

# RAF-6E szárnyszegmens szívott oldali nyom mérése Lézer Doppler Anemométer és hődrót mérés technikával az NPL szélcsatornában

## Measurement of RAF-6E airfoil with Laser-Doppler Anemometer and hot-wire in the wake

BERKÓ Balázs<sup>1</sup>, NAGY László<sup>2</sup>

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem (BME), Gépészmérnöki Kar, Áramlástan Tanszék  
1111 Budapest, Bertalan Lajos u. 4-6., tel.: +36 1 463 3465, fax.: +36 1 463 3464, www.ara.bme.hu

<sup>1</sup>MSc hallgató, berkobalazs25@gmail.com,

<sup>2</sup>egyetemi tanársegéd, nagy@ara.bme.hu

### Abstract

The aims of the article is comparing the measurement of hotwire and laser-doppler anemometer in the wake of the RAF-6E wing segmen, and the statement of the uncertainty. The arrangement of the measurement was in the  $0,1c$ ,  $0,25c$  és  $0,5c$  ( $c$ : wing chord length) distance from the trailing edge. The velocity profiles and the rms profiles was the subject of the examination.

### Összefoglaló

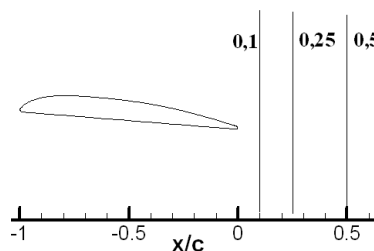
A cikk célja RAF-6E profilú szárny szívott nyomában történő hődrótos (HWA) és lézer-doppler anemométeres (LDA) mérések összehasonlítása, és a hozzájuk tartozó hibaszámítás ismertetése. A kilépő él után  $0,1c$ ,  $0,25c$  és  $0,5c$  távolságban ( $c$ : szárny húrhossz) történtek a mérések. A kiértékelés során a sebesség profilok, valamint az RMS profilok képezik a vizsgálat tárgyát.

### Kulcsszavak

szárny, lézer-doppler anemométer, hődrót, sebesség profil, RMS

## 1. BEVEZETÉS

Egy a Royal Aircraft Factory által kifejlesztett régi és egyszerű manapság általában ipari ventillátoroknál alkalmazott szárnyszegmens (RAF-6E, 1. ábra) képezi a vizsgálatunk tárgyát. A szárnyprofil még az I. világháború előtt fejlesztették ki, azonban a mai kor számára is szolgálhat új adatokkal, mivel kevés adatot lehet találni a szegmens körüli áramlási tér dinamikájáról [1].



1. ábra

RAF-6E szárnyprofil és a mérési pozíciók

A cikkben a szívott nyom három pozíciójában 0.1c, 0.25c és 0.5c történtek a mérések, egy régebbi azonban még a mai napig használt és kellően érzékeny méréstechnikával – hődróttal, valamint egy a napjainkban még csak a kutatás fejlesztés területén elterjedt modern berendezéssel – lézer-doppler anemométerrel. A cikk célja, a mért mennyiségeken keresztül összehasonlítani a két méréstechnika mérési bizonytalanságait.

## 2. MÉRÉSTECHNIKÁK RÖVID BEMUTATÁSA

### 2.1 Hődrótos méréstechnika

A hődrótos anemometria az áramlás konvektív hőátadásán alapuló méréstechnika, amit egy az áramlásba helyezett felfűtött fémszál érzékel. A hőelvonás az áramlás sebességétől függ, minél nagyobb a sebessége annál nagyobb lesz a hőelvonás. A hőelvonást befolyásoló tényezők: folyadék jellemzői (sűrűsége, dinamikus viszkozitása, hő kapacitása, hővezető képessége), áramlási paraméterek (sebesség, hőmérséklet, nyomás, stb.), hődrót konfiguráció (hossz, átmérő, túlfűtési arány). Ennél a méréstechnikánál nagyon fontos a hődrót érzékenysége, ezért a hővezető képesség minél kisebb kell, hogy legyen és a hőellenállási együtthatója pedig nagy, ebből az okból lényeges a fémszál hossz és átmérő aránya, ami tapasztalat alapján legalább 200. A mérés során közvetlenül a feszültséget  $U$  tudjuk mérni, ebből kalibráció során alkalmazott King's law segítségével határozható meg a sebesség, ahol  $A$  és  $B$  konstans együtthatók,  $V$  a sebesség,  $n$  pedig az ehhez tartozó kitevő.

$$U^2 = A + B \cdot V^n \quad (1)$$

A módszer lényege, hogy a közeg áramlása a dróttól hőt von el, ennek hatására csökken a drót ellenállása, amit viszont a wheatstone-híd segítségével állandó értéken tudunk tartani – a rajta eső feszültség változtatásának segítségével – és így a szenzor hőmérsékletét a szabályzással állandó értéken tartjuk. Az (1) képletből látható, hogy a sebesség nem lineárisan függ a feszültségtől, ez nehézségeket okozhat mind a mérés mind a kalibrálás során.

### 2.2 Lézer-doppler anemométeres méréstechnika

Ez a méréstechnika a mérőtér egy adott pontjában a lokális sebesség mérésére használatos. A mérő berendezés az áramlásba közvetlenül nem avatkozik be, viszont mivel a sebesség detektálásához szükség van fényvisszaszóró részecskékre, ezért arra ügyelnünk kell, hogy azok a lehető legjobban kövessék az áramlást. Az LDA megfelelő működésének alapjai: fényforrástól, optikai elrendezéstől, fényvisszaszóró részecskéktől, detektortól és az elektronikus jelfeldolgozó rendszertől függ. A működése során a lézerfényt prizmákon és lencséken keresztül két részre bontják ugyanakkora intenzitással és átmérővel. Ezek egy kis térfogatú pontban metszik egymást – ez a mérő térfogat – itt az interferencia jelensége miatt egy váltakozó intenzitású csíkozott rész alakul ki, a csíkok közötti távolság ( $\Delta x$ ). Az ezen keresztül haladó részecske a különböző intenzitású sávokból különböző erősségű fényt szór vissza, és ezt érzékeli a detektor. A detektor a visszaszórt fény jelét átalakítja frekvenciától függő részecske sebességgé  $V$ , amit Doppler frekvenciának  $f_D$  is nevezünk. A sebesség a következő képlet alapján kapható, ahol  $\Delta f$  frekvencia eltolást jelenti:

$$V = \Delta x \cdot (f_D + \Delta f) \quad (2)$$

A sebesség és a Doppler frekvencia közötti lineáris kapcsolat ösztönözte az LDA méréstechnikának a terjedését a hődróttal szemben, főleg mióta lehetséges pontos mérés magas turbulencia fok mellett is.

## 3. A MÉRÉS EREDMÉNYEI ÉS KIÉRTÉKELÉSÜK

### 3.1 A mérés során használt beállítások

Az NPL szélcsatornában a beállított  $Re=133000$  (ahol a jellemző méret a szárny húrhossza volt), a mérések során a légköri nyomást és hőmérsékletet mindig figyelembe vettem a beállítások során. A RAF-6E profilú szárny szegmens adatai: szélessége 2.5c, állásszöge  $5^\circ$ .

A HWA-nál használt legfontosabb beállítandó paraméterek a következők: mintavételezési frekvencia 6000 [Hz], átlagolási idő 5[s] – ezeknek a paramétereknek az értékeit egy előző mérés sorozatunk tapasztalatából nyertem, a szenzor hidegellenállása hőmérséklettől függő mennyiség (kalibrálásnál beállítandó), túlfűtési arány 1.8, kalibrációs görbe illesztésénél használt King's law együtthatói és kitevője minden kalibrálásnál más lesz. Kalibrálni akkor szükséges a hődrótot, ha a környezeti hőmérséklet megváltozása nagyobb, mint 1 °C.

A 2 D-s LDA szoftveres beállításai és egyéb paraméterei a következők: lézersugár hullámhossza: (1) 514.5 [nm] és (2) 488 [nm], fókusztávolság 363 [mm], az átmérő 2.65 [mm], interferencia csíkok közötti távolság: (1) 3.7441 [μm], (2) 3.5513 [μm], a „downmix” frekvencia: 38 [MHz], sávszűrés: (1) 1-10 [MHz], (2) 0.3-3 [MHz].

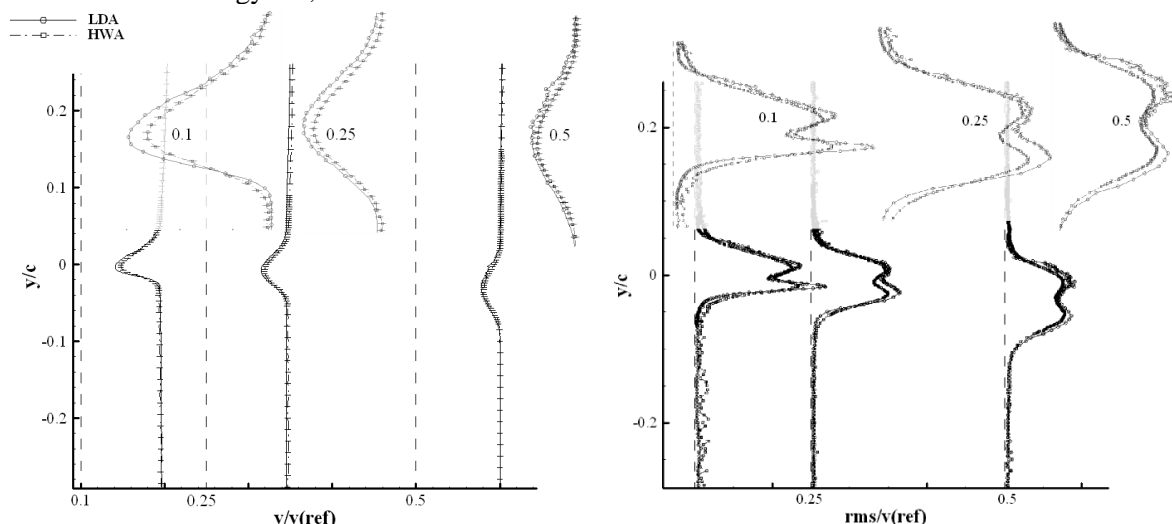
### 3.2 Mérés eredményeinek ismertetése

A mérés eredményeként a szívott nyomban jellegzetes alakú sebesség- és rms profilokat kapunk. Az rms jelentése „root mean square”, azaz minden egyes mért pontban az átlagtól való eltérés négyzetes átlaga. A diagram értelmezéseként az abszcissza tengelyen a vízszintesen mért pozíció dimenzióatlanított értéke látható és az egyes pozíciókhoz tartozó dimenzióatlanított sebesség (balra) illetve rms (jobbra) profilok, az ordinátatengelyen pedig, a kilépő élhez viszonyított dimenzióatlanított függőleges távolság van feltüntetve.

A sebesség a szárny szívott és nyomott oldalán a falnál nulla és attól távolodva növekszik elérve a kilépő élt a profilok (szívott és nyomott oldali) összeérnek, majd a nyomban megtartják az alakjukat. Hasonló jelenség a sík szabadsugaraknál játszódik le, itt a két fal között áramlik ki a levegő és a két falnál a tapadás törvénye miatt az áramlás sebessége nulla, attól távolodva viszont nő, míg a szárnynál egy fal van, de két különböző sebességű határréteg találkozik a kilépő élnél és ezek összeolvadásából jön létre ez a sebesség profil, de hasonlóképpen alakul az rms profil alakja is. Az egyes profilok dimenzióatlanított sebesség minimumai elméletileg a kilépő él magasságától  $\sin 5^\circ \cdot (x/c)$  távolságára kell lennie  $y/c$  irányban (mert a szárny állásszöge  $5^\circ$ ), ezt a valóság jól közelíti.

A szívott nyomban mért rms profilok egy órajárásával megegyezően  $90^\circ$ -kal elforgatott „M” betűre hasonlítanak. Az rms profilok nyombeli helyi minimuma a sebességek minimumánál tapasztalható (szárnyfal hatása miatt, mivel itt a nulla sebességhez nulla rms tartozik).

A két méréstechnika közötti lényeges különbség a sebesség profil szempontjából a nyomban tapasztalható, az LDA-val történt mérés során a minimális sebesség kisebb, mint a hődrótos mérése. A nyomon kívül azonban elég jól egyeznek az eredmények. Az rms szempontjából a hődrótos mérés eredményei sokkal zajosabbak a nyomon kívül – valószínűleg a nyomban is csak nem elég kicsi a térbeli felbontása a mért profilnak (traverz legkisebb lépésköze 0,2 [mm]  $\Delta y/c=10^{-3}$ , ez mind két mérésre LDA, HWA igaz), hogy ez érzékelhető legyen. Illetve az LDA-val a nyomban kapott két rms maximum csúcsa nagyobb, mint a hődrótos mérése.



2. ábra

Dimenzióatlanított sebesség profilok (balra), és rms profilok (jobbra)

### 3.3 Hibaszámítás

A mérések során gondot okozott a szárny állásszögének pontos beállítása, ennek a bizonytalansága  $\pm 1^\circ$ . Továbbá az NPL szélcsatorna mérőterének légtömörsege is kétséges erre, más mérések mutattak rá. Illetve, ami mindkét mérést jelentősen befolyásolhatja az a Re állandó értéken tartása, ami esetünkben elég jól kontrollálható volt – erre azért volt szükség, hogy a mérési adatokat ne csak egymáshoz lehessen hasonlítani, de szimuláció validálására is lehetőségünk legyen.

#### 3.3.1 Hődrótos mérések bizonytalansága

Hődrótos mérések bizonytalanságát Vad J. [4] cikkében leírtak alapján számoltam. Ez a részletes hibaszámítás a kalibrációs hibán keresztül a hődrótos mérő berendezéssel mért sebesség és a hődrót szenzora által érzékelt sebesség bizonytalanságait is figyelembe veszi. Ez alapján a hődrótos mérési eredmények 3,5%-os hibával terheltek.

#### 3.3.2 LDA-s mérések bizonytalansága

Az LDA-ról köztudott, hogy nem kell kalibrálni a stabil belső paramétereinek miatt. A lézer hullámhosszának, fókusz távolságának, interferencia csíkok közötti távolságának, a két lézer nyaláb által bezárt szögnek az értékét a gyártó meg tudja adni, viszont a bizonytalanságokat nem közlik. Az LDA-t gyártó cég honlapján [6] található, hogy, ha megfelelően állítjuk be a „downmix” frekvenciát és a frekvencia szűrését, akkor a kapott sebességünk pontos. Így az LDA hibájára nincsen egzakt adatunk. A fényvisszaszóró részecske átmérőjének ( $d_p \approx 1 \text{ } [\mu\text{m}]$ ) kisebbnek kell lennie, mint az interferencia csíkok közötti távolság ( $\Delta x \approx 3,5 \text{ } [\mu\text{m}]$ ), ami a mérések során teljesült, ezért a mérésbe bevitt hibát itt nullának vehetjük.

A részecske áramlás követését pedig a tehetetlenségi paraméter jellemzi, ha ez nullához közel esik, akkor a szemcse mozgása jól követi az áramlást. Ez a részecskére ható tehetetlenségi és sűrűdásból származó erők hányadosa, esetünkben  $10^{-6}$  [5], így a hibaszámítása során nem kell figyelembe vennünk.

Így az LDA bizonytalanságára becslést is nehéz adni, viszont a szakirodalom szerint az LDA méréstechnika kis turbulencia fok mellett mindenféleképpen pontosabb, mint a HWA méréstechnika.

## 4. KONKLÚZIÓ

A két méréstechnika összehasonlítása során a HWA-ra pontosan meg tudjuk adni a mérés bizonytalanságát, ami a méréseink során 3,5% volt, míg az LDA-s méréstechnika bizonytalansága hitelesítési bizonyítvány nélkül igen nehezen becsülhető. A cikk tárgyát nem képezi, de a mérési adatok össze lettek hasonlítva szimulációs eredményekkel, ahol az LDA-s eredmények jobban egyeztek a HWA-s adatokénál, különösen a nyomban. Ezért további szimulációk és mérések elvégzése szükséges, mind a nyom pontosabb feltérképezésére, mind az LDA-s eredmények hibájának becsülésére.

### Köszönet nyilvánítás

A cikk elkészítését az OTKA K 83807 projektje támogatta, és a "Minőségorientált, összehangolt oktatási és K+F+I stratégia, valamint működési modell kidolgozása a Műegyetemen" c. projekt, megvalósítását az Új Széchenyi Terv TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KMR-2010-0002 programja támogatja."

### Irodalomjegyzék

D. A. Day, Airfoils, [http://www.centennialofflight.gov/essay/Evolution\\_of\\_Technology/airfoils/Tech5.htm](http://www.centennialofflight.gov/essay/Evolution_of_Technology/airfoils/Tech5.htm) [1]

F. E. Jørgensen, „How to Measure Turbulence with Hot-Wire Anemometers – A Practical Guide”, *Dantec Dynamics*, Publication No. 9040U6151, 2002 [2]

G. Degrez, M. L. Riethmuller, D. Fletcher, *Measurement techniques in fluid dynamics – Chapter 6, Optical Measurements*, VKI, VKI, 2001 [3]

J. Vad, *Uncertainty of CTA Hot-Wire Measurements using an x-probe applied to an axial flow fan rotor* [4]

T. Lajos, *Az áramlástan alapjai*, Dr. Lajos Tamás, Budapest, 2008 [5]

Trust. Science. Innovation. honlapja: <http://www.tsi.com/LDV-System-2-Component> [6]