

# Szárny körül kialakuló áramlás numerikus szimulációja

## Numerical simulation in the vicinity of airfoil

NAGY László

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  
egyetemi tanársegéd, nagy@ara.bme.hu, www.ara.bme.hu/~nagy

**Abstract** The flow past an airfoil at an angle of attack of  $5^\circ$ , at chord Reynolds number 122000 and with the assumption of spanwise periodicity was modelled by means of Large-Eddy Simulation using the commercial software ANSYS-FLUENT. The spanwise and streamwise characteristics of the flow as well as the vortex structure downstream the laminar/turbulent transition was investigated.

**Keywords:** zonal LES, RANS, airfoil grid dependency

**Összefoglaló:** Egy ventilátorokban használatos,  $5^\circ$ -os állásszögben beállított szárnyprofil körül kialakuló, 122000 Reynolds számmal jellemezhető áramlás kialakulását vizsgáltam, főként a lamináris/turbulens tranzíció vonatkozóan. A numerikus szimulációkat a kereskedelmi forgalomban kapható ANSYS-FLUENT-tel végeztem, melyeket mérésekkel hasonlítottam össze.

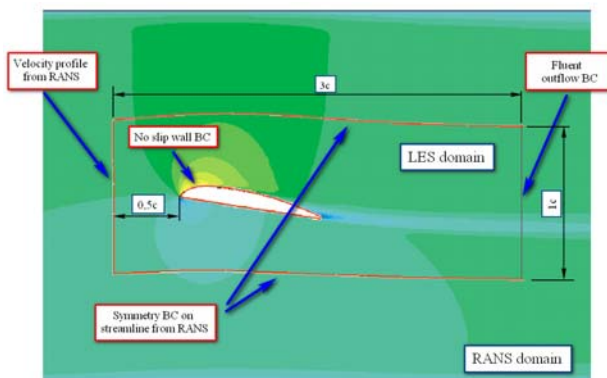
**Kulcsszavak:** zonal LES, RANS, szárnyprofil, ventilátor, hálófüggőség

## 1. BEVEZETÉS

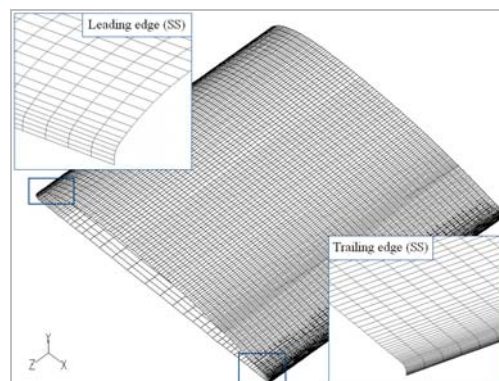
Ebben a cikkben egy számítógépes szimuláció sorozatra vonatkozó tapasztalatainkat és eredményeinket foglalom össze. A vizsgálat tárgya egy általában ventilátorokban használt RAF6-E profilú egyenes szárny, mely körül az áramlási teret a nagy örvény szimulációval (Large Eddy Simulation, LES) határoztuk meg [1, 2, 3, 4, 5]. A nagy erőforrás-igényű LES a Reynolds átlagolt Navier Stokes (RANS) egyenletektől pontosabban tudja meghatározni az áramlástan egyenleteket, mert a jellemző, felbontott örvényeket közvetlenül számolja, szemmel a RANS egyenletekkel, amelyek teljes mértékben csak modellezik azokat. A cellaszám minimalizálására a nagy örvény szimulációt csak szárny közvetlen környezetében végeztük el, ehhez viszont megfelelő peremfeltételeket kellett előállítani. Ebben az esetben, a széles körben használt sub grid scale (SGS) esetében a dinamikus Smagorinsky-Lilly modellt [6, 7] használtuk, habár a vonatkozó szakirodalom említést tesz arról, hogy a felületek mellett, azaz a határrétegben nem modellezi kellően pontosan az áramlást.

Ebben a tudományos értekezésben a numerikus peremfeltételek pontosításával és a hozzá kapcsolódó magyarázattal és az eredménnyel foglalkozom.

## 2. SZÁMÍTÁSI TARTOMÁNY ÉS A NUMERIKUS HÁLÓ FELÉPÍTÉSE



1. ábra  
LES tartomány és a peremfeltételek



2. ábra  
Numerikus háló (LES\_05\_50)

A LES számítási tartomány (1. ábra) peremfeltételeit egy korábbi 2D RANS [8, 9] szimuláció szolgáltatta. A tartomány áramlás irányában  $3c$  áramlás normálisan  $1c$  ( $c$ : *húrhossz*).

A 2. ábrán egy numerikus háló található (LES\_05\_50 esetben), amelyen látható a sűrűbb szívott oldal, ritkább nyomott oldal, továbbá a torlópont körüli és a kilépő él körül sűrítés, ahol a nagyobb gradienseket várjuk. Minden esetben a szárny körül 237 pont van elosztva, az O-H típusú hálón. Fesztáv mentén 4 különböző tartományméretet használtunk ( $L_z=0,125c$ ,  $L_z=0,25c$ ,  $L_z=0,5c$  és  $L_z=100c$ ) 50 pontra osztva. Továbbá, az  $L_z=0,5c$  esetben a fesztáv mentén 3 különböző számú osztáspontot használtunk (LES\_50\_25, LES\_50\_50, LES\_50\_100). Ez a cellaméret osztás minden esetben megfelelt fali léptékben ( $y^+$ ) 1 körüli értéknek. A cellaszámok rendre 1M, 2M és 4M körül alakultak a LES\_05\_25, LES\_05\_50 és a LES\_05\_100 esetben.

### 3. MEGOLDÓ LEÍRÁSA

A vizsgálatok során az ANSYS-FLUENT termékét használtuk, amely összenyomható, strukturálatlan, véges térfogatú megoldót használ.

Tekintettel az alacsony Reynolds számra és a 0,2 Machnál kisebb áramlási sebességre állandó sűrűségű és összenyomhatatlan közeget állítottunk be. Ahhoz, hogy térbeli diszkretizációk hatását minimalizáljuk, bounded central differenciál sémát (BCD) állítottunk be a momentum egyenletekre. a nyomás egyenletet első rendű sémával oldottuk meg. A sebesség és a nyomás egyenleteket a Fractional Step Method (FSM) módszer oldotta fel. Az idődiszkretizációhoz Non-Iterative Time Advance (NITA) sémát állítottunk be és jellemzően  $10^{-6}$ s-ban állítottuk be az időlépést. Az egyenletek megoldásakor figyeltük a Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) szám alakulását, az aerodinamikai jellemzőket, mint a felhajtó- és az ellenálláserő, illetve a fő egyenletek reziduumait.

### 4. PEREMFELTÉTELEK

A tartományban beállított peremfeltételeket az 1.ábra szemlélteti. A torlóponttól  $0,5c$  távolságban elhelyezkedő belépési peremfeltételen beállítottuk a korábbi 2D RANS szimulációjának azonos pozíciójában kiszámolt áramlási sebesség komponenseit, illetve a turbulencia paramétereit. Ezzel az értékkel inicializáltuk a tartományt a szimuláció indításakor.

A kilépési peremfeltétel tekintetében az ANSYS-FLUENT ún. *outflow* peremfeltételét és a *nyomás* peremfeltételt vizsgáltuk meg. Mivel a kilépési peremfeltételnél nem várunk visszaáramlást, illetve nem ismerjük a nyomás pontos értékét, így az *outflow* peremfeltétel mellett döntöttünk, amely egy homogén Neumann peremfeltételt tartalmaz magában.

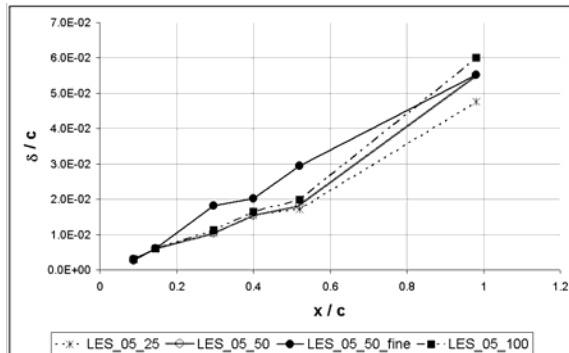
Kereszt irányban a periodikus peremfeltételt alkalmaztunk, ami azt jelenti, hogy az áramlási irány bal oldalán kilépő sebesség, nyomás, stb. értékek kilépnek a tartományból, de belépnek az áramlási irány bal oldalán és vice-versa.

Egy korábbi szimuláció során határoztuk meg az áramvonalakat,  $0,5c$  távolságban az áramlási irányban megfelelően, melyen úgynevezett szimmetria peremfeltételt felételeztünk. Ez azt feltételezi, hogy az adott peremfeltételen normál irányban nincs sebesség átáramlás, illetve normál irányban a fluxus mértéke is nulla. Az áramlási irányra merőlegesen elhelyezett szárny alatt és felett egy mérnöki megfontolás alapján választottuk a 2D RANS szimuláció áramvonalait. Cél volt a diszkretizációs hiba mértékének illetve a szimuláció időtartamának minimalizálása, s mivel négyoldalú hasáb cellákból építettük fel a számítási tartományt, így célszerű volt a megoldó szempontjából a feltételezett áramlási irányába állítani cellákat, azaz az áramvonal mentén húzni a szimmetria peremfeltétel mentén.

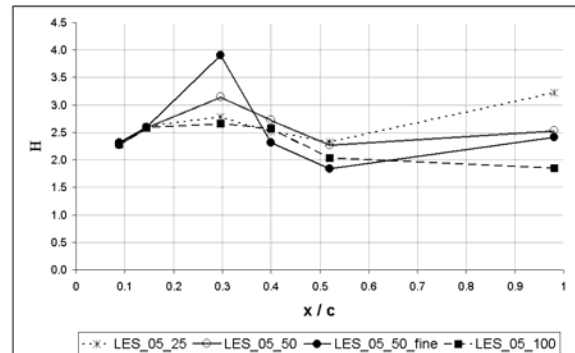
### 5. KIÉRTÉKELÉS

A határréteg jellemzésére a sebesség komponensek és a sebesség komponenseinek az ingadozások (RMS) használata mellett a klasszikus jellemző határréteg paramétereiket is összehasonlítottuk a LES\_05\_50 eset kapcsán, a különböző keresztirányú cella méretszám esetén. A határréteg vastagságát a szárny mentén a 3. ábra mutatja be. A kiszorító vastagság, a momentum vastagság viszonyából képzett shape faktor ( $H$ ) jellemzi a lamináris és a turbulens zónákat (4. ábra).

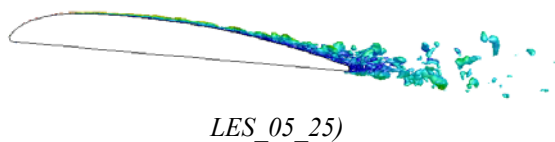
Ez [10] alapján úgy várjuk, hogy az aktuális vizsgálat esetén is a  $H$  2-3 között értéke lamináris jelleget mutat, míg 1,5-2 közötti értéke esetén turbulens jelleget várunk, azaz a határréteg jellemzői alapján nem várunk határréteg leválást a szárny felületén. Ezzel szemben a méréseink azt mutatták, hogy kb. a szárny 20%-ban leválási áramlás alakul ki, majd visszafekszik a felület, hogy a szárny kilépőel környezetében véglegesen leváljon.



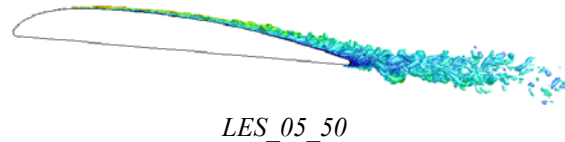
3. ábra  
Határréteg vastagsága



4. ábra  
Shape faktor



LES\_05\_25



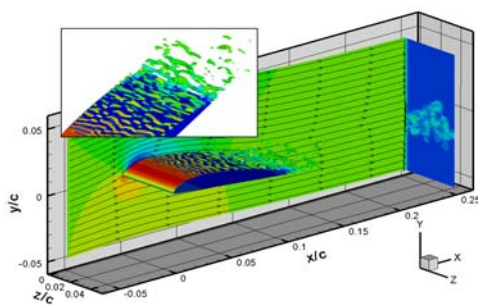
LES\_05\_50

5. ábra

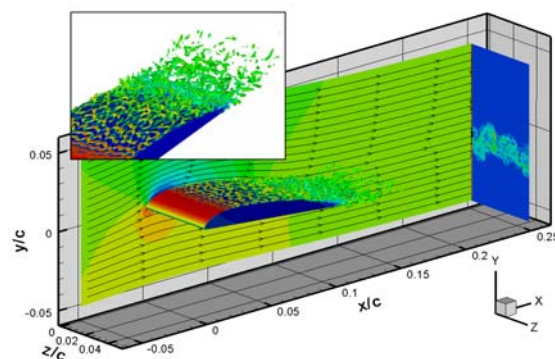
Határréteg alakulása a  $Q = 5 \cdot 10^7$  állandó szint vonalak esetében  
(a struktúrák a turbulens kinetikus energiával színezve)

### 5.1. A tartományban jellemző áramlási jellegek

A szimuláció értékelését a pillanatnyi változók értékelésével kezdtük, úgymint a nyomás, sebesség komponensek, örvényesség értékei. Jellemző és pontosabb képet mutathat az átlagolt áramlási jellemzők vizsgálata. A 4. ábrán a tartományban kialakuló koherens struktúrákat [11] lehet látni, míg az XY sík az időben és térben átlagolt nyomást mutatja. Kilépő peremfeltételen (YZ sík) pillanatnyi örvényesség látható, amely jól mutatja a szárny nyomát. A szárny felületén a csúsztató feszültség látható. A koherens struktúrákat a [12] elmélet alapján rajzoltok ki és áramlási irányba mutató sebesség értékével színezték.



LES\_05\_50\_fine



LES\_05\_100

5. ábra

A hálóméret hatása

Látható, hogy a keresztirányú cellaméret csökkentése megváltoztatja a struktúrák jellegét és intenzitását is. Ezeknek a mérésekkel történő összehasonlításakor azt vettük észre, hogy a legkeskenyebb tartomány ( $L_z=0,125$ ) közelíti meg leginkább a mérési eredményeket a sebesség tekintetében [8]. Azonban a szimulációk nem mutatnak akkora markáns lamináris leválási buborékot, mint amit nem a mérés során vártunk [8, 14, 15].

## 5.2. A szimulációs eredmények összehasonlítása a mérésekkel és az alkalmazott hardverek

Az eredmények ellenőrzése a BME Áramlástan Tanszék Kármán Tódor Szélesatorna Laboratóriumban zajlott lézer doppler anemométerrel (LDA) és hődróttal. Összehasonlítottuk a nyomástényezőket, a sebességkomponens értékeit, illetve a turbulencia jellemzőket a szárny körül és a szárny nyomában. Az eredmények a mérésekkel összevethető módon igazolták az áramlási viszonyokat és megmutatták a keresztirányú cellaméret és keresztirányú osztáspontok függőségét. [13, 14, 15].

A számítások a BME Áramlástan Tanszék klaszterén végeztük el, amely AMD Athlon64 (8+10mag) Intel Core 2 Quad Q6600 (20mag) és Quad-Core AMD Opteron 8350 (8mag) processzor magból áll. Processzormagonként 2-3GB memória állt rendelkezésünkre. Sun Grid Engine rendszeren Rocks 5.1 operációs rendszert használunk. A kapcsolatot Gigabit ethernetet oldottuk meg.

## 7. KONKLÚZIÓ ÉS TOVÁBBI CÉL

A szimulációk eredményeként azt lehet levonni, hogy a [8] alapján található mérésrel mutatott eltérés a keresztirányú cellaméret változásával megmarad, tehát, hogy a szárny előtt található pontokban valamint kb. a szárnyhúr 25% pontjától a sebesség értékek túlbecsülik a mérés értékeit. A leginkább érdekes terület így a kb. 0-25% ( $x/c$ ) értéknél található tartomány és nem csak a sebesség, hanem a lamináris határreteg paraméterei alapján és a sebesség RMS értékeiben is. A további kutatások így erre a tartományra fókuszálnak, megvizsgáljuk a diszkretizációs sémák hatását, valamint finomítani kívánjuk a szívott oldal cellabeosztását.

## 8. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezt a munkát támogatta az Országos Tudományos Kutatási Alapprogram, OTKA K63704 szám alatt. A szerzőt a Magyar Villamos Művek Zrt ösztöndíj keretében támogatja. Őszintén köszönöm a személyes konzultációt a kutatásom során Dr. Lohász Máté Mártonnak és Dr. Régert Tamásnak.

## 9. FORRÁSJEGYZÉK

- [1] Davidson L, Fröhlich J, Mellen C. LESFOIL: Large Eddy Simulation of Flow Around a High Lift Airfoil Springer, pp.135-147, 201-222, 2003
- [2] Sagaut P, Deck S, Terracol M. Multiscale and Multiresolution Approaches in Turbulence. Imperial College Press 2006
- [3] Lesier M, Métias O, Comte P. Large-Eddy Simulations of Turbulence. Cambridge University Press 2005
- [4] Sagaut P. Large Eddy Simulation for Incompressible Flows. Springer 2004
- [5] Kim SE. Large Eddy Simulation Using Unstructured Meshes and Dynamic Subgrid-Scale Turbulence Models 34th AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit, Portland Oregon, 2004
- [6] Guerts BJ. Elements of direct and large eddy simulation. Edwards 2004
- [7] Germano M; Piomelli U; Moin P, Cabot WH. A Dynamic Subgrid-Scale Eddy Viscosity Model, Physics of Fluids A-Fluid Dynamics, vol 3(7), pp. 1760 - 1765. 1991
- [8] Nagy L, Lohasz MM, Vad J. Hybrid/Zonal RANS/LES computation of an airfoil. In: Proceedings of Sixth Conference on Mechanical Engineering, Gépészet 2008. Budapest, 2008
- [9] Nagy L, Lohasz MM, Vad J RANS simulation of RAF6 airfoil. Proceedings of the Fifth Conference on Mechanical Engineering, Gépészet 2006. Budapest, 2006
- [10] Schlichting H. Boundary-layer theory. New York: McGraw-Hill, 1955
- [11] Ronald J. Adrian Hairpin vortex organization in wall turbulence. Physics of Fluids (19) 041301 2007
- [12] Hunt JCR, Wray AA, Moin P. Eddies, streams, and convergence zones in turbulent flows, Center for Turbulence Research, Annual Research Briefs, pp. 193-202, 1988
- [13] Vad J, Koscsó G, Gutermuth M, Kasza, Zs., Tabi T., Csorgo T. Study of the aero-acoustic and aerodynamic effects of soft coating upon airfoil. JSME International Journal Series C-Mechanical Systems Machine Elements and Manufacturing, vol 49(3), pp. 648-656, 2006
- [14] Régert T, Nagy L, Balczó M, Molnár B. RANS Simulation of RAF6 Airfoil Investigation of the characteristics of the boundary layer over an airfoil. Proceedings of Conference on Modelling Fluid Flow (CMFF'06). Budapest, Budapest: pp. 1139-1146. 2006
- [15] Schosser C, Régert T. Study on wind tunnel effects onto the flow past an airfoil section by means of flow visualization. MicroCAD 2009 conference. Miskolc, 2009