

# SZIMULÁCIÓS MODELL KIALAKÍTÁSA SZABAD ÁRAMLÁSBA HELYEZETT SZÁRNYPROFILOK VIZSGALATAHOZ

## DEVELOPMENT OF A SIMULATION MODEL FOR THE INVESTIGATION OF AIRFOIL PROFILES PLACED IN FREE FLOW

Tollár Sándor\*

### ABSTRACT

*The aim of this article is to define the CFD simulation setup parameters for airfoil simulation in the free flow. We intend to use this model in further research to investigate the effects of different ice layers on airfoils. The NACA series 4412 airfoil was investigated at  $Re = 10^6$ . We have defined the domain, the mesh considering the boundary layer and the convergence criteria. Our results were compared with published computational data.*

### 1. BEVEZETÉS

A szélturbinák szélsőséges üzemi körülmények között működnek. A jegesedési körülmények drasztikusan meg tudják változtatni a turbinák alapvető működési paramétereit. Amennyiben a lapátok felületén jég képződik, az lerontja a turbinalapátok aerodinamikai jellemzőit. A megváltozott jeges kontúr körül kialakult áramlás kisebb felhajtóerőt termel, az ellenállása viszont nagyobb lesz. A gyakorlati tapasztalatok azt mutatják, hogy az erős jegesedés a turbina teljes leállítását eredményezheti és hogy a jég jóval tovább maradhat a lapátokon, mint a jegesedési állapotok kialakulása. Ennek következtében a zord helyszíneken az éves teljesítményvesztés akár 20-50%-ra is nőhet [1-5]. Kutatásunk témája a lapátprofilok jegesedésre való érzékenységének vizsgálata. Első lépésként a jegesedés nélküli profil vizsgálatával foglalkoztunk.

### 2. A SZÁRNYPROFILOK SZIMULÁCIÓS MODELLJÉNEK FŐBB PARAMÉTEREI

A vizsgálatokhoz az ANSYS Fluent 19R3 szoftver akadémiai verzióját használtuk. A vizsgálatot 2-D modell-vizsgálat formájában végeztük. A Reynolds-szám értéke  $Re = 10^6$ , a referencia megfűvési szög  $10^\circ$  volt. A geometria rögzítése után meghatározásra kerül a vizsgálati tartomány. Kialakítjuk a feladat jellegének leginkább megfelelő hibrid hálót: a profil közelében strukturált hálót használunk, a tartomány további

részében strukturálatlan hálót alkalmazunk. Ezt követően meghatározzuk a peremfeltételeket, majd kiválasztásra kerül a turbulencia modell, amihez az irodalmi ajánlásokat vesszük alapul, saját szimulációkat végzünk, melyek eredményeit a publikált számítási adatokkal összevetjük.

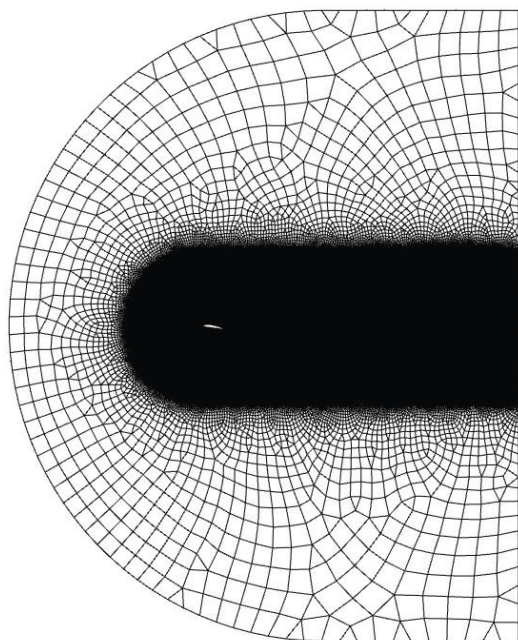
#### 2.1. A vizsgált geometria

Kiválasztottuk a NACA4412-es profilt  $L = 1$  m húrhosszal. Választásunk azért erre a profilra esett, mert az általunk kiindulásként használt Kollár és Mishra [6] féle jegesedési vizsgálatnak is ez a profil volt a tárgya.

#### 2.2. Hálókészítés

A feladat megoldásához először meg kell határozunk azt a 2-D tartományt- domain -, ahol a számításokat el kívánjuk végezni. A szakirodalmi ajánlások alapján egy „D” alakú tartományt alakítottunk ki a vizsgálandó profil körül, melynek geometriai méretei a húrhosszhoz viszonyítva lettek meghatározva [7, 8]. A tartomány köríves belépő élének sugara  $12,5L$ , a tartomány hossza a félkör tartomány után szintén  $12,5L$ . A profil a körív origójában van pozícionálva. A tartomány köríves határa a vele tangenciális párhuzamos határoló egyenesekkel alkotja a belépő felületet, az inlet-et. A tartomány hátsó függőleges lezáró egyenese pedig a kilépő felületet, az outlet-et. A tartományon belül kialakítottunk egy közel-környezetet is, amelynek alakja szintén  $D$ , sugara  $5L$ , hossza pedig a tartomány hosszával megegyező  $12,5L$ . Ez a résztartomány tehát a kilépő felületig tart. A vizsgálati tartomány hálókialakítása az 1. ábrán látható. A vizsgálandó esetekben a Reynolds-szám értéke  $10^6$ , így számolnunk kell a turbulencia kialakulásával. A turbulencia a határrétegben alakul ki, a mi esetünkben a szabad áramlásba helyezett profil felülete mentén. Mivel a profil körül kialakuló nyomáseloszlás és az ebből származó felhajtóerő, valamint ellenálláserő számunkra értékes adat, a lehető legjobban kell számítanunk a határrétegben kialakuló nyomásértékeket.

\* mesteroktató, Miskolci Egyetem, Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet, Áramlás és Hőtechnikai Gépek Intézeti Tanszék



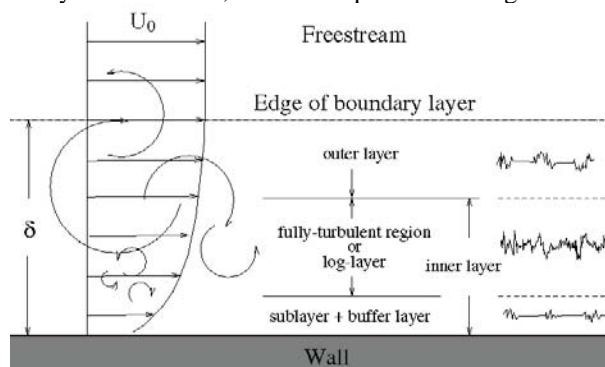
1. ábra: A vizsgálati tartomány

A számítási kapacitások optimális kihasználása is fontos a kutatás szempontjából, mivel a jövőben számos jeles profil vizsgálatát tervezünk különböző körülmények és megfűvási szögek mellett. Ezért keressük a szóba jöhető megoldások közül a leghatékonyabb módszert. A számítások műveletszáma nagymértékben függ a háló méretétől. Az eredmények pontossága pedig a háló minőségével áll szoros összefüggésben. Elkerülhetetlen a profil felülete mentén a háló szerkezetének finomítása. A határreteg vizsgálatához többretegű prizmatikus elemekből felépített háló szükséges. A rétegek száma és azok vastagsága csak komoly megfontolás után adható meg, mivel az függ a határreteg vastagságától, annak szerkezetétől, és a határretegben kialakuló viszonyokat modellező módszertől is.

### 2.2.1. A határreteg kezelése a szimulációban

A határreteg alapvetően két részre bontható, a belső határretegére, illetve a külső határretegére [9, 10]. A belső határreteg tovább osztható a falhoz közvetlenül kapcsolódó viszkózus rétegre (viscous sublayer), és a külső határreteg felől található turbulens határretegére (log-layer) illetve a két réteget összekapcsoló rétegre (buffer layer). Ez a felbontás figyelhető meg a 2. ábrán. Az áramlásba helyezett profil esetében a határretegben azt tapasztalhatjuk, hogy a fal közvetlen közelében a viszkózus rétegben az áramlás lamináris, majd átlépve a buffer rétegbe megjelenik a turbulens áramlás. A belső réteg további tartományában teljesen turbulens áramlást tapasztalhatunk, majd a külső rétegben a turbulencia

mértéke csökken. A határreteg vastagsága azonban függ a Reynolds-számtól, valamint a profil állásszögétől.



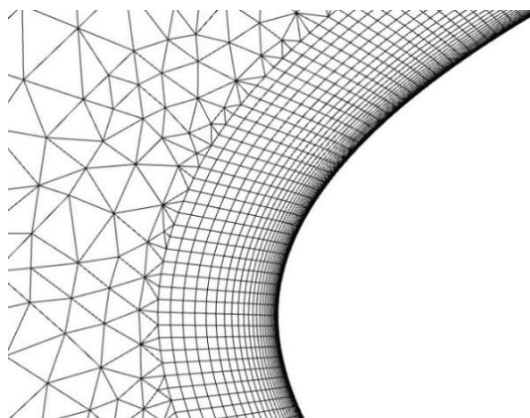
1. ábra: A határreteg felbontása [10]

A határretegben a faltól mért távolság és a sebesség között a falhoz közel lineáris kapcsolat van, a faltól távolabb pedig logaritmusos. A két jelleg elvi határa a szakirodalomban használt  $y^+$  dimenzió nélküli faltávolsággal megadva az  $y^+ = 11,067$  értéknél lenne, ami a „buffer layer” tartományba esik. A viszkózus réteg ugyanis megközelítőleg az  $y^+ = 5$  távolságig tart, míg  $y^+ = 25$  fölött már a logaritmusos faltörvény érvényesül. A belső réteg határa  $y^+ = 200$  körül található. A gyakorlatban két alapvető megoldás terjedt el a határreteg kezelésére: a fal funkciók használata és a viszkózus réteg megoldása.

#### 2.2.1.1. Fal funkciók használata

A 2. ábrán látható határreteg profilt használja ez a módszer. A fal melletti cellákra érvényes értékek, mint például a nyírófeszültség meghatározásához a cella középpontjának a „log-layer” tartományba kell esnie. Ahhoz, hogy ez teljesüljön az első csomópontot  $y^+ = 30$  és 300 között kell felvennünk (a cella középpontja így  $y^+ = 15$  és 150 között lesz, ami az ábrán is láthatóan biztosan a „log-layer” tartományba esik). A mi esetünkben ez a módszer nem adna elegendően pontos megoldást, bár sokkal kevesebb cellaszámot kívánna.

#### 2.2.1.2. A viszkózus réteg megoldása



2. ábra: Hálóstruktúra a profil közelében

Ahhoz, hogy a háló képes legyen a gradiensek megfelelő kezelésére, az első rácsméretnek  $y^+ = 1$ -nek kell lennie és a rács növekedési faktora nem lehet nagyobb 1,2-nél. Ez a módszer sokkal több cellaszámot követel, így a számítási idő is jelentősen megnövekedik. A mi esetünkben azonban ez a módszer a javasolt falon ébredő erők kiszámítására. Kutatásunk célja a jegesedett profilok vizsgálata, ezért a viszkózus réteg megoldást fogjuk alkalmazni. Az ezzel a módszerrel kialakított profil közeli prizmatikus háló a 3. ábrán látható.

### 2.3. Peremfeltételek és a szimuláció beállításai

A szárnyprofil kontúrján a sebesség értékeire Dirichlet típusú peremfeltételt írtunk elő, a nyomásra pedig Neumann típusú peremfeltételt adtunk meg. Az áramlás belépési felületét sebesség bemenetnek definiáltuk, a kilépő felületet pedig nyomáskimenetnek. Az áramló közeg levegő. Nyomás alapú megoldósémát alkalmaztunk, mivel az áramlás Mach száma 0,3 alatti. Valamennyi transzport-változó csillapítási faktorát 0,8 értékre állítottuk. A megoldás inicializálása a belépő felületről kezdve került kiszámításra. Az egyenletek megoldására  $10^{-5}$  konvergencia kritériumot írtunk elő, melynek valamennyi maradványértékre teljesülnie kell.

## 3. A TURBULENCIA MODELL KIVÁLASZTÁSA

A szabad áramlásba helyezett profil körül kialakuló áramlás modellezésére magas Reynolds-szám mellett is különböző turbulencia modellt javasol a szakirodalom. Valamennyi modell rendelkezik bizonyos előnyökkel a többivel szemben a számítási kapacitás, a futásidő, az eredmények pontossága alapján. Az általunk vizsgált turbulencia modelleket röviden ismertetjük.

### 3.1. A RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes Simulation) ismertetése

A RANS szélese körben alkalmazott megközelítés az ipari áramlások modellezésére, amely alkalmas a turbulens mozgás megjelenítésére. Az időátlagolt áramlás és turbulenciaszint elegendő információt szolgáltat a számunkra fontos felhajtóerő- és ellenállástényezők kiszámításához [11]. A RANS módszeren belül több különböző modell is elérhető az ANSYS Fluentben.

#### 3.1.1. A Spalart-Allmaras modell

A Spalart-Allmaras modell egy-egyenletes modell, amit elsősorban repülőgépek alkalmazásához terveztek, hatékonyan modellezi az áramlást a szárnyprofil körül. A Spalart-Allmaras módosított kontinuitási egyenlet a turbulens viszkozitásra van felírva, ami azonban nem

érvényes a falhoz közeli zónára. Megjegyzendő, hogy ebben a modellben a turbulens kinetikus energiát nem számítják ki, ezért a transzportegyenlet utolsó tagját figyelmen kívül hagyják [11, 12].

#### 3.1.2. A $k-\epsilon$ modell

A két-egyenletes  $k-\epsilon$  modell a turbulens kinetikus energiát ( $k$ ), illetve az örvény disszipációt ( $\epsilon$ ) számolja. A módszer a faltól távolabbi helyeken hatékony és pontos. A fal közelében nem ad jó eredményt, ezért valamilyen technikával ki kell egészíteni a módszert a fal közeli állapotok számításához. Ilyen technika lehet például a falfüggvények alkalmazása. A turbulens viszkozitás a  $k$  és az  $\epsilon$  ismeretében számítható [11].

#### 3.1.3. A $k-\omega$ modell

A szintén két-egyenletes  $k-\omega$  modell a turbulens kinetikus energia ( $k$ ) mellett a specifikus szóródási rátát ( $\omega$ ) állítja elő. Ez a módszer a fal közelében jó értékeket ad, azonban a faltól távolabbi terek feltérképezésére nem elég hatékony. A turbulens viszkozitás a  $k$  és az  $\omega$  ismeretében számítható [11, 12].

#### 3.1.4. Az SST $k-\omega$ módszer

Az SST  $k-\omega$  (shear-stress transport - nyírófeszültség átvitel) módszer hatékony kombinációja a standard  $k-\omega$  modell robusztusságának és pontosságának a fal közeli régióban és a  $k-\epsilon$  modell faltól távolabbi független szabad áramlási szimulációjának. Lényege, hogy a turbulens viszkozitás meghatározását úgy módosítja, hogy a turbulens nyírófeszültség transzportját is figyelembe veszi [11].

1. táblázat A vizsgált turbulencia modellek

		Turbulencia modell
1.	időben állandó (Steady)	<i>Spalart-Allmaras</i>
2.	időben állandó (Steady)	<i>Standard <math>k-\omega</math></i>
3.	időben változó (Transient)	<i>Spalart-Allmaras</i>
4.	időben változó (Transient)	<i>Realizable <math>k-\epsilon</math></i>
5.	időben változó (Transient)	<i>Standard <math>k-\omega</math></i>
6.	időben változó (Transient)	<i>SST <math>k-\omega</math></i>

Vizsgálataink során hat különböző modellt alkalmaztunk a profil körüli nyomáseloszlás és az együtthatók megállapítására. A tesztelt modellek az 1. táblázatban láthatók. Két időben állandó beállítást is teszteltünk.

#### 4. A SZIMULÁCIÓK ÖSSZEHOSONLÍTÁSA

Vizsgálatunk tárgya a NACA4412 jelű szárnyprofil 1 m húrhosszal [13]. A szimulációs vizsgálatokat 2-D szimulációként végeztük, a Reynolds-szám értéke  $Re = 10^6$ , a megfúvási szög  $\alpha = 10^\circ$  volt. A referenciaként a NACA4412 szárnyprofilnak a nyilvános Airfoil Tools portál XFOIL program segítségével készült szimulációs eredményei szolgáltak [13, 14]. Az adatok közt megtalálható az  $Re = 10^6$  értékhez tartozó felhajtóerő tényező és ellenállástényező. A tranziens szimulációkhoz  $5 \cdot 10^{-3}$  s időlépést állítottunk be, 20.000 lépéssel. A steady szimulációkat pedig 5000 iterációig futtattuk. A tranziens szimulációknál a reziduálok értékét  $10^{-5}$ -re állítottuk. A szimulációs vizsgálatokat sorra elvégeztük, az eredményeket a referencia adatokkal együtt a 2. táblázatban összesítettük.

2. táblázat Az eredmények összehasonlítása

Reynolds-szám: $10^6$			
megfúvás szöge: $10^\circ$			
	turbulencia modell	$C_d$	$C_l$
időben állandó	Spalart- Allmaras	0,0364	1,212
	$k-\omega$ Standard	0,0396	1,171
időben változó	$k-\epsilon$ realizable	0,0343	1,160
	<b>Spalart - Allmaras</b>	<b>0,0327</b>	<b>1,230</b>
	<b><math>k-\omega</math> Standard</b>	<b>0,0305</b>	<b>1,369</b>
	<b><math>k-\omega</math> SST</b>	<b>0,0368</b>	<b>1,179</b>
	XFOIL (ref.) [14]	0,0175	1,432

A szárnyprofil körül kialakult sebességeloszlás nagyon hasonló képet mutat minden általunk vizsgált módszer esetén.

#### 5. ÖSSZEFOGLALÁS

Tapasztalataink alapján valamennyi beállítás konvergált  $C_l$  és  $C_d$  értékekhez és értékelhető eredményre vezetett. A további vizsgálatainkhoz a referencia értékekhez leginkább közel eső 3 modellt választottuk, melyek a tranziens modellek közül a Spalart-Allmaras, a  $k-\omega$  standard és a  $k-\omega$  SST módszer. További vizsgálatainkat  $Re = 3 \cdot 10^6$  mellett végezzük és mérési adatokkal is összevetjük azokat, hogy a későbbi jegesedés vizsgálatokhoz kiválasszuk a turbulencia modellt.

#### 6. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A bemutatott kutató munka a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt részeként az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

#### 7. IRODALOM

- [1] L. Battisti, R. Fedrizzi, A. Brighenti, T. Laakso: **Sea ice and icing risk for offshore wind turbines**, Owemes 2006, 20-22 April. Citavecchia, Italy
- [2] Laakso, T., Holttinen, H., Ronsten, G., Horbaty, R., Lacroix, A., Peltola, E., Tammelin, B.: **State-of-the-art of wind energy in cold climates**, <http://arcticwind.vtt.fi>, 2003.
- [3] Tammelin, B., Cavaliere, M., Holttinen, H., Morgan, C., Seifert, H.: **Wind Energy in Cold Climate**, Final Report WECO (JOR3-CT95-0014) ISBN 951-679-518-6, Finnish Meteorological Institute, Helsinki, Finland, 2000.
- [4] Bose, N., Rong, J. Q.: **Power reduction from ice accretion on a horizontal axis wind turbine**, Proc.12th British Wind Energy Association, Wind Energy Conference Norwich, UK, 1990.
- [5] Maissan, J. F.: **Wind Power Development in Sub-Arctic Conditions with Severe Rime Icing**, TSYE Corporation - Circumpolar Climate Change Summit and Exposition, 2001.
- [6] L. E. Kollar, R. Mishra: **Inverse design of wind turbine blade sections for operation under icing conditions**, Energy Conversion and Management (2019) DOI:10.1016/j.enconman.2018.11.015
- [7] A. Meana-Fernández, J. M. F. Oro, K. M. A. Díaz, S. Velarde-Suárez: **Turbulence-Model Comparison for Aerodynamic-Performance Prediction of a Typical Vertical-Axis Wind-Turbine**, Airfoil, Energies (ISSN 1996-1073) (2019) DOI:10.3390/en12030488
- [8] S. Jain, N. Sitaram, S. Krishnaswamy: **Effect of Reynolds Number on Aerodynamics of Airfoil with Gurney Flap**, International Journal of Rotating Machinery, (2015) DOI: 10.1155/6149
- [9] J. Nikuradse: **Laws of Flow in Rough Pipes**, NACA, Washington (1950)
- [10] **Introduction to ANSYS Fluent - Turbulence Modeling**, ANSYS, Canonsburg, Pa, USA, (2014)
- [11] **ANSYS FLUENT Theory Guide**, ANSYS, Canonsburg, Pa, USA, (2014)
- [12] Spalart P. R. and Allmaras S. R., **A one-equation turbulence model for aerodynamic flows**, AIAA, vol. 092, no. 0439, (1992) DOI:10.2514/6.1992-439
- [13] Airfoil Tools - **NACA 4412 Xfoil prediction polar at RE=1,000,000**, <http://airfoiltools.com/polar/details?polar=xf-naca4412-il-1000000>
- [14] M. Drela, **XFOIL: An Analysis and Design System for Low Reynolds Number Airfoils**, Conference on Low Reynolds Number Aerodynamics, University of Notre Dame (1989) DOI:10.1007/978-3-642-84010-4\_1