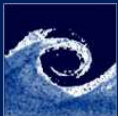


Légköri áramlások numerikus szimulációja általános célú áramlástan megoldók segítségével

Balogh Miklós

2012. február 24.



Áramlástan megoldók - mérnöki alkalmazásokra

Légköri CFD
szimulációk

Balogh
Miklós

Áramlástan
megoldók

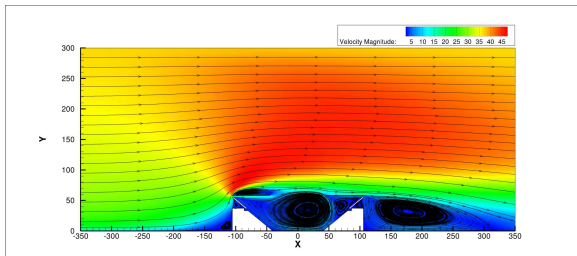
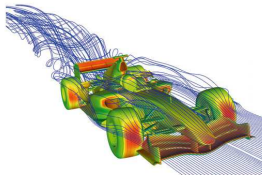
Motiváció

Módszertan

Eredmények

Konklúzió

Kérdések





Áramlástanai megoldók - numerikus módszerek

Légköri CFD
szimulációk

Balogh
Miklós

Áramlástanai
megoldók

Motiváció

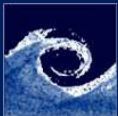
Módszertan

Eredmények

Konklúzió

Kérdések

- Térbeli diszkretizáció
 - Véges térfogat módszer - Finite Volume Method (FVM)
 - Véges elem módszer - Finite Element Method (FEM)
 - Véges differencia módszer - Finite Difference Method (FDM)
 - Spektrális módszerek (DNS: periodikus tartományokon)
 - Rács gáz és rács-Boltzmann módszerek
- Időbeli diszkretizáció (időfüggő áramlásoknál)
 - Explicit és implicit sémák, stabilitási kritériumok
 - Lokális időlépés alkalmazása, adaptív időlépés kontroll
- Nyomás - Sebesség kapcsolat
 - Nyomás korrekció - szekvenciális (pl. SIMPLE, PISO)
 - Teljes kapcsolat - egyenletek szimultán megoldása



Véges térfogat módszer (FVM)

Légköri CFD
szimulációk

Balogh
Miklós

Áramlástan
megoldók

Motiváció

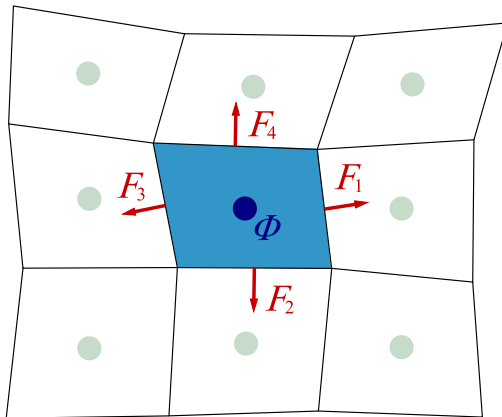
Módszertan

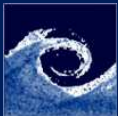
Eredmények

Konklúzió

Kérdések

- Tetszőleges alakú és méretű cellák (térfogatok)
- Konzervativitás a cella-térfogatokon





Véges térfogat módszer (FVM)

Légköri CFD
szimulációk

Balogh
Miklós

Áramlástan
megoldók

Motiváció

Módszertan

Eredmények

Konklúzió

Kérdések

- A konzervativitás általános egyenlete:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \phi dV + \oint_A F d\vec{A} = \int_V S_V dV + \oint_A S_A d\vec{A}$$

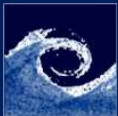
- Ahol ϕ és F rendre

- A megmaradó mennyiség egységnyi tömegre:

$$\phi = U/\rho$$

- A konvektív és konduktív fluxusok összege:

$$F = F_{konv.} + F_{kond.} = \rho \phi \vec{v} - \rho \nabla \phi$$



Turbulencia modellek

Légköri CFD
szimulációk

Balogh
Miklós

Áramlástan
megoldók

Motiváció

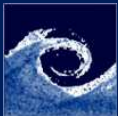
Módszertan

Eredmények

Konklúzió

Kérdések

- Algebrai modellek: lokális sebesség + hosszlépték
- Reynolds átlagolt modellek (RANS):
 - Spalart-Allmaras: 1 egyenlet (szárnyak)
 - $k - \epsilon$ modell: 2 egyenlet (izotróp turbulencia)
 - $k - \omega$ modell: 2 egyenlet (viszkózus alapréteg, tranzíció)
 - RSM modell: 7 egyenlet (anizotróp turbulencia, szekunder áramlás)
- Turbulens mozgás felbontására épülő modellek:
 - DNS: Teljesen felbontott turbulencia (Kolmogorov mikroskála)
 - LES: Nagy örvények felbontása + subgrid-scale stress modellek
 - DES: Fal közelében RANS + távolságban LES (SAS)



CFD analízis tipikus lépései

Légköri CFD szimulációk

Balogh
Miklós

Áramlástan
megoldók

Motiváció

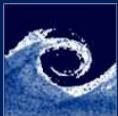
Módszertan

Eredmények

Konklúzió

Kérdések

- Geometriai modell előállítás (modell-tartomány)
- Cellahálózat létrehozása (Háló)
 - Térbeli diszkretizáció alapja
 - Teljes tartomány cellákra bontása
- Peremfeltételek megadása
- Kezdeti feltételek megadása
 - Konstans - előre megadott értékekkel
 - Hibrid - peremfeltételek interpolációja (Laplace egyenlet)
 - Patch - Cellánként előírt változók (leskálázott vagy elméleti)
- Számítás (egyenletek integrálása)
- Utófeldolgozás



Geometria és a háló légköri szimulációkhoz

Légköri CFD
szimulációk

Balogh
Miklós

Áramlástan
megoldók

Motiváció

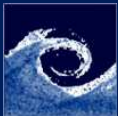
Módszertan

Eredmények

Konklúzió

Kérdések

- Domborzati adatbázis (STRM - USGS)
- WGS84 koordináták leképezése ($\varphi, \lambda, h \rightarrow x, y, z$)
 - EOVI, UTM, Lambert, Stereografikus leképezés
- Parametrikus felület felbontása: felületi háló
 - NURBS vagy bi-cubic Spline felület
 - Háromszög vagy négyszög elemek
 - Strukturált illetve tetszőleges sűrítés
- Teljes tartomány felbontása: térfogati háló
 - A felületi háló kihúzásával
 - Felszín közelében alacsony cellák (0.1-1 m)
 - Fokozatosan növekvő magasságú cellák a faltól távolodva



Geometria és a háló légköri szimulációkhoz

Légköri CFD szimulációk

Balogh
Miklós

Áramlástan
megoldók

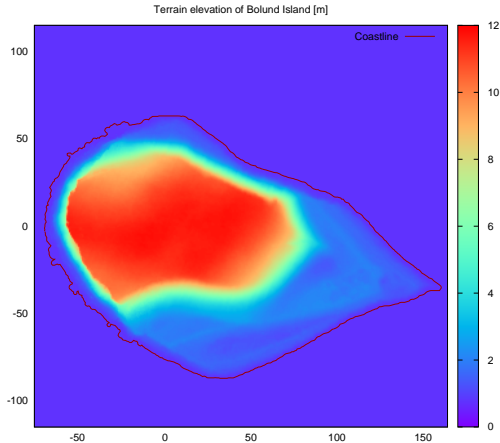
Motiváció

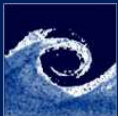
Módszertan

Eredmények

Konklúzió

Kérdések





Geometria és a háló léggöri szimulációkhoz

Léggöri CFD szimulációk

Balogh
Miklós

Áramlástan
megoldók

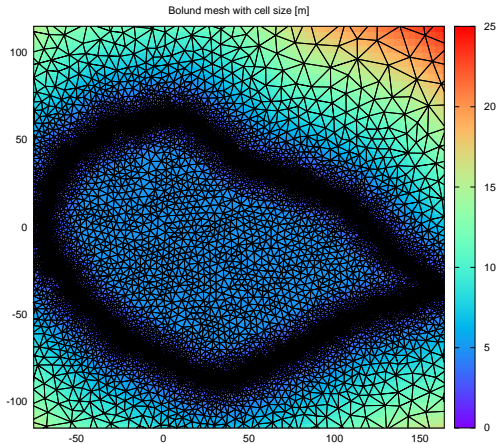
Motiváció

Módszertan

Eredmények

Konklúzió

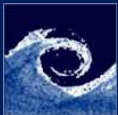
Kérdések



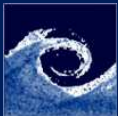


A neutrális atmoszférikus határréteg (ABL) szimulációja

- Széleskörű felhasználás
 - Szélenergia hasznosítás - szélfarm optimalizáció
 - Várostervezés - átszellőzés
- Létjogosultság
 - Megújuló energia
 - Környezetvédelem
- RANS (STD $k - \epsilon$ modell) alkalmazásával
 - Robosztus modell
 - Reális eredmények, alacsony erőforrásigény



- OpenFOAM (Open Field Operation and Manipulation)
 - Nyílt forráskódú, általános célú CFD megoldó
 - Véges térfogat módszer (FVM)
 - C++ könyvtár - szerszámoszláda (KDE, PDE)
 - Módosítható, fejleszthető
- ANSYS-Fluent
 - Kereskedelmi, általános célú CFD megoldó
 - Véges térfogat módszer (FVM)
 - Módosítása nehézkes, de lehetséges (UDF - ANSI C)



Célok

Légköri CFD
szimulációk

Balogh
Miklós

Áramlástan
megoldók

Motiváció

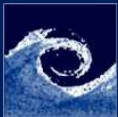
Módszertan

Eredmények

Konklúzió

Kérdések

- Fejlesztés
 - STD $k - \epsilon$ modell adaptálása légköri áramlásokra
 - Realisztikus belépő peremfeltételek (neutrális)
 - Belépő és fali peremfeltételek összhangba hozása
- Verifikáció homogén, sík felszín felett
 - Érdes határréteg laboratóriumi skálán (2D)
 - Érdes határréteg tipikus légköri alkalmazásokhoz (2D)
- Validáció
 - Szinuszoszoidális 3D hegy (szélcsatorna mérés)
 - Komplex domborzat (Askervein hegy, valós méret)



Általános célú megoldók problémái

Légköri CFD
szimulációk

Balogh
Miklós

Áramlástan
megoldók

Motiváció

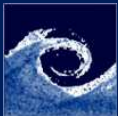
Módszertan

Eredmények

Konklúzió

Kérdések

- Inkompatibilis belépő és fali peremfeltételek
 - Érdes felületek feletti sebesség és turbulencia profilok (z_0)
 - Érdes faltörvények (k_s)
 - Horizontális inhomogenitás (U , k , ϵ)
- Cél: kompatibilis peremfeltételek
 - Fizikailag helyes belépő profilok (U , k , ϵ)
 - Megfelelő falfüggvények
 - Konzisztens formalizmus



Inhomogenitás

Légköri CFD szimulációk

Balogh
Miklós

Áramlástan
megoldók

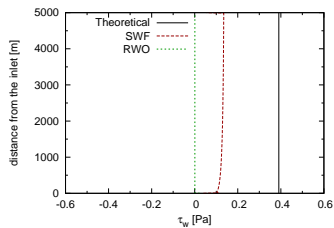
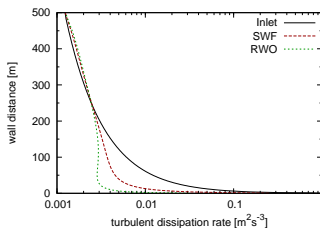
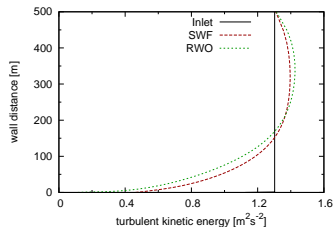
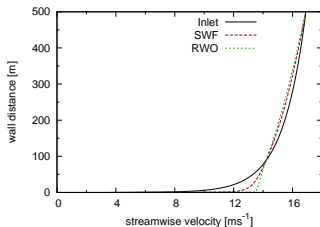
Motiváció

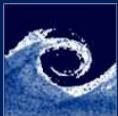
Módszertan

Eredmények

Konklúzió

Kérdések





Belépő peremfeltételek

Légköri CFD
szimulációk

Balogh
Miklós

Áramlástan
megoldók

Motiváció

Módszertan

Eredmények

Konklúzió

Kérdések

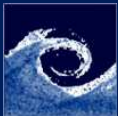
- Konzisztencia az 1D STD $k - \epsilon$ modellel (neutrális, homogén)

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right) + P_k - \epsilon + S_k = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial z} \right) + C_{\epsilon 1} P_k \frac{\epsilon}{k} - C_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon = 0$$

- Örvényviszkozitás és k produkció

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}, \quad P_k = \nu_t \left(\frac{\partial U}{\partial z} \right)^2$$



Belépő peremfeltételek

Légköri CFD
szimulációk

Balogh
Miklós

Áramlástan
megoldók

Motiváció

Módszertan

Eredmények

Konklúzió

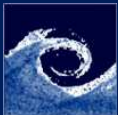
Kérdések

- Általánosan alkalmazott - Richards & Hoxey (1993)
 - Kielégíti a STD $k - \epsilon$ modellt (módosított σ_ϵ -al)

$$U = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{z + z_0}{z_0} \right), \quad k = \frac{u_\tau^2}{\sqrt{C_\mu}}, \quad \epsilon = \frac{u_\tau^3}{\kappa (z + z_0)}$$

- Fizikailag realiztikus k profil - Yang et al. (2007)

$$k = \sqrt{A \ln(z + z_0) + B}$$



Továbbfejlesztett peremfeltételek

Légköri CFD
szimulációk

Balogh
Miklós

Áramlástan
megoldók

Motiváció

Módszertan

Eredmények

Konklúzió

Kérdések

- Yang et al. peremfeltétel általánosítása
 - A formalizmus változó C_μ -t eredményez
 - Ez kifejezhető a mezőváltozókkal
 - Forrástag szükséges a k transzport-egyenletbe $\rightarrow S_k$
 - Az módosított σ_ϵ is magasságfüggő $\rightarrow S_\epsilon$
- Továbbfejlesztett formula (Parente and Benocci, 2010)
 - Matematikai szempontból helyesebb
 - Megmutatható, hogy $S_k = 0$

$$k = A \ln(z + z_0) + B$$



Fali peremfeltételek

Léggöri CFD
szimulációk

Balogh
Miklós

Áramlástan
megoldók

Motiváció

Módszertan

Eredmények

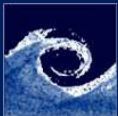
Konklúzió

Kérdések

- Általános célú megoldókban problematikus
 - A standard falfüggvény nem használható (érdes a felület)
 - Belépés \leftrightarrow érdes falfüggvény ($z_0 \leftrightarrow k_s$)
- Lehetséges megoldások
 - Richard & Hoxey (1993): $k_s = \frac{Ez_0}{C_s}$
 - Játék a paraméterekkel (k_s, C_s):

$$U_p = \frac{u_\tau}{\kappa} \ln \left(\frac{Ez_p^+}{1 + C_s k_s^+} \right) = \frac{u_\tau}{\kappa} \ln \left(\frac{z_p + z_0}{z_0} \right)$$

$$k_s^+ = 0.95z_p^+, 1 \ll C_s k_s^+ \rightarrow C_s \approx \frac{Ez_0}{0.95(z_p + z_0)}$$



STD falfüggvény általánosítása

Légköri CFD
szimulációk

Balogh
Miklós

Áramlástan
megoldók

Motiváció

Módszertan

Eredmények

Konklúzió

Kérdések

- Fizikai érdelességen alapuló (z_0) konzisztens formalizmus
 - Profil együttható módosítása

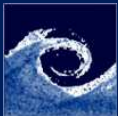
$$E' = \frac{\nu}{z_0 u_\tau}$$

- Dimenziótlan faltávolság eltolása z_0 -al

$$z^{+'} = \frac{(z_p + z_0) u_\tau}{\nu}$$

- Teljes konzisztencia

$$E' z^{+'} = \frac{z_p + z_0}{z_0}$$



A STD $k - \epsilon$ modell - komplex domborzatra

Légköri CFD
szimulációk

Balogh
Miklós

Áramlástan
megoldók

Motiváció

Módszertan

Eredmények

Konklúzió

Kérdések

- Kato & Launder modifikáció

$$P_{k,STD} = \nu_t S^2 \rightarrow P_{k,KL} = \nu_t S \Omega$$

- Yap korrekció

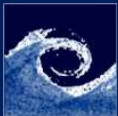
$$S_{\epsilon,Yap} = 0.83 \frac{\epsilon^2}{k} \left(\frac{k^{1.5}}{\epsilon C_\mu^{-0.75} \kappa z} - 1 \right) \left(\frac{k^{1.5}}{\epsilon C_\mu^{-0.75} \kappa z} \right)^2$$

- MMK (Murakami-Mochida-Kondo) modell

$$\nu_t = f_w C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}, \quad f_w = \min \left(\frac{\Omega}{S}, 1 \right)$$

- Homogén \rightarrow inhomogén blending (C_μ, S_ϵ)

$$C_{\mu,blend} = C_{\mu,std} - (C_{\mu,gen} - C_{\mu,std}) (1 - U_{err})^n$$



Verifikáció

Légköri CFD
szimulációk

Balogh
Miklós

Áramlástan
megoldók

Motiváció

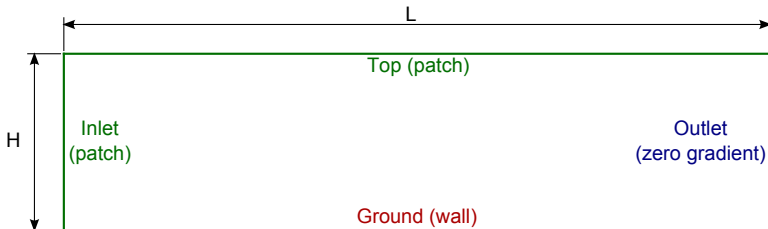
Módszertan

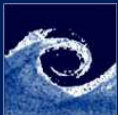
Eredmények

Konklúzió

Kérdések

- Laboratóriumi-skálájú 2D tartomány (Gorlé et al., 2009)
 - méretek: $L = 4m$, $H = 1m$
 - felbontás: 400x71
- Valós méretű 2D tartomány (Hargreaves and Wright, 2006)
 - méretek: $L = 5000m$, $H = 500m$
 - felbontás: 500x50





Verifikációs eredmények I.

Légköri CFD szimulációk

Balogh
Miklós

Áramlástan
megoldók

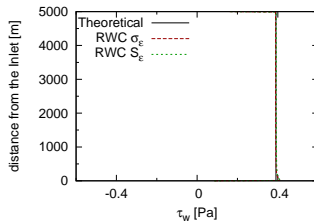
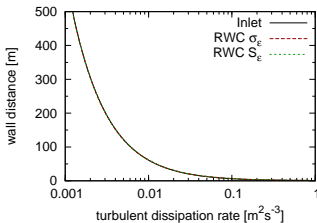
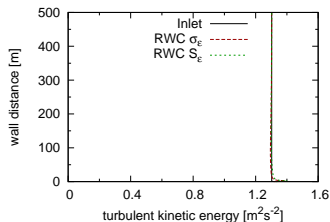
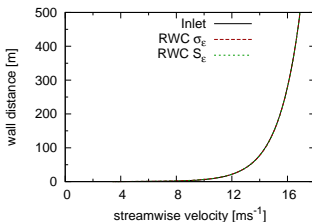
Motiváció

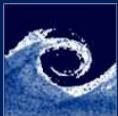
Módszer

Eredmények

Konklúzió

Kérdések





Verifikációs eredmények II.

Légköri CFD szimulációk

Balogh
Miklós

Áramlástan
megoldók

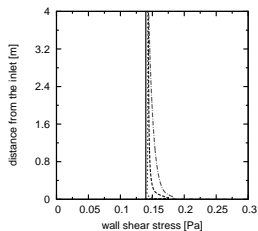
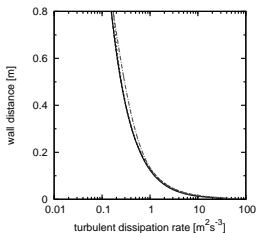
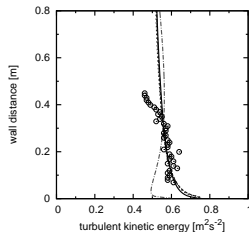
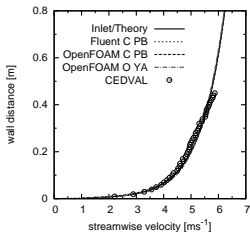
Motiváció

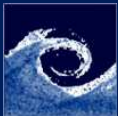
Módszertan

Eredmények

Konklúzió

Kérdések





Validáció 3D heggyel

Léggöri CFD
szimulációk

Balogh
Miklós

Áramlástan
megoldók

Motiváció

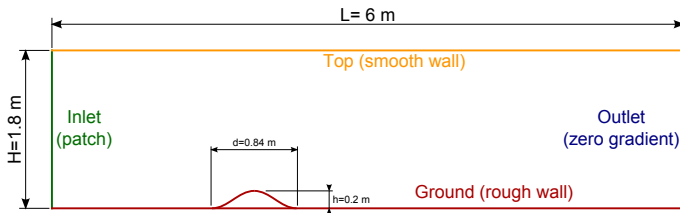
Módszer

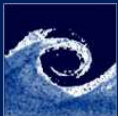
Eredmények

Konklúzió

Kérdések

- Tokyo University (Takahashi et al., 2005)
 - Finom háló: $200 \times 87 \times 60$ cella
 - Közepes háló: $133 \times 58 \times 40$ cella
 - Durva háló: $89 \times 39 \times 27$ cella
- Tartomány vázlata





Validáció 3D heggyel

Légköri CFD szimulációk

Balogh
Miklós

Áramlástan
megoldók

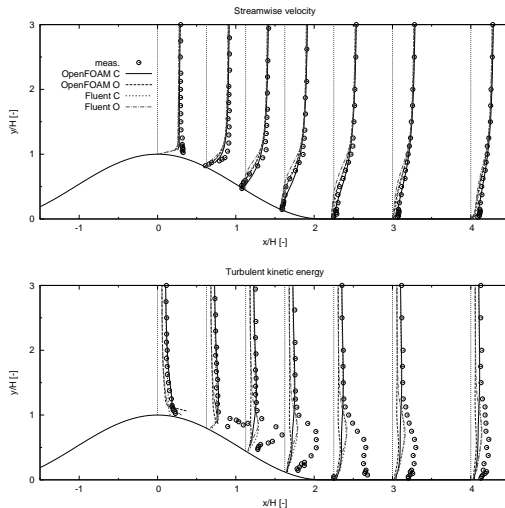
Motiváció

Módszertan

Eredmények

Konklúzió

Kérdések





Validáció 3D heggyel

Légköri CFD
szimulációk

Balogh
Miklós

Áramlástan
megoldók

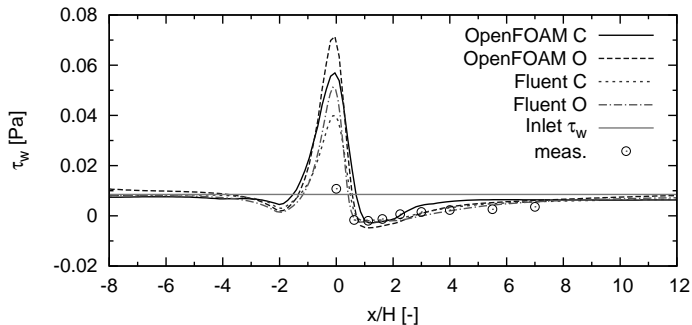
Motiváció

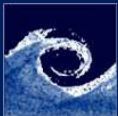
Módszertan

Eredmények

Konklúzió

Kérdések





Validáció az Askervein heggyel (TU03-B mérés)

Légköri CFD
szimulációk

Balogh
Miklós

Áramlástan
megoldók

Motiváció

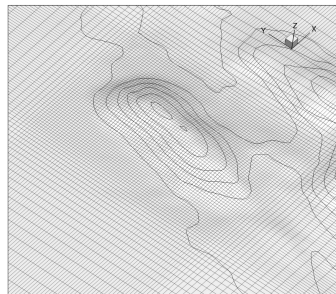
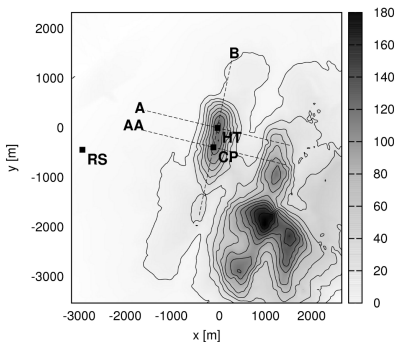
Módszertan

Eredmények

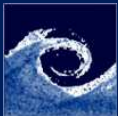
Konklúzió

Kérdések

Mesh	$n_i \times n_j \times n_k$	Δx_{min} and Δy_{min}	Δz_{min}
Coarse	$151 \times 184 \times 35$	15m	0.8m



Mesh refinement at the hill



Validáció az Askervein heggyel

Légköri CFD
szimulációk

Balogh
Miklós

Áramlástan
megoldók

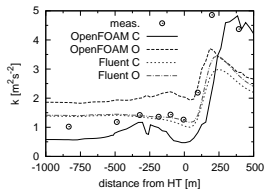
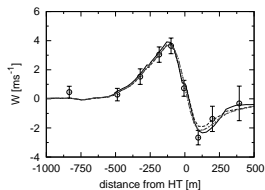
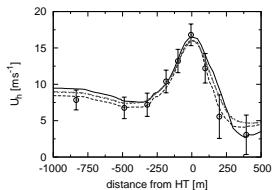
Motiváció

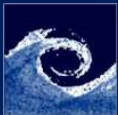
Módszertan

Eredmények

Konklúzió

Kérdések





Összefoglalás

Légköri CFD
szimulációk

Balogh
Miklós

Áramlástan
megoldók

Motiváció

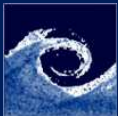
Módszertan

Eredmények

Konklúzió

Kérdések

- Az OpenFOAM megoldó alkalmas homogén neutrális határréteg szimulációjára
 - A megfelelő módosításokkal
 - Akár durva fali felbontás mellett is ($y^+ > 10^4$)
- Az adaptált modell alkalmazható komplex domborzat felett, a turbulencia-modell módosításával
 - Jó egyezés a mért és a számított sebességek között
 - A TKE előrejelzés pontatlan a leválási buborékban
 - Ennek oka a $k - \epsilon$ modell (izotróp turbulencia)



Köszönöm a figyelmet