Mérés-alapú előtervezési irányelvek axiális ventilátor-lapátokról leúszó örvények figyelembe vételére

EXPERIMENT-BASED PRELIMINARY DESING GUIDELINES FOR CONSIDERATION OF PROFILE VORTEX SHEDDING FROM LOW-SPEED AXIAL FAN BLADES

DAKU Gábor, Dr. VAD János

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Áramlástan Tanszék
H-1111 Budapest, Bertalan Lajos u. 4–6. (BME „AE" épület). Honlap: *www.ara.bme.hu*
E-mail: *daku@ara.bme.hu*; *vad@ara.bme.hu*

ABSTRACT

The present study aims at extending the experimental database in the literature on profile vortex shedding with representative profiles used for low-speed axial fan blades. An analytical model was elaborated for representing the velocity RMS distribution in the near wake region. Utilizing the experimental results, the semi-empirical model available in the literature for predicting the frequency of profile vortex shedding was extended to low-speed axial fan applications. On this basis, quantitative guidelines have been formulated and are presented in the paper for consideration of PVS in preliminary design of axial fans rotor blades.

Keywords: design guidelines, low-speed axial fan, profile vortex shedding, semi-empirical model

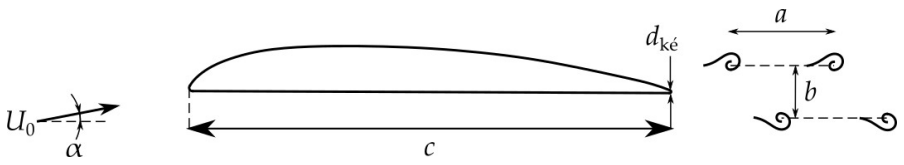
KIVONAT

Jelen tanulmány célkitűzése a profil-örvényleválásról szóló szakirodalmakban fellelhető mérési adatok kiterjesztése olyan reprezentatív lapátprofilokkal, melyeket gyakran alkalmaznak kis-sebességű axiál-ventilátorok esetén. A mérési eredmények kiértékeléséhez egy új analitikus modell került kidolgozásra a leúszó örvénysorok képviselte sebességtér leírására. A mérési eredményekre támaszkodva kiterjesztettük az örvényleválási frekvencia becslésére vonatkozó fél-empirikus szakirodalmi modellt axiális ventilátorokra jellemző lapátprofilokra. Ezt alapul véve irányelveket származtattunk a profil-örvényleválás figyelembe vételére axiális ventilátor járókerék-lapátozás előtervezése során.

Kulcsszavak: előtervezési irányelvek, axiális ventilátor, profil-örvényleválás, félempirikus modell

1. BEVEZETÉS

Jelen tanulmány témája: az axiális átömlésű légtechnikai ventilátorok járókerék-lapátjairól periodikusan leváló koherens örvények, az ún. *profil-örvényleválás* jelensége (1. ábra).



1. ábra *Profil-örvényleválás*

Ez a jelenség jól megkülönböztethető a kilépőél tompasága miatt bekövetkező *kilépőél-örvényleválástól* [1]. Az előbb említett szakirodalom a profil-örvényleválásra *lamináris határréteg örvényleválásként* hivatkozik, mely abból ered, hogy az örvényleválás előfeltétele a lamináris határréteg jelenléte a lapátprofil jelentős hányadán. Azonban, ahogy a [2] szakirodalomban tárgyalásra került, a lapátprofilról abban az esetben is leválhatnak örvények, ha a határréteg turbulens, azonban a lapát húrhosszával számolt Reynolds-szám mérsékelt, irányadó a $Re_c < 150000$ tartomány. Ekkor a kezdetben lamináris szívott oldali határréteg leválik a belépőél környezetében, majd bekövetkezik lamináris-turbulens átmenete, és visszafekvése a lapátprofil elülső részén. A profil-örvényleválás, illetve a kilépőél-örvényleválás mechanizmusa közötti alapvető különbség az egyes eseteket jellemző Strouhal-szám értékeiben, illetve skálázásában nyilvánul meg.

Kilépőél-örvényleválás esetén [3]:

$$St_{ké} = \frac{f_{ké} \cdot d_{ké}}{U_0} \cong 0{,}20 \tag{1}$$

Profil-örvényleválás esetén [2,4-5]

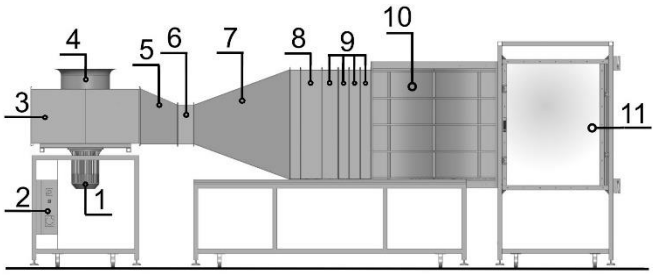
$$St^* = \frac{f_{\ddot{o}} \cdot b}{U_0} \cong 0{,}16 \qquad (2)$$

Az örvényleválás domináns frekvenciája kulcsszerepet játszik mind a mechanikai, mind az aeroakusztikai hatások megítélésében. Egyrészt amennyiben az örvényleválás domináns frekvenciája egybeesik a lapátprofil sajátfrekvenciájával, rezonancia léphet fel, ami az axiálventilátor tönkremenetelét okozhatja. Másrészt amennyiben ez a frekvencia az emberi hallás érzékenységét reprezentáló A-súlyozás görbe maximumának közelébe esik, úgy az örvényleválás zaja fokozottan zavaró lehet az észlelő személy számára.

A fentiek szemléltetik, hogy mérnöki szempontból kulcsfontosságú az örvényleválás domináns *f* frekvenciájának meghatározása. Továbbá lényeges meghatározni a leúszó örvénysorok közötti, megfúvási irányra merőleges *b* távolságot. *f* és *b* megállapítására különböző lapátprofilok modelljein különféle Reynolds-számok és megfúvási szögek mellett szélcsatorna méréseket végeztünk, ahol a profilok mögötti áramlási teret egykomponensű hődrót segítségével térképeztük fel, állandó hőmérsékletű üzemmódban.

2. KÍSÉRLETI BERENDEZÉS

A méréseket a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Áramlástan Tanszékének Kármán Tódor szélcsatorna laboratóriumában végeztük. A használt "Feketerigó 2" névre keresztelt szélcsatorna (2. ábra) átfogó jellemzőit és paramétereit [6] tárgyalja.



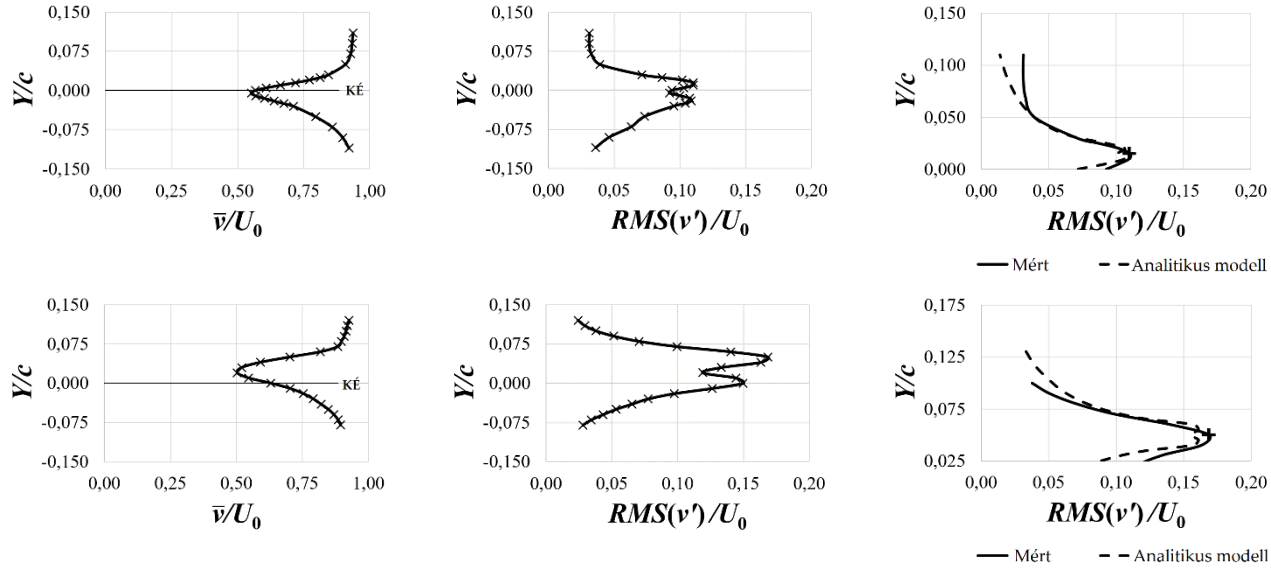
2. ábra *Mérőberendezés [6]:(1) Villanymotor (2) Frekvenciaváltó (3) Radiális ventilátor (4) Beszívó tölcsér (5) Terelő lapátok (6) Flexibilis csatlakozó (7) Osztott diffúzor (8) Méhsejt (9) Turbulencia csökkentő rácsozat (10) Átmeneti idom (11) Mérőtér*

Három különböző profilt vizsgáltunk: sík lemezlapát, 8% relatív íveltségű lemezlapát, 10% maximális relatív vastagságú RAF-6E szárnyprofil. Mindhárom profil lapáthúrhossza *100mm*, szélessége pedig *150mm* volt, mely 1,5 oldalviszonynak felel meg.

3. REPREZENTATÍV ESETTANULMÁNYOK

A három különböző lapátprofilon egyenként három különböző Reynolds-szám és egy-egy Reynolds-számhoz tartozóan négy különböző megfúvási szöget vizsgáltunk. Jelen tanulmányban szemléltetésképpen két reprezentatív példát mutatunk be (3.ábra). Mindkét példára a következő paraméterek vonatkoznak: $Re_c = 0{,}6 \cdot 10^5$, $\alpha = 0°$. A felső sor a sík lemezlapát az alsó sor pedig a RAF-6E szárnyprofil mérési adatait mutatja be. A vízszintes tengelyen a zavartalan megfúvási sebességgel dimenziótlanított sebesség, a függőleges tengelyen pedig a profil lapáthúrhosszával dimenziótlanított *Y* (megfúvási irányra merőleges) koordináta szerepel. Az $Y = 0$ pozícióhoz tartozik a közvetlenül a lapátprofilok kilépőéle (**KÉ**) mögött mért sebesség. A szakirodalomban többen is azt feltételezik, hogy a leúszó örvények tengelye egybeesik a sebesség RMS eloszlás maximumával, így a két maximum közötti távolság megfelel a *b* távolságnak. Azonban ennek alátámasztására sem szakirodalmi hivatkozás, sem a szerzők általi bizonyítás nem található. Sőt a [2,4] szakirodalmakban fellelhető némi látszólagos ellentmondásosság, mivel eltérő sebességkomponensekből származtatott RMS eloszlásokat hoz kapcsolatba *b* meghatározására vonatkozóan. Vagyis adódik a kérdés, hogy az általunk alkalmazott egykomponensű hődróttal mért RMS eloszlás valóban alkalmas-e *b* meghatározására.

Ennek a kérdésnek a megválaszolására egy új analitikus modellt dolgoztunk ki. Az analitikus modell eredményeként az örvénymag sugarát, illetve szögsebességet, mint modell-paramétereket megadva az analitikus RMS eloszlás előállítható. A 3.ábra (jobb) láthatók az analitikus és a mért eloszlások, megállapítható, hogy a mért eloszlás jól közelíthető az analitikus modellel alkalmasan megválasztott modell-paraméterek révén. Az analitikus modell segítségével továbbá tisztáztuk, hogy egykomponensű hődróttal nyert $RMS_{v'}$ eloszlás vizsgálata, kiegészítve az RMS helyi amplitúdó-maximum felkutatásával (”+” jel a 3.ábrán) alkalmasnak bizonyul az örvény-tengely detektálására.



3. ábra *Példák a hődrótos mérés eredményeire, átlagsebesség (bal), ingadozó sebesség RMS (közép), (jobb) a középső ábrák felnagyított szívott oldala*

4. EREDMÉNYEK KIÉRTÉKELÉSE

A mérési adatok szisztematikus kiértékeléshez szemléletes dimenziótlan jellemzőket származtattunk, melyeket a 1.táblázatban foglaltunk össze. A táblázat első oszlopában az egyes profiloknak a típusa szerepel. A következő két oszlop tartalmazza az áramlásra vonatkozó paramétereket, vagyis az Re_c húrhosszra vonatkoztatott Reynolds-számot és az α megfúvási szöget. Ezt követően a $\Delta f/f$ értékek következnek, melyek a relatív spektrális kiszélesedést mutatják. Annak érdekében, hogy ne keveredjen az (1) és (2) egyenleteknek megfelelő két különböző örvényleválási jelenség az egyes jelenségekhez két különböző Strouhal-szám definíciót rendeltünk.

Szemléletes dimenziótlan jellemzők 1. táblázat

Profil	Kilépőél-örvényleválás					Profil	Profil-örvényleválás				
	Re_c	α	$\Delta f_{ké}/f_{ké}$	$f_{ké}\cdot b/U_0$	$St_{ké}$		Re_c	α	$\Delta f_{ö}/f_{ö}$	St^*	$f_{ö}\cdot b/U_0$
Síklap	$0{,}6\cdot10^5$	0°	3,0 %	0,26	0,18	Ívelt lap	$0{,}6\cdot10^5$	2°	6,5 %	0,21	0,07
		2°	3,0 %	0,26	0,19			4°	6,9 %	0,19	0,06
		4°	3,0 %	0,18	0,18		$1{,}0\cdot10^5$	2°	14,9 %	0,19	0,06
		6°	6,5 %	0,21	0,17	RAF-6E	$0{,}6\cdot10^5$	0°	2,6 %	0,22	0,07
	$1{,}0\cdot10^5$	0°	2,5 %	0,28	0,20			2°	6,0 %	0,18	0,06
		2°	1,6 %	0,28	0,21			4°	105,3 %	0,11	0,03
		4°	2,5 %	0,28	0,20		$1{,}0\cdot10^5$	0°	8,0 %	0,20	0,08
		6°	3,3 %	0,25	0,20			2°	5,2 %	0,21	0,08
	$1{,}4\cdot10^5$	0°	2,3 %	0,29	0,20				Átlag:	0,19	0,06
		2°	1,8 %	0,29	0,20						
		4°	2,3 %	0,25	0,20						
RAF-6E	$0{,}6\cdot10^5$	0°	2,6 %	0,22	0,20						
			Átlag:	0,26	0,19						

A különböző definíciókra vonatkozó átlagértékek alapján tudunk következtetni arra, hogy melyik jelenséget detektáltuk. A kilépőél-örvényleválás esetén az $f_{ké}\cdot b/U_0$ reprezentálná a (2) egyenletet abban az esetben, ha profil-örvényleválási jelenségéről lenne szó. Míg $St_{ké}$ felel meg az (1) egyenlet definíciójának. A profil-örvényleválásra vonatkozó adatok esetén St^* felel meg a (2) egyenletnek, míg az $f_{ö}\cdot b/U_0$ reprezentálná az (1) egyenletet abban az esetben, ha a kilépőél-örvényleválás jelenségéről lenne szó.

5. FÉLEMPIRIKUS MODELL KITERJESZTÉSE, ELŐTERVEZÉSI IRÁNYELVEK

A szakirodalmi félempirikus modell [5]:

$$f = St^* \cdot \frac{U_0}{c} \cdot F \tag{3}$$

ahol *F* egy itt nem részletezett félempirikus függvény. Az 1.táblázat alapján, a légtechnikai axiál-ventilátorokat reprezentáló, ívelt lemezlapátra és RAF-6E szárnyprofilra vonatkozó mérések szerint az univerzális Strouhal-szám átlagértéke $St^* = 0{,}19$ adódott. Az eltérés jelentős mértékben a mérések bizonytalanságának tulajdonítható, hiszen St^* abszolút hibája $\pm$ 0,03 , ami lefedi az említett eltérést. Ennek alapján a szerzők úgy ítélik meg, hogy (2) egyenletben szereplő $St^* = 0{,}16$ állandó "univerzális" Strouhal-szám valóban univerzális olyan értelemben, hogy alkalmazhatósági köre kiterjeszthető a légtechnikai axiális átömlésű ventilátorokat jellemző lapátprofilokra.

A lapátrezgés, illetve a zaj szempontjából is az a kritikus, ha a teljes lapátmagasság mentén azonos frekvenciával úsznak le koherens örvények. Ezek a teljes lapátmagasságon ugyanolyan *f* frekvenciájú gerjesztést okoznak, ami ha egybeesik a lapátozás egyik sajátfrekvenciájával rezonanciát okozhat. Ahhoz, hogy megvizsgáljuk, hogy ez milyen körülmények/paraméterek esetén teljesül, tekintsünk alapul egy olyan járókerék-lapátozási geometriát amely: a sugár mentén hasonló geometriájú lapátmetszetekből áll, az összes lapátmetszetet azonos megfúvási szögre - például a legjobb siklószámot adó megfúvásra - terveztük, illetve hanyagoljuk el az aerodinamikai jellemzők Reynolds-szám függését. Ezen feltétel rendszert, az Euler turbina-egyenletet, illetve az elemi lapátrács munkaegyenletét felhasználva a kritikus eset előállhat:

$$f(r_L) = \frac{\Delta p_{\ddot{o},id}}{c^2} = \text{állandó} \tag{4}$$

tervezési esetekben. Ez például a *sugár mentén állandó lapát-húrhosszúságú, sugár mentén állandó lapátcirkulációra* tervezett lapátozás.

Lapát-előtervezési irányelvek a profil-örvényleválásból adódó mechanikai gerjesztés káros hatásának elkerülésére: elkerülni az ismertetett feltétel rendszer együttes teljesülését, illetve a kiadódó $f(r_L)$ tartományt megfelelően távol tartani a lapátozás sajátfrekvenciájától.

Lapát-előtervezési irányelvek a profil-örvényleválásból adódó zajterhelés káros hatásának elkerülésére: elkerülni az ismertetett feltétel rendszer együttes teljesülését, illetve a $f(r_L)$ tartományt eltolni az A-súlyozás legnagyobb értékeit jellemző harmadoktáv-sávoktól.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

Jelen tanulmány a profil-örvényleválás jelenségének axiális átömlésű ventilátorokra való átültetésével foglalkozott egykomponensű hődróttal végzett szélcsatornás mérések útján. Egy új analitikus modell felhasználásával igazolásra került a méréseink hitelessége a profil-örvényleválás vizsgálatának szempontjából. A félempirikus modell kiterjesztése és továbbfejlesztése révén a szerzők új lapátozás-előtervezési irányelveket származtattak. Ezek alapján megállapításra került, hogy kerülni kell a sugár mentén állandó lapát-húrhosszúságú, állandó lapátcirkulációra tervezett ventilátor-lapátozást.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Az előadó részvételét az OGÉT 2020 konferencián az NTP-HHTDK-19-0068 azonosítójú, "A hazai Tudományos Diákköri műhelyek és rendezvények támogatása" pályázat támogatta.

HIVATKOZÁSOK

[1] T. F. Brooks, D. S. Pope, M. A. Marcolini, "Airfoil self-noise and prediction," NASA Reference Publication, NASA-RP-1219, 1989.

[2] S. Yarusevych, M. S. H. Boutilier, "Vortex shedding of an airfoil at low Reynolds numbers," AIAA Journal, vol. 49, pp. 2221-2227, 2011.

[3] M. Roger, S. Moreau, "Extensions and limitations of analytical airfoil broadband noise models," International Journal of Aeroacoustics, vol. 9(3), pp. 273–305, 2010.

[4] S. Yarusevych, P. E. Sullivan, J. G.Kawall, "On vortex shedding from an airfoil in low-Reynolds-number flows, Journal of Fluid Mechanics," vol. 632, pp. 245-271, 2009.

[5] E. Balla, J. Vad, "A semi-empirical model for predicting the frequency of profile vortex shedding relevant to low-speed axial fan blade section," Proceedings of 13th European Conference on Turbomachinery Fluid dynamics & Thermodynamics, ETC13, 2019.

[6] A. Gulyás, M. Balczó, "Development of a small blower-type wind tunnel for educational purposes," MultiScience - XXVIII. MicroCAD International Multidisciplinary Scientific Conference, University of Miskolc, 2014.