikrofonnal történő méréshez képest, hogy viszonylag egyszerűen képes a hangtér térbeli felbontására. Ennek megfelelően a módszert több, forgógépekhez köthető kutatásban is használták már, például a repülőgép iparban [13, 14, 15]. Azonban a kis sebességű ventilátorokhoz köthető kutatásokban még manapság is ritkán használják [16, 17]. Egy új mérési és feldolgozási módszert dolgozok ki a disszertációban, amely alkalmas a kis sebességű axiális ventilátorlapátokhoz köthető domináns zajforrások lokalizálására.

## 2 Eredmények

A disszertációban szélcsatorna méréseket mutatok be különböző íveltségű körív lemezlapátok és a RAF6-E szárnyprofil felhajtóerő- és ellenállástényezőjére vonatkozóan. A vizsgálatokat 20 000 és 140 000 közötti Reynolds-számon végeztem,  $0^\circ$  és  $10^\circ$  közötti megfúvási szögeken. A mérések magukba foglalnak lekerekített és tompa élű lapátokat is. A mérési eredmények alapján empirikus egyenleteket fogalmaztam meg ívelt lemezlapátok felhajtóerő- és ellenállástényezőire vonatkozóan, 0% és 8% közötti relatív íveltség,  $0^\circ$  és  $10^\circ$  közötti megfúvási szög, és 40 000 és 140 000 közötti Reynolds-szám esetére. A belépő- és kilépőél tompaságának hatását is számszerűsítettem. Azt találtam, hogy a felhajtóerőtényező 0,023 értékkel csökken, az ellenállástényező pedig 0,022 értékkel növekszik az élek tompán hagyása miatt. A fenti eredményeket az első és második tézispontban összegeztem.

Egy félempirikus modellt alkottam a profilörvényleválás frekvenciájának becslésére különböző lapátgeometriák esetére. A modell segítségével meghatározható az a harmadoktávsváv, ahol a profil örvényleválás megjelenhet, és ez által az örvényleválás a legmagasabb A-súlyozású sávokban elkerülhető. A frekvencia becsléséhez csupán geometriai és üzemi adatokra van szükség, illetve az ellenállástényezőre. A szakirodalomban eddig elérhető modellekhez képest az általam újonnan kifejlesztett modell figyelembe veszi a lapátok maximális relatív vastagságát, a megfúvási szöget, és használható szimmetrikus és nem szimmetrikus profilok esetén is. Az eredményeket a harmadik tézisben foglaltam össze.

Mikrofontömbös méréseket végeztem annak érdekében, hogy megállapítsam a szárnyprofilok által keltett zaj forrásának helyzetét és intenzitását. A mikrofontömbös méréstechnikában alkalmazott számos mikrofon lehetővé teszi a zajforrások helyzetének detektálását. A mérési összeállítás újdonságtartalma, hogy a mikrofontömböt a profilok felfűzési vonalára merőlegesen helyeztem el, ami lehetővé teszi a a húrral párhuzamos és a profilok felületére merőleges irányban is a zajforrások helyzetének meghatározását. A szélcsatorna egyik falát Kevlar anyaggal helyettesítettem, annak érdekében, hogy az akusztikai méréseket az erőmérésekhez hasonló konfigurációban tudjam lemérni.

Dipólus nyalábformálást alkalmaztam a mért mikrofon jeleken. Egy új feldolgozási módszert alkottam meg a mikrofontömbös jelek kiértékelésére, mivel a hagyományos kiértékelési módszerek több hátránya is van. A zajtérképeken hamis források jelenhetnek meg, amik fizikailag nem köthető a profilok zajához. Ezek a hamis zajforrások a következő okokra vezethetők vissza. a) A mikrofonokhoz köthető mérési bizonytalanságok. b) A háttérzajban jelenlévő zavarások, amik akár a háttérzaj kivonás után is megmaradhatnak. c) Nyalábformálási anomáliák, pl. melléknyalábok. d) A mikrofontömbös méréstechnika felbontási korlátja, ami meghamisíthatja a zajforrások helyének meghatározását. A kifejlesztett módszer háttérzaj kivonást, megfelelő peremfeltétel alkalmazását és a Laplace-egyenlet alapú szűrési módszert foglalja magában, annak érdekében, hogy a mérésekből kinyerhetővé váljon a hasznos jel. A kifejlesztett módszert a negyedik tézispont foglalja össze.

A kis sebességű ventilátorok tervezésének gyakorlatában a disszertáció eredményei felhasználhatók. A lapátmetszetek felhajtóerő- és ellenállástényezői megbecsülhetők az empirikus modell felhasználásával, a modell bizonytalanságát figyelembe véve. A felhajtóerő- és

ellenállástényezők ismerete lehetővé teszi a megfelelő ventilátorlapát geometria kiválasztását. Ha a lapát élét tompán kívánjuk hagyni, akkor ennek hatása is figyelembe vehető. Mindemellett már a tervezési fázisban megbecsülhető a profil örvényleválás lehetséges frekvenciája. A mikrofontömbös mérések lehetővé teszik a profilokhoz köthető domináns zajforrások meghatározását, amely információ felhasználható a ventilátorok zajának csökkentéséhez.

### 3 Tézisek

A szakirodalomban nem állnak rendelkezésre  $3,0 \cdot 10^5$ -es Reynolds-szám alatt részletes aerodinamikai adatok körív vázvonallú lemezlapátokra vonatkozóan, amelyek felhasználhatók lennének kis sebességű axiális ventilátorok, illetve terelőlapátok tervezésénél. A Reynolds-szám, a megfúvási szög és a relatív íveltség aerodinamikai hatását vizsgáltam az ellenállás- és felhajtóerőtényezőre vonatkozóan, egyedülálló lemezlapát modellek esetén. Szélcsatorna méréseket és szakirodalom kutatást végeztem. 0%-os (sík), 4%-os, 6%-os és 8%-os relatív íveltségű, körív vázvonallú lemezlapátokat vizsgáltam, mint reprezentatív esettanulmányokat. A 8%-os íveltségű lapát képes elérni a legnagyobb siklószámot az ívelt lemezlapátok között, emiatt a vonatkozó adatok jól hasznosíthatóak a jó hatásfokú lapátok tervezésénél. A vizsgálat középpontjában a  $0,4 \cdot 10^5$ - $3 \cdot 10^5$  közötti Reynolds-számok álltak. Ez a tartomány a szakirodalomban [6] eddig rendelkezésre álló  $3,0 \cdot 10^5$ -es és afeletti Reynolds-szám alatt van. A megfúvási szög tartomány  $0^\circ$ - $10^\circ$  között került beállításra. Ez a szögtartomány magában foglalja az elérhető legnagyobb siklószámok értékét, mindegyik vizsgált ívelt lemezlapát esetén. Ezáltal a kinyert adatok felhasználhatók nagy fajlagos teljesítményű és hatásfokú lapátok tervezése esetén.

#### 1. Tézispont

Egyedülálló körív vázvonallú lemezlapátokat tekintünk, kétdimenziós közelítésben. A T2.1 táblázatban megadott geometriai adatok és üzemi körülmények mellett, a felhajtóerő- és ellenállástényező értékek empirikus összefüggésekkel számíthatók, a megfúvási szög, a relatív íveltség és a Reynolds-szám függvényében, a következő módon:

$$C_L = C_{L300} - \mathcal{S}_L(3.00 \cdot 10^5 - Re) \quad (T1.1)$$

$$C_D = C_{D300} - \mathcal{S}_D(3.00 \cdot 10^5 - Re) \quad (T1.2)$$

$C_{L300}$ ,  $C_{D300}$ ,  $\mathcal{S}_L$  és  $\mathcal{S}_D$  a következő egyenletekkel számítható:

$$C_{L300} = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^2 \mathcal{A}_{ij} \left(\frac{h}{c}\right)^j \alpha^i \quad (T1.3)$$

$$\mathcal{S}_L = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^2 \mathcal{B}_{ij} \left(\frac{h}{c}\right)^j \alpha^i \quad (T1.4)$$

$$C_{D300} = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^2 \mathcal{C}_{ij} \left(\frac{h}{c}\right)^j \alpha^i \quad (T1.5)$$

$$\mathcal{S}_D = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^2 \mathcal{D}_{ij} \left(\frac{h}{c}\right)^j \alpha^i \quad (T1.6)$$

ahol  $h/c$  százalékban,  $\alpha$  fokban értendő. Az empirikus együtthatók értékeit a T1.2-T1.5 táblázatok tartalmazzák. A modell tapasztalati szórással jellemzett, átfogó hibája  $\pm 3\%$  a  $C_L$  és  $\pm 8\%$  a  $C_D$  tényezőkre. A jelölések magyarázatát a T1.6 táblázat tartalmazza.

T1.1 táblázat Geometriai adatok és üzemi körülmények

$h/c$	0% - 8%
$t/c$	2% - 3%
$Re$	$0,4 \cdot 10^5 - 3,0 \cdot 10^5$
$\alpha$	$0^\circ - 10^\circ$
Belépő- és kilépőél kiképzés	Lekerekített

T1.2 táblázat Empirikus tényezők a felhajtóerő-tényező bázisértékéhez

		i			
		<b>A</b>	0	1	2
j	0	$-8,20 \cdot 10^{-3}$	$3,85 \cdot 10^{-2}$	$2,25 \cdot 10^{-2}$	$-1,87 \cdot 10^{-3}$
	1	$1,04 \cdot 10^{-1}$	$2,76 \cdot 10^{-2}$	$-7,99 \cdot 10^{-3}$	$5,57 \cdot 10^{-4}$
	2	$-4,25 \cdot 10^{-4}$	$-2,66 \cdot 10^{-3}$	$6,22 \cdot 10^{-4}$	$-4,06 \cdot 10^{-5}$

T1.3 táblázat Empirikus tényezők a felhajtóerő-tényező meredekségéhez

		i			
		<b>B</b>	0	1	2
j	0	$5,78 \cdot 10^{-7}$	$-5,82 \cdot 10^{-7}$	$1,59 \cdot 10^{-7}$	$-1,08 \cdot 10^{-8}$
	1	$-2,07 \cdot 10^{-7}$	$2,79 \cdot 10^{-7}$	$-5,74 \cdot 10^{-8}$	$3,50 \cdot 10^{-9}$
	2	$4,44 \cdot 10^{-8}$	$-2,93 \cdot 10^{-8}$	$5,08 \cdot 10^{-9}$	$-2,84 \cdot 10^{-10}$

T1.4 táblázat Empirikus tényezők az ellenállástényező bázisértékéhez

		i			
		<b>C</b>	0	1	2
j	0	$1,34 \cdot 10^{-2}$	$-1,98 \cdot 10^{-3}$	$1,84 \cdot 10^{-3}$	$-1,10 \cdot 10^{-5}$
	1	$3,50 \cdot 10^{-3}$	$-2,49 \cdot 10^{-4}$	$-7,35 \cdot 10^{-4}$	$4,53 \cdot 10^{-5}$
	2	$-2,27 \cdot 10^{-4}$	$-1,49 \cdot 10^{-5}$	$7,61 \cdot 10^{-5}$	$-5,44 \cdot 10^{-6}$

T1.5 táblázat Empirikus tényezők az ellenállástényező meredekségéhez

		i			
		<b><math>\mathcal{D}</math></b>	0	1	2
j	0	$3,29 \cdot 10^{-8}$	$-6,38 \cdot 10^{-8}$	$5,76 \cdot 10^{-9}$	$4,54 \cdot 10^{-12}$
	1	$-1,37 \cdot 10^{-8}$	$2,61 \cdot 10^{-8}$	$-4,90 \cdot 10^{-9}$	$9,73 \cdot 10^{-11}$
	2	$-7,39 \cdot 10^{-10}$	$-2,65 \cdot 10^{-9}$	$5,30 \cdot 10^{-10}$	$-1,30 \cdot 10^{-11}$

T1.6 táblázat Jelölésjegyzék

<b><math>\mathcal{A}, \mathcal{B}, \mathcal{C}, \mathcal{D}</math></b>	empirikus tényezők [-]
$c$	húrhossz [m]
$C_D$	ellenállástényező [-]
$C_L$	felhajtóerő-tényező [-]
$C_{D300}$	ellenállástényező bázisérték [-]
$C_{L300}$	felhajtóerő-tényező bázisérték [-]
$h$	vázvonal maximális magassága [m]
$i, j$	indexek
$\mathcal{S}_D$	ellenállástényező meredekség [-]
$\mathcal{S}_L$	felhajtóerő-tényező meredekség [-]
$Re$	húrhossz alapú Reynolds-szám [-]
$t$	lapátvastagság [m]
$\alpha$	megfúvási szög [°]

Kapcsolódó publikációk: [P1][P2][P3][P4]



*Axiális ventilátor-lapátozás gyártásának egyszerűsítése érdekében, a belépő és kilépő éleket olykor tompán hagyják. A belépő- és kilépőél tompaságának aerodinamika hatását vizsgáltam az ellenállás- és felhajtóerőtényezőre, egyedülálló lemezlapát modellek esetén, oly módon, hogy az eredmények felhasználhatók legyenek a lapáttervezésben. Szélcsatorna méréseket és szakirodalom kutatást végeztem. 0%-os (sík), 4%-os és 8%-os relatív íveltségű, körív vázvonallú lemezlapátokat vizsgáltam, mint reprezentatív esettanulmányokat. A vizsgálat középpontjában a  $0,4 \cdot 10^5$ - $1,4 \cdot 10^5$  közötti Reynolds-számok álltak. A megfúvási szög tartomány  $0^\circ$ - $10^\circ$  között került beállításra. Az él tompán hagyása miatt kialakuló felhajtóerő- és ellenállástényező változás várható értékét és tapasztalati szórását kiszámoltam.  $\Delta C_L$ -t és  $\Delta C_D$ -t úgy definiáltam, mint a különbség a lekerekített eset felhajtóerő-, illetve ellenállástényezője és a tompa eset felhajtóerő/ellenállástényezője között. Az él tompaság kedvezőtlen hatása a  $C_L$  és  $C_D$  tényezőkre számszerűsítésre került konzervatív szemléletben, tényezőnként egyetlen mérőszám használatával. A  $C_L$  csökkenése az éltompaság miatt a  $\Delta C_L$  várható értéke mínusz a  $\Delta C_L$  tapasztalati szórása. A  $C_D$  növekedése az éltompaság miatt a  $\Delta C_D$  várható értéke plusz a  $\Delta C_D$  tapasztalati szórása.*

## 2. Tézispont

Egyedülálló körív vázvonallú lemezlapátokat tekintünk. A T2.1 táblázatban megadott geometriai adatok és üzemi körülmények mellett, a be- és kilépőél tompán hagyása a következő eltéréseket okozza az aerodinamikai tulajdonságokban, a lekerekített élű referenciaesetekhez képest:

- $C_L$ : 0,023 értékű csökkenés
- $C_D$ : 0,022 értékű növekmény

A jelölések magyarázatát a T2.3 táblázat tartalmazza.

*T2.1 táblázat Geometriai adatok és üzemi körülmények*

$h/c$	0%-8%
$t/c$	2% - 3%
$Re$	$4,0 \cdot 10^4$ - $1,4 \cdot 10^5$
$\alpha$	$0^\circ$ - $10^\circ$

T2.2 táblázat Jelölésjegyzék

$c$	húrhossz [m]
$C_D$	ellenállástényező [-]
$C_L$	felhajtóerő-tényező [-]
$h$	vázvonal maximális magassága [m]
$Re$	húrhossz alapú Reynolds-szám [-]
$t$	lapátvastagság [m]
$\alpha$	megfúvási szög [°]

Kapcsolódó publikációk: [P1][P2][P3][P4]

*A profil örvényleválási frekvencia előrejelzésének gyakorlati jelentősége van a lapáttervezésben, mivel a profil örvényleválás problémát jelent a lapátrezgés és a zajkibocsátás szempontjából is. Annak érdekében, hogy ezek az előnytelen hatások elkerülhetők legyenek, szükséges a profil örvényleválás által érintett harmadoktávsvág meghatározása. A vizsgálatok hődrótos mérések, és a szakirodalmi adatok feldolgozását foglalták magukba. 2%-25%-os maximális relatív vastagságú profilokat vizsgáltam, melyek között ívelt és íveletlen profil is szerepelt. A vizsgálat középpontjában a  $0,5 \cdot 10^5$ - $15 \cdot 10^5$  közötti húrhossz alapú Reynolds-számok álltak, ami magában foglalja a kis sebességű axiális ventilátorok tartományát is. A megfúvási szög tartomány  $0^\circ$ - $10^\circ$  között került beállításra. A modell felhasználja az univerzális Strouhal-számot, amit [18]-ban definiáltak, értéke a vizsgálati tartományban  $St^*=0,16$ . A szakirodalomban jelenleg rendelkezésre álló ajánlásokhoz képest, az újonnan kifejlesztett modell a maximális relatív vastagságtól és a megfúvási szögtől való függés bevezetésével, figyelembe veszi a geometriából és az üzemi körülményekből adódó különbségeket. Mindemellett a határréteg vastagság helyett, amelynek meghatározása bizonytalan a ventilátor járókerekek bonyolult áramlási körülményei miatt, az új modell egy integrál alapú paramétert, a nyombéli impulzus vastagságot használja. A nyombéli impulzus vastagság meghatározható az ellenállástényezőből, ha közvetlen mérések nem állnak rendelkezésre. A fenti kiegészítéssel a modell széles lapátgeometria és megfúvási szög tartományon teszi lehetővé a profil örvényleválási frekvencia becslését.*

### 3. Tézispont

Egyedülálló lapátokat tekintünk. A T3.1 táblázatban megadott geometriai adatok és üzemi körülmények mellett az alapfrekvencia, ahol a profil örvényleválás hatása megjelenhet, a következő módon határozható meg

$$f = \frac{b}{U_0 St^*} \quad (T3.1)$$

Az univerzális Strouhal-szám értéke  $St^*=0.16$ .

$b$  az alábbi módon számolható:

$$b = K^* \theta \quad (T3.2)$$

$K^*$  a következő empirikus egyenlettel határozható meg:

$$K^* = 1.9 + 0.19 \frac{t}{c} - 0.023 \alpha_L^2 \quad (T3.3)$$

ahol  $\alpha_L$  a megfúvási szög fokban.  $\alpha_L = 0^\circ$  a zérus felhajtóerőhöz tartozik, amit a T3.1 ábra szemléltet.

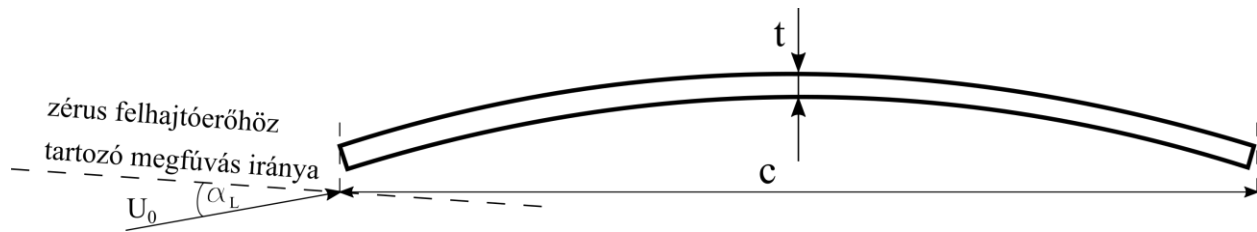
$\theta$  a  $C_D$  ellenállástényezőből határozandó meg, az alábbi módon

$$\theta = c \frac{C_D}{2} \quad (T3.4)$$

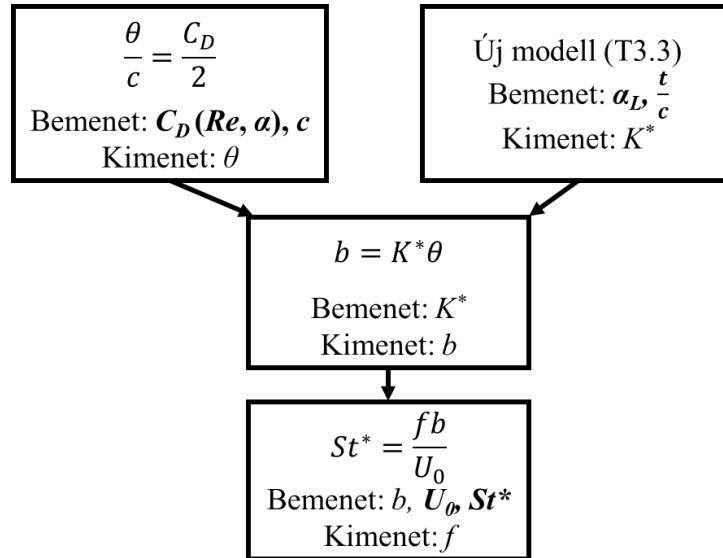
A teljes modell vázlata a T3.2 ábrán látható. A modell tapasztalati szórással jellemzett, átfogó hibája,  $\pm 27\%$  a  $K^*$ -ra, és  $\pm 30\%$  a  $f$ -re.

T3.1 táblázat Geometriai adatok és üzemi körülmények

$t/c$	2%-25%
$Re$	$0,5 \cdot 10^5 - 15 \cdot 10^5$
$\alpha_L$	$0^\circ - 10^\circ$



T3.1 ábra Egy profil vázlata, a jellemző mennyiségek jelölésével



T3.2 ábra Folyamatábra a profil örvényleválási frekvencia becslésére. A független bemeneti paraméterek vastagon szedettek

T3.2 táblázat Jelölésjegyzék

$b$	transzverzális távolság az örvénysorok között [m]
$c$	húrhossz [m]
$C_D$	ellenállástényező [-]
$f$	örvényleválási alaphfrekvencia [Hz]
$K^*$	impulzus vastagság alapú frekvencia skálázási faktor [-]
$St^*$	univerzális Strouhal-szám [-]
$t$	maximális lapátvastagság [m]
$U_0$	zavartalan áramlás sebessége [m/s]
$\alpha_L$	zérus felhajtóerő alapú megfúvási szög [°]
$\theta$	impulzus vastagság a nyomban [m]

Kapcsolódó publikációk: [P5] [P6]

*A vizsgálatok célja a profilokhoz köthető zaj forrásának meghatározása volt. A húrhosszal párhuzamos és a lapát felületére merőleges irányban is szükséges a helymeghatározás. A vizsgálatok során mikrofontömbös méréseket végeztem axiális ventilátor lapátmodelleken egy, a profilok felfűzési vonalára merőleges megfigyelési síkból. A méréseket egy eredetileg aerodinamikai vizsgálatokra tervezett szélcsatornában végeztem. A mérési adatokat egy Laplace-egyenlet alapú szűrési eljárással dolgoztam fel, annak érdekében, hogy érvényes eredményeket nyerjek ki a zavaró hatásokkal súlyosan terhelt mérésekből. Háromféle profilgeometriát vizsgáltam: síklapot, ívelt lapot és a RAF6-E szárnyprofil. A síklap referencia esetnek tekinthető, míg az ívelt lap és a RAF6-E szárnyprofil reprezentatív példái a kis sebességű axiális ventilátor, és a terelő lapátozás tervezésben használt lapátgeometriáknak. A vizsgálat középpontjában a  $0,6 \cdot 10^5$ - $1,4 \cdot 10^5$  közötti húrhossz alapú Reynolds-számok álltak, ami a kis sebességű axiális ventilátorok működési tartományát jellemzi. A megfűzési szög tartomány  $0^\circ$ - $6^\circ$  között került beállításra. A javasolt feldolgozási módszer lehetőséget nyújt a profilhoz köthető zajok forrásának helybéli meghatározására, olyan mérési eredményekből melyeket különleges akusztikai átalakítások nélküli szélcsatornában végeztek.*

#### 4. Tézispont

Egy különálló szárnyhoz köthető zajforrás domináns csúcsának helyzete meghatározható a húrral párhuzamos, és a húrra merőleges irányokban, mikrofontömb alkalmazásával, szélcsatornában, az alábbi módszerrel. A jelölések magyarázatát a T4.1 táblázat tartalmazza.

- A kétdimenziós lapátmetszetet olyan szélcsatornába helyezük, mely a lapát két, felfűzési vonal irányú végénél zárt. Az egyik fal Kevlár anyagból készül.
- Sík mikrofontömböt használunk. A mikrofontömb síkja a lapát felfűzési vonalára merőleges.
- Mikrofontömbös mérési párokat készítünk, amelyek egy lapátmetszetet tartalmazó, és egy anélküli mérési elrendezést foglalnak magukba. Ennek érdekében a zajméréseket a kívánt lapát konfigurációknál, és üres, üzemelő szélcsatornában is elvégezzük, a kívánt áramlási sebességeken.
- Nyalábformálást végzünk a felvett mikrofon jeleken.
- Háttérzaj kivonás alkalmazandó a következő módon:

$$SS_U(x, z) = SS_P(x, z) - SS_{BG}(x, z) \quad (T4.1)$$

- A hasznos jel növelése érdekében téglalap alakú térbeli szűkítést (Region of Interest, ROI) használunk a lapátmetszet körül, melynek eredménye  $ROI_F$ . A  $ROI$ -nak a következő követelményeknek kell megfelelnie
  1.  $\overline{SS}_U$  legyen pozitív
  2.  $\overline{SS}_U$  növekedjen  $A_{ROI}$  csökkentésével  $ROI_F$  környezetében
  3.  $P$  degresszív módon növekedjen  $A_{ROI}$  növelésével  $ROI_F$  környezetében
 ahol

$$\overline{SS}_U = \frac{\int_{A_{ROI,F}} SS_U(x, z) dA}{A_{ROI,F}} \quad (T4.2)$$

$$P = \overline{SS}_U \cdot A_{ROI} \quad (T4.3)$$

- A vizsgálati tartomány peremén konstans peremfeltételt írunk elő az alábbi módon:

$$SS_{boundary} := \frac{\int_{A_{ROI,F}} SS_U(x, z) dA}{A_{ROI,F}} \quad (T4.4)$$

- Meghatározandó egy cél intenzitás amplitúdó érték az alábbi módon:

$$C_{PSF} = \frac{\int_{A_{ROI,F}} [SS_U - SS_{U,min}](x, z) dA}{\int_{A_{ROI,F}} PSF_n(x, z) dA} \quad (T4.5)$$

- Laplace-egyenlet alapú szűrést végzünk, diszkrétizált formában, a ROI peremétől a lapátmetszet felé haladva:

$$SS_k(x_i, z_i) := \frac{1}{4} \{SS_{k-1}(x_i + \Delta d, z_i) + SS_{k-1}(x_i - \Delta d, z_i) + SS_{k-1}(x_i, z_i + \Delta d) + SS_{k-1}(x_i, z_i - \Delta d)\} \quad (T4.6)$$

A Laplace-egyenlet alapú szűrést többször elvégezzük, amíg a csúcs intenzitás szintjének maximuma egyenlő nem lesz  $C_{PSF} + SS_{U,min}$ -nel.

A fenti módszer kimenete a domináns egyedüli pontforrás helyzete és  $C_{PSF} + SS_{U,min}$  intenzitása.

T4.1 táblázat Jelölésjegyzék

$A_{ROI,F}$	térben leszűkített tartomány területe [ $m^2$ ]
$C_{PSF}$	cél intenzitás érték [ $Pa^2$ ]
$\Delta d$	a térben leszűkített tartomány számítási rácsának osztása [m]
$P$	SS területi integrálja, hangteljesítménnyel analóg mennyiség [ $Pa^2m^2$ ]
$PSF_n$	normalizált pontszórásfüggvény a vizsgálati frekvencián [-]
$ROI_F$	téglalap alakú térben leszűkített tartomány
$SS_{boundary}$	forráserősség a térben leszűkített tartomány peremén [ $Pa^2$ ]
$SS_{BG}$	egy referencia értékkel normált forráserősség, amikor a szélcsatorna üres volt [ $Pa^2$ ]
$SS_k$	forráserősség k ciklusnyi Laplace-egyenlet alapú szűrés után [ $Pa^2$ ]
$SS_U$	szűretlen forráserősség háttérzaj kivonás után [ $Pa^2$ ]
$\overline{SS}_U$	profilhoz köthető forráserősség területi átlaga [ $Pa^2$ ]
$SS_{u,min}$	$SS_U$ minimuma [ $Pa^2$ ]
$SS_W$	egy referencia értékkel normált forráserősség, amikor a profil a szélcsatornában volt [ $Pa^2$ ]
$x$	térbeli koordináta a megfúvási irányban [m]
$z$	térbeli koordináta a megfúvási irányra merőlegesen [m]

Kapcsolódó publikációk: [P7][P8][P9][P10]



## A szerző tézisekhez kapcsolódó publikációi

- [P1] E. Balla and J. Vad, "An empirical model to determine lift and drag coefficients of cambered plates at moderate Reynolds numbers," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, Online first, 2020.
- [P2] B. Nagy and E. Balla, "Szárnymetszetek körüli áramlás szimulációja alacsony Reynolds-számokon," in *Proceedings of Spring Wind 2017 International Multidisciplinary Conference*, Miskolc, Hungary, pp. 90-101, 31 March-02 April 2017
- [P3] E. Balla, "Numerical simulations on basic models of low-speed axial fan blade sections," in *Proceedings of the 6th International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering (ISCAME 2018) : Book of extended abstracts*, Debrecen, Hungary, pp. 9-10, 11-12 October 2018
- [P4] E. Balla and J. Vad, "Lift and drag force measurements on basic models of low-speed axial fan blade sections," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, vol. 233, no. 2, pp. 165-175, 2019.
- [P5] E. Balla and J. Vad, "A semi-empirical model for predicting the frequency of profile vortex shedding relevant to low-speed axial fan blade sections," in *The 13th European Conference on Turbomachinery Fluid Dynamics and Thermodynamics*, Lausanne, Switzerland, Paper ID: 311, 12p., 8-12 April 2019.
- [P6] E. Balla, "Lapátmetszetek körüli áramlás által keltett zaj szimulációs vizsgálata," in *Proceedings of Spring Wind 2018 International Multidisciplinary Conference*, Győr, Hungary, pp. 30-38, 04-06 May 2018
- [P7] E. Balla and J. Vad, "Establishment of a beamforming dataset on basic models of low-speed axial fan blade sections," *Periodica Polytechnica, Mechanical Engineering*, vol. 61, no. 2, pp. 122-129, 2017.
- [P8] E. Balla and J. Vad, "Combined aerodynamic and phased array microphone studies on basic models of low-speed axial fan blade sections," in *ASME Turbo Expo 2018: Turbomachinery Technical Conference and Exposition*, Oslo, Norway, Paper ID: GT2018-75778, p. 11, 11-15 June 2018.
- [P9] E. Balla and J. Vad, "Beamforming studies on basic models of low-speed axial fan blade sections," in *Proceedings 12th European Conference on Turbomachinery Fluid Dynamics and Thermodynamics (ETC'12)*, Stockholm, Sweden, Paper ID: ETC2017-119, p. 13, 3-7 April 2017.
- [P10] E. Balla and J. Vad, "A Laplacian filtering-based technique to localize vortex shedding noise in a strongly contaminated environment", *8<sup>th</sup> Berlin Beamforming Conference*, Berlin, Germany, Paper ID: BeBeC-2020-D12, p. 19, 2-3 March 2020.

## Irodalomjegyzék

- [1] L. X. Huang, "Characterizing computer cooling fan noise," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 114, pp. 3189-3200, 2003.
- [2] T. J. Mueller, "Aerodynamic measurements at low Reynolds numbers for fixed wing micro-air vehicles," in *RTO AVT/VKI Special Course, Development and operation of UAVs for military and civil applications*, VKI, Belgium, 13-17 September 1999.
- [3] T. Carolus, *Ventilatoren*, Wiesbaden: B. G. Teubner Verlag, 2003.
- [4] W. Albring, *Angewandte Strömungslehre*, 6th ed., Berlin: Akademie-Verlag, 1990.
- [5] J. McMasters and M. Henderson, "Low-speed single-element airfoil synthesis," *Technical Soaring*, vol. 6, no. 2, p. 1–21, 1980.
- [6] R. A. Wallis, *Axial flow fans*, London: George Newnes Ltd., 1961.
- [7] H. Dou, Z. Li, P. Lin, Y. Wei, Y. Chen, W. Cao and H. He, "An improved prediction model of vortex shedding noise from blades of fans," *Journal of Thermal Science*, vol. 25, no. 6, pp. 526-531, 2016.
- [8] C. Lee, M. K. Chung and Y. H. Kim, "A prediction model for the vortex shedding noise from the wake of an airfoil or axial flow fan blades," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 164, no. 2, pp. 327-336, 1993.
- [9] A. S. Hersh, P. T. Sodermant and R. E. Hayden, "Investigation of acoustic effects of leading-edge serrations on airfoils," *Journal of Aircraft*, vol. 11, no. 4, pp. 197-202, 1974.
- [10] A. Fathy, M. I. Rashed and E. Lumsdaine, "A theoretical investigation of laminar wakes behind airfoils and the resulting noise pattern," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 50, no. 1, pp. 133-144, 1977.
- [11] M. R. Fink, "Prediction of airfoil tone frequencies," *Journal of Aircraft*, vol. 12, no. 2, pp. 118-120, 1975.
- [12] "Regulation of the EC (EU) No. 327/2011, of 30. 03. 2011, implementing Directive 2009/125/EC of the EP and of the Council of the EU with regard to ecodesign requirements for fans driven by motors with an electric input power between 125 W and 500 kW," *Official Journal of the European Union*, p. 8–21, 6 April 2011.
- [13] F. V. Hutcheson and T. F. Brook, "Effects of angle of attack and velocity on trailing edge noise determined using microphone array measurements," *International Journal of Aeroacoustics*, vol. 5, no. 1, pp. 39-66, 2006.

- [14] T. Geyer, E. Sarradj and J. Giesler, "Application of a Beamforming Technique to the Measurement of Airfoil Leading Edge Noise," *Advances in Acoustics and Vibration*, Vols. 2012, Article ID 905461, p. 16, 2012.
- [15] D. J. Moreau and C. J. Doolan, "Tonal noise production from a wall-mounted finite airfoil," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 363, pp. 199-224, 2016.
- [16] P. Migliore and S. Oerlemans, "Wind tunnel aeroacoustic tests of six airfoils for use on small wind turbines," *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 126, no. 4, pp. 974-985, 2004.
- [17] D. J. Moreau, Z. Prime, R. Porteous, C. J. Doolan and V. Valeau, "Flow-induced noise of a wall-mounted finite airfoil at low-to-moderate Reynolds number," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 333, no. 25, pp. 6924-6941, 2014.
- [18] S. Yarusevych, P. E. Sullivan and J. G. Kawall, "On vortex shedding from an airfoil in low-Reynolds-number flows," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 632, pp. 245-271, 2009.