

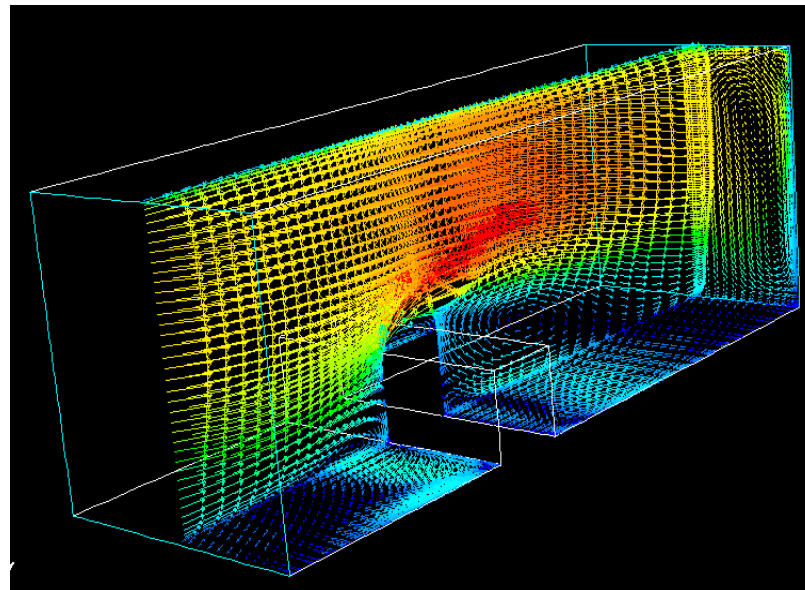
Large Eddy Simulation FLUENT rendszerben, alkalmazás bordázott csatorna számítására

Lohász Máté Márton

Konzulensek: Benocci C., Kristóf G., Rambaud P.

BME Áramlástan Tsz., VKI EA Department

2004. December 13.



Tartalom

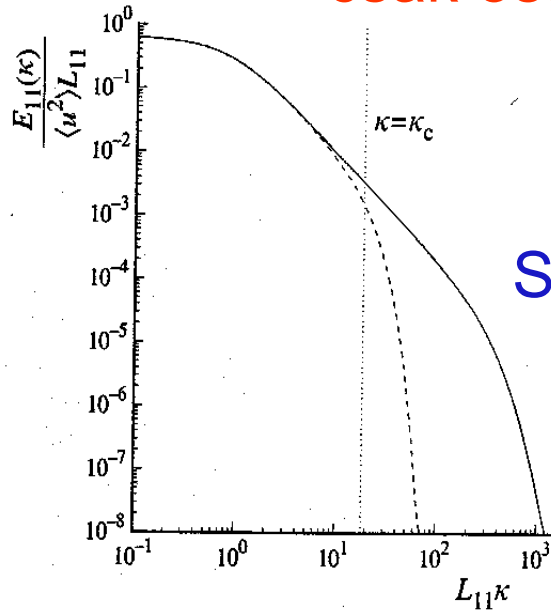
- A LES számítás menete
 - LES elmélet elemei
 - Peremfeltételek, numerikus követelmények
- Értékelési módszerek
- Alkalmazás bordázott csatornára
 - Számítási paraméterek
 - Validáció PIV-val
 - Átlagsebességmező
 - Időfüggő eredmények
 - Feltételes átlagolás
- Konkluzió

Gondolattól a célig

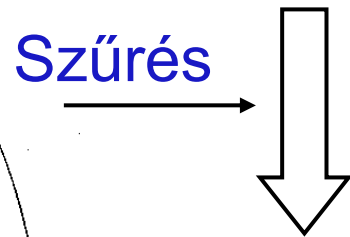
- Fizikai jelenség, turbulens áramlás
- Kis turbulens skálák modellezése, térbeli átlagolás=szűrés
- Tartomány, peremfeltételek
- Numerikus megoldás
 - Numerikus háló térben, időlépés
 - Diszkretizációs sémák: időben, térben, (hibák: diffúzió vagy oszcilláció), nem monotonitás
 - Számítási sebesség optimalizálás
- Kezdeti feltétel, időbeli, térbeli átlagolás
- Eredmények értékelése
 - Időfüggő koherens struktúrák (filmek, feltételes átlagolás)
 - 3D áramkép megértése (áramfelületek, forgó struktúrák, bifurkációs vonalak, örvény magok)

Nagy örvény szimuláció (LES)

-csak összenyomhatatlan áramlásra-



NS egyenlet széles térbeli spektrummal



$$\bar{\varphi}(\underline{x}, t) \doteq \int \varphi(\underline{y}, t) G(\underline{x}, \underline{x} - \underline{y}) d\underline{y}$$

térbeli átlagolás

3D, időfüggő



Szűrt Kont. Egy.: $\partial_{x_j} (\bar{u}_j) = 0$

Szűrt Mozg. Egy.: $\rho \partial_t (\bar{u}_i) + \rho \partial_{x_j} (\bar{u}_i u_j) = -\partial_{x_i} \bar{p} + \mu \partial_{x_j} \partial_{x_j} \bar{u}_i - \partial_{x_j} \tau_{ij}$

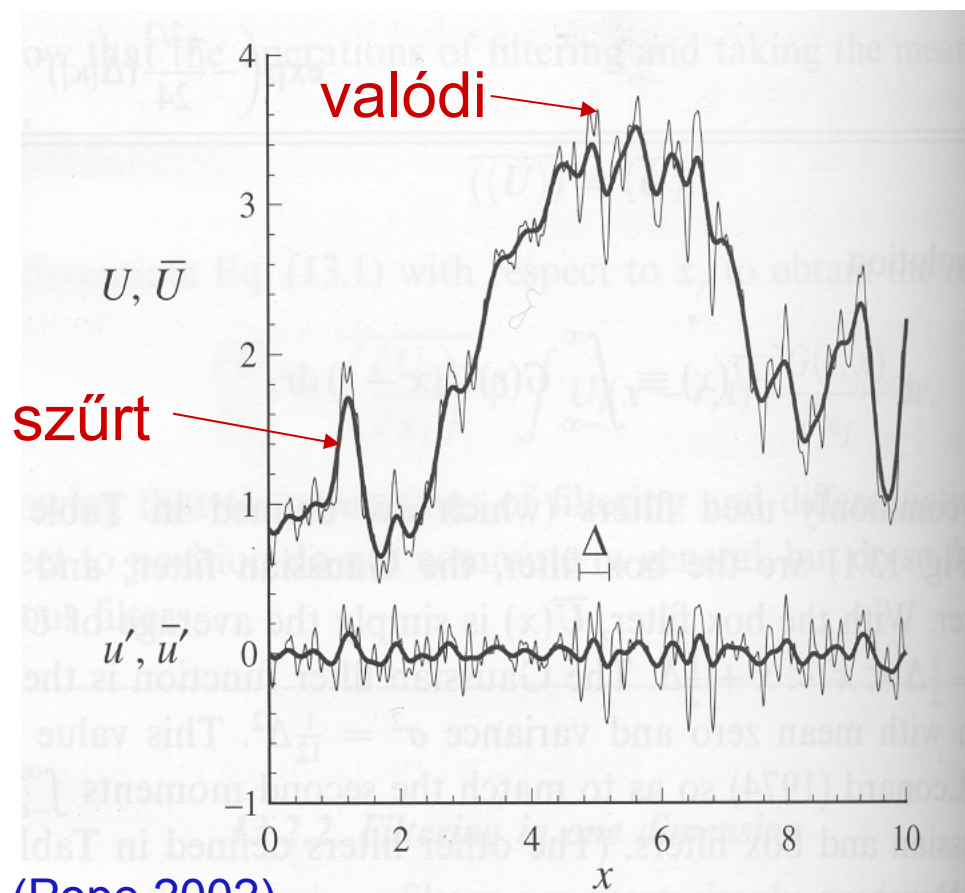
Modellezendő tag, Háló méret alatti feszültség:

(Sub-grid scale (SGS) stress) $\tau_{ij} = \overline{\rho u_i u_j} - \overline{\rho} \overline{u_i u_j}$

Nagy örvény szimuláció (LES)

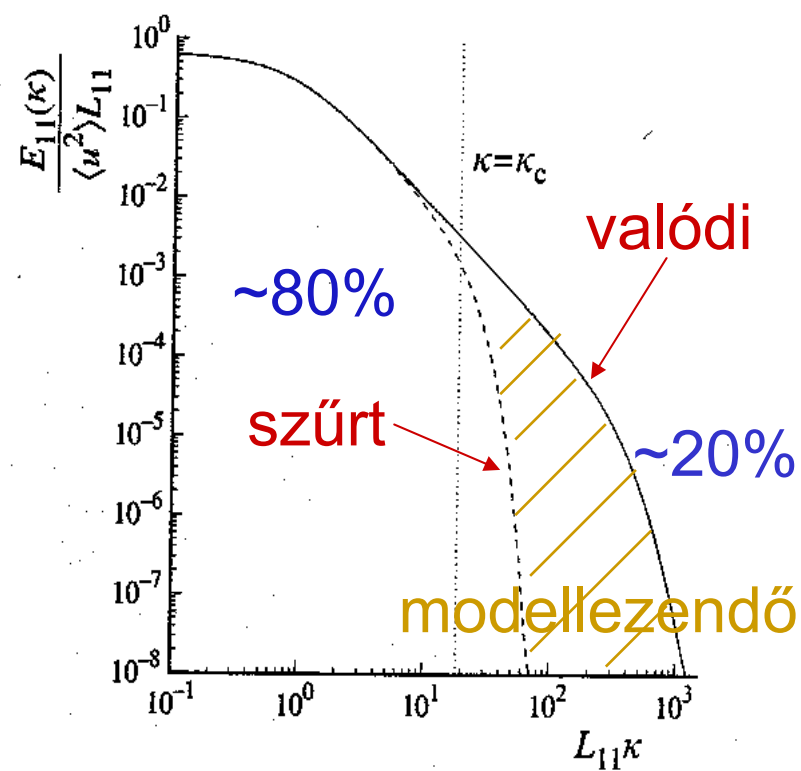
A szűrés hatása:

Fizikai térben



(Pope 2002)

Energiaspektrumon



Nagy örvény szimuláció (LES)

Háló méret alatti (SGS) modellezés

$$\tau_{ij} = \overline{\rho u_i u_j} - \overline{\rho} \overline{u_i u_j}$$

Gyakori az örvény viszkozitás modell:

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3} \tau_{kk} \delta_{ij} = -2 \mu_t \overline{S_{ij}} \quad \overline{S_{ij}} = \frac{1}{2} (\partial_i \overline{u_j} + \partial_j \overline{u_i})$$

Smagorinsky model: $\mu_t = \rho L_s^2 \sqrt{2 \overline{S_{ij}} \overline{S_{ij}}}$

Smagorinsky-Lilly model:

$$L_s = \min \left(\kappa d, C_s V^{1/3} \right)$$

κ Kármán konstans

V Cella térfogat

C_s Smagorinsky konstans

Nagy örvény szimuláció (LES)

Miért? Miért ne?

Előnyök:

- Turbulencia megértése, befolyásolása
- Nagy méretű, időfüggő struktúrák vannak jelen
 - Tompa testek körüli áramlás, időfüggő leválás, örvény leválás
- Időfüggő erő, zaj számításhoz elengedhetetlen
- Pontosabb eredmény bonyolult leválások áramlások esetén (a nagy örvényeket nem lehet helyi jellemzőkkel modellezni)

Hátrányok:

- Hatalmas számítási igény (hónapok vs. napok)
- Szaktudást igényel
- Számítási igény Re számmal nő ($N \sim Re^{1,8}$)

Nagy örvény szimuláció (LES)

Számítási tartomány (RANS-hoz hasonlóan)

Elég távol: A vizsgált jelenség **nem befolyásolja** a peremfeltételeket (belépő, távotér)

A perem **ne hasson vissza** a vizsgált tartományra (kilépő)

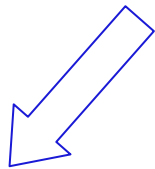
Ismert peremfeltétel: Ahol pontosan ismerjük

Lehető legkisebb: A hatalmas számításigény miatt még fontosabb

Nagy örvény szimuláció (LES)

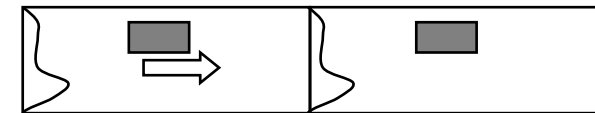
Peremfeltételek

Belépés: **Időfüggő** turbulens profil, a turbulencia minden fontos tulajdonságával (Reynolds feszültség tenzor, hosszlépték tenzor, összefüggő struktúrák = örvények...)
(zaj nem elég!!!, szintetikus struktúrák Fluentben)



Periodikus perem: **Periodicitás** az átlagolt mennyiségekben (sebesség, turbulens jellemzők)

Korrelálatlan turbulencia (hosszlépték korábbi tapasztalatból)



Nagy örvény szimuláció (LES)

Peremfeltételek

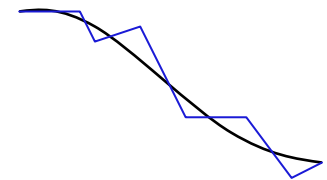
Fal: $y^+=1$ ($x^+=50$, $z^+=10$) esetén tapadási törvény alkalmazható, a fal melletti anizotrop turbulencia felbontásához, nagyságrendileg helyes csúsztató feszültség becsléséhez

$$y^+ = \frac{\sqrt{\frac{\tau_w}{\delta}} y}{\nu}$$

$y^+ \rightarrow 1$ esetén falfüggvények i hibás a dinamika a fal és a belső tér között

Numerikus megoldás

- A múltban egyszerű geometriákat házi strukturált kóddal számoltak, ma már strukturálatlan kereskedelmi kóddal
- Az energia 80%-ához tartozó méreteket föl kell bontani (pl.: 40^3 cella izotróp turbulenciához, Reynolds szám független pl.: fal mellett $y^+=1$, $x^+=50$, $z^+=10$, Reynolds szám függő)
- A térbeli fölbontással összhangban lévő időlépés ($CFL \sim 1$)
 CFL =egy időlépés alatt megtett cellák száma
- Ne okozzon a modellezet örvényekével egy nagyságrendű diffúziót (térben, időben: minimum másodrendű séma)
- Ne okozzon oszcillációt (wiggles), legyen monoton

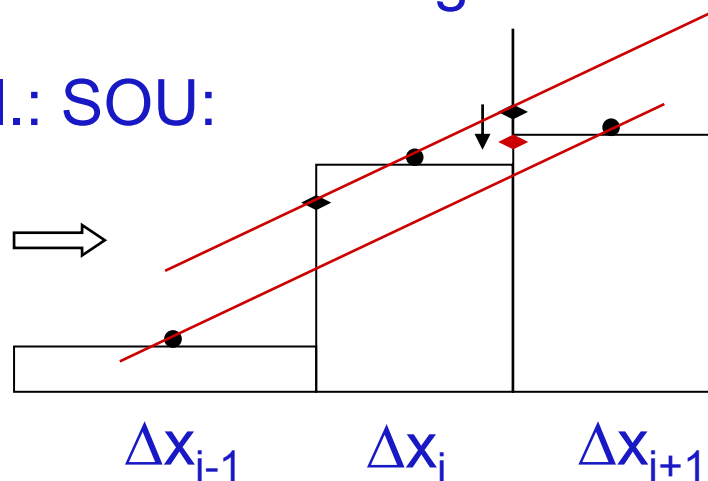


Nagy örvény szimuláció (LES)

Háló méret alatti modellezés

Monotonic Integrated LES **MILES** megközelítés

pl.: SOU:



- Cella érték
- Gradiens közelítés
- ◊ Érték a fluxushoz
- ↓ Korlátozás (monoton)

Eredmény: ➤ **Monoton** (fizikailag elképzelhető) megoldás

➤ Numerikus **disszipáció**

MILES = a numerikus disszipáció SGS modellként
(A korlátozás (limiter) módjától függ)

Nagy örvény szimuláció (LES)

Átlagolt mezők számítása

Kezdeti feltétel: **Előzetes számítás** kell fizikailag helyes turbulencia kialakításához

Reynolds átlagolás: **Homogén irányokban és időbeli átlagolással** közelítjük, turbulencia foktól függően sok független minta szükséges

Áramlások lokális jellemzése

-csak összenyomhatólan áramlásra-

Sebesség gradiens tenzor

$$A_{ij} \doteq \partial_j u_i$$

Alakváltozási sebesség tenzor

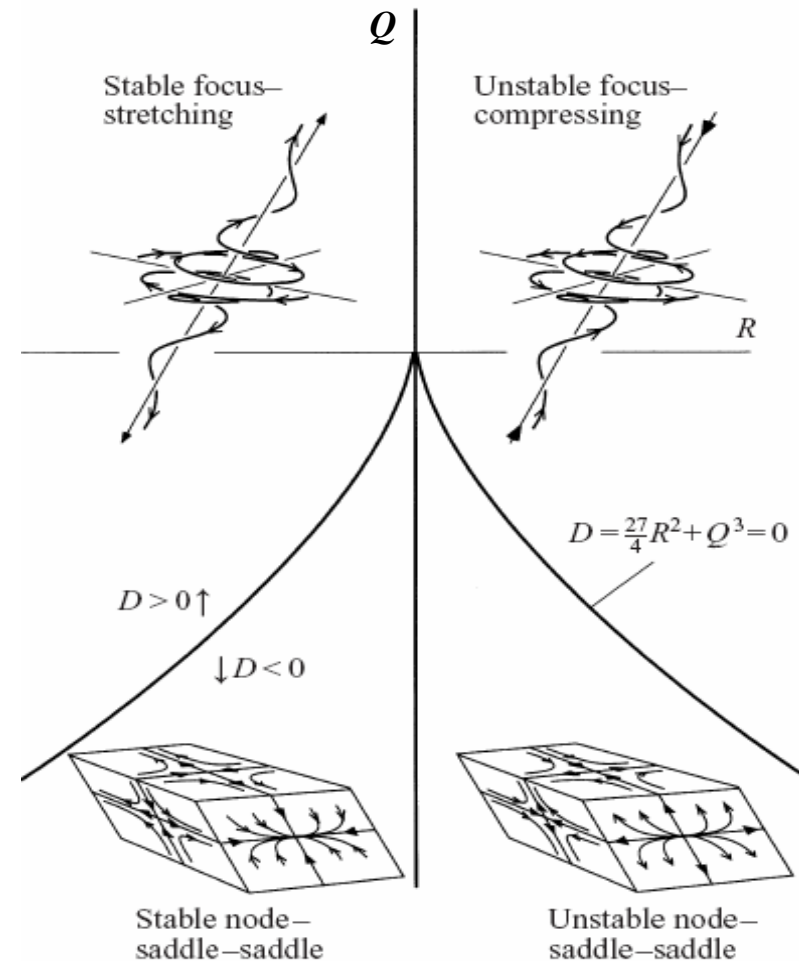
$$S_{ij} \doteq \frac{1}{2}(A_{ij} + A_{ji})$$

Örvénytenzor

$$\Omega_{ij} \doteq \frac{1}{2}(A_{ij} - A_{ji})$$

Karakterisztikus egyenlet:

$$0 = \lambda^3 + \lambda Q + R$$



Forgó struktúrák kiértékelése

-csak összenyomhatatlan áramlásra-

$$Q \doteq -\frac{1}{2} A_{ij} A_{ji} = \frac{1}{2} (\Omega_{ij} \Omega_{ji} - S_{ij} S_{ji})$$

$$R \doteq -\frac{1}{3} A_{ij} A_{jk} A_{ki}$$

Forgás dominancia

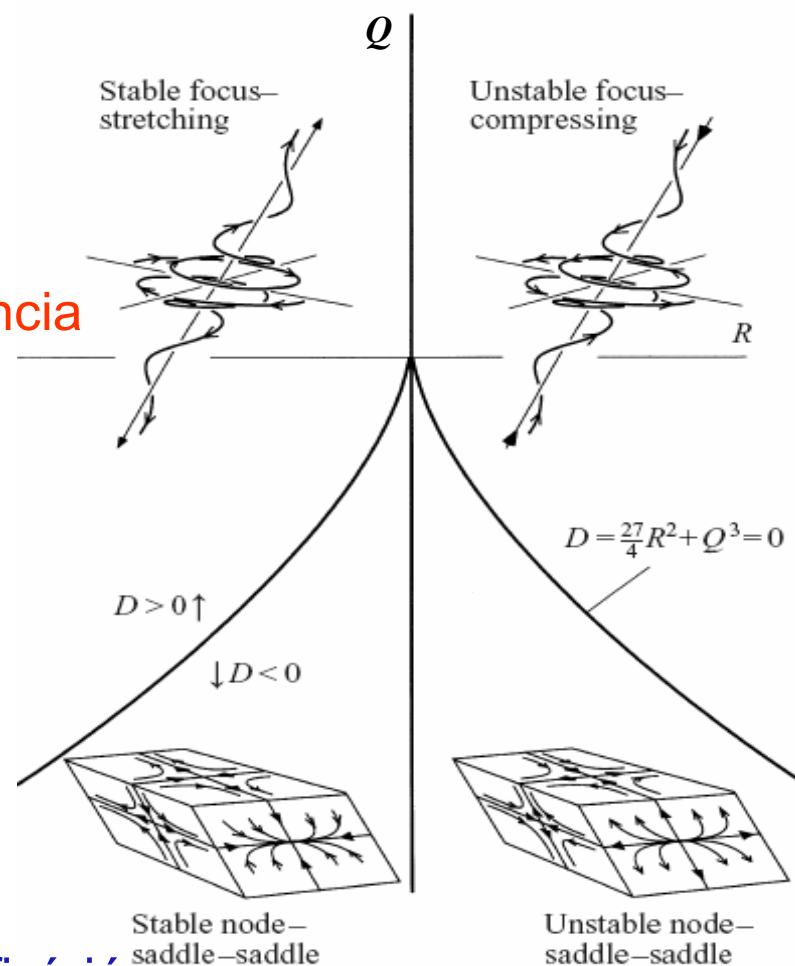
Nyomás egyenlet:

$$\Delta p = 2\rho Q$$

Forrástag



$Q > TH > 0$ gyakran használt örvény definíció

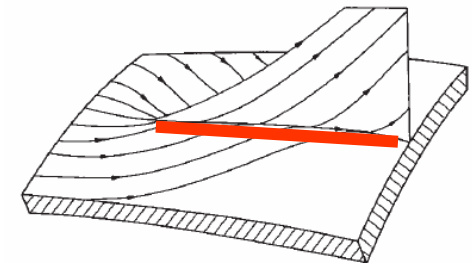


Topológiai analízis

Bifurkációs vonal meghatározás

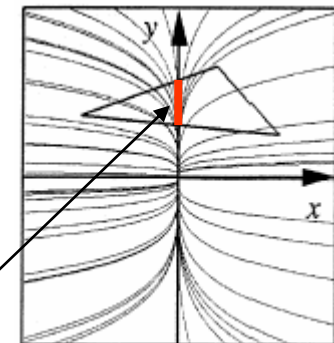
(Kenwright 1998 módszerével)

3D (+/-) bifurkációs vonalak, leválási/visszafekvési vonal helyett, nem nulla a csúsztatósebesség (Perry and Hornung 1987)



- 1.) Kiválasztjuk a két valós sajátértékű pontokat
- 2.) Meghatározzuk a nulla csúsztatófeszültségű ponton átmenő fali áramvonalat
- 3.) Az áramvonal cellán belüli része a bifurkációs vonal

Bifurkációs vonal részlet



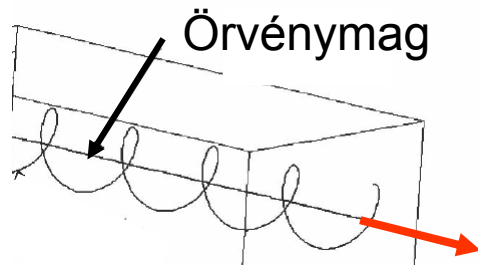
Tecplot 10.4, CFD Analyzer 4.0

Topológiai analízis

Örvény mag meghatározás

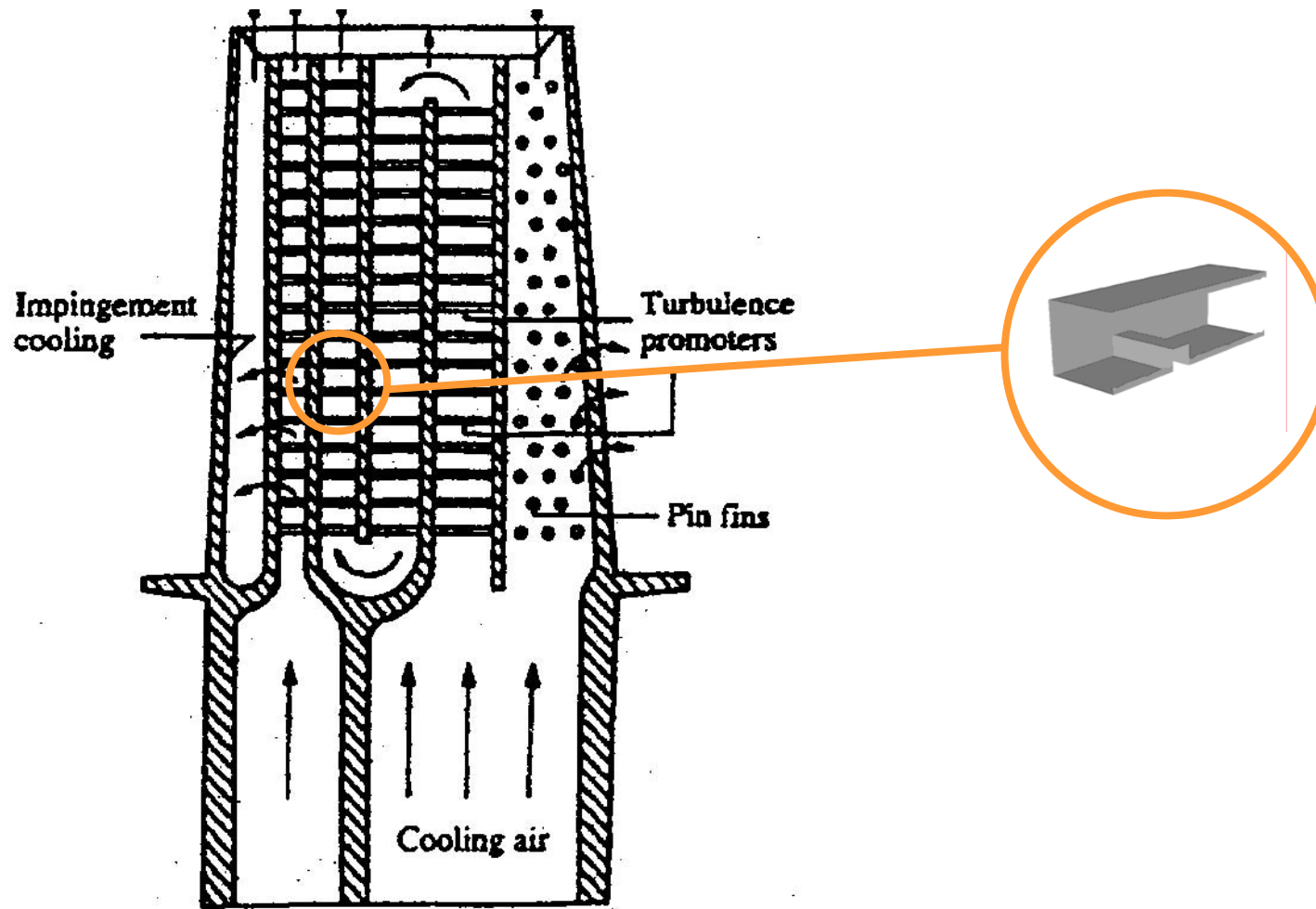
(Sujudi 1995, Haimes 1999 módszerével)

- 1.) Kiválasztjuk az egy valós, két komplex sajátértékű pontokat (ezek forognak)
- 2.) A valós sajátértékhez tartozó sajátvektor irányú sebességkomponenst levonjuk **i redukált sebesség**
- 3.) Az eltűnő redukált sebességű pontok az örvénymagok

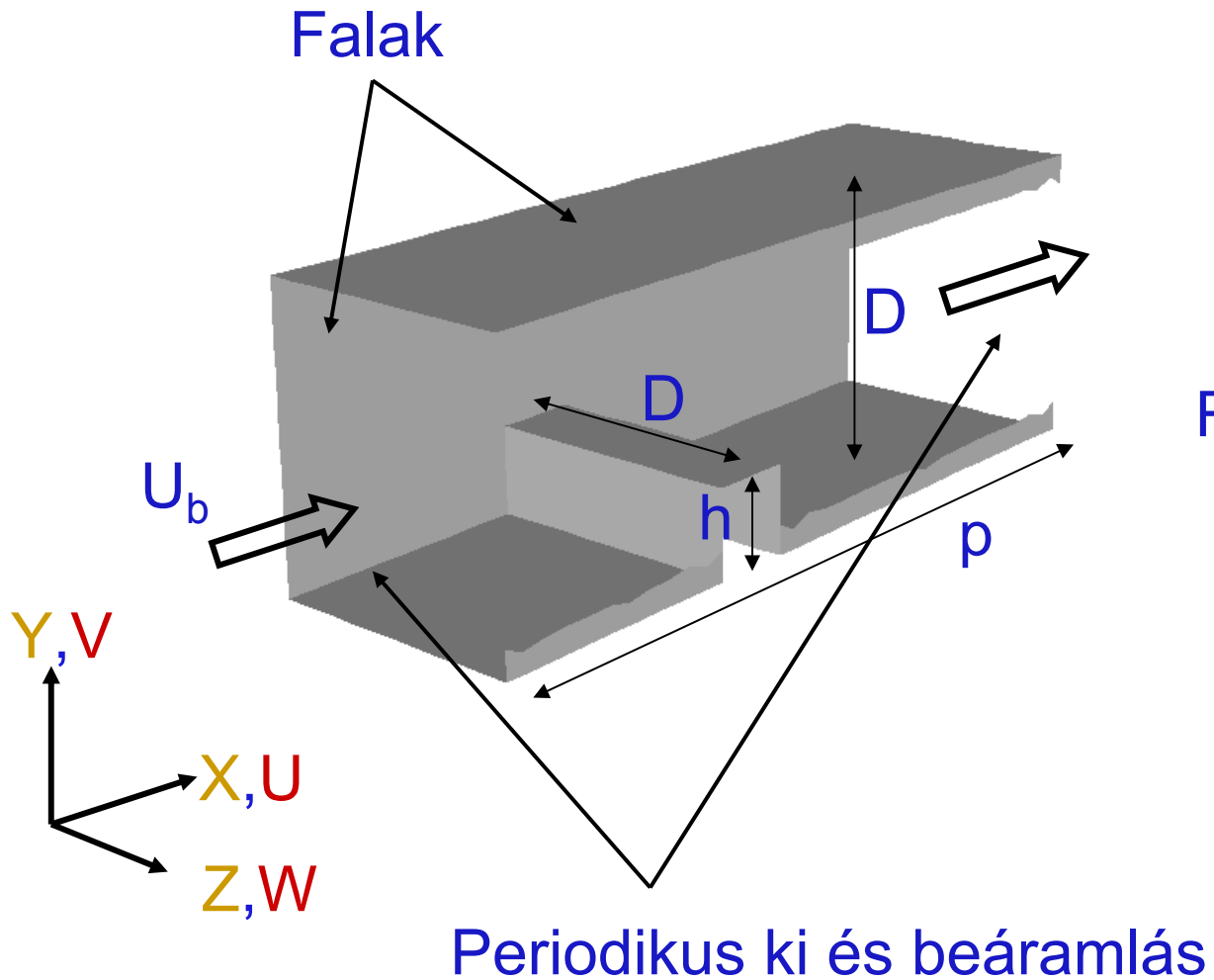


Tecplot 10.4, CFD Analyzer 4.0

Turbina lapátok belső hűtése bordázott csatornákkal



Áramlási paraméterek a kialakult bordázott cső áramlásban

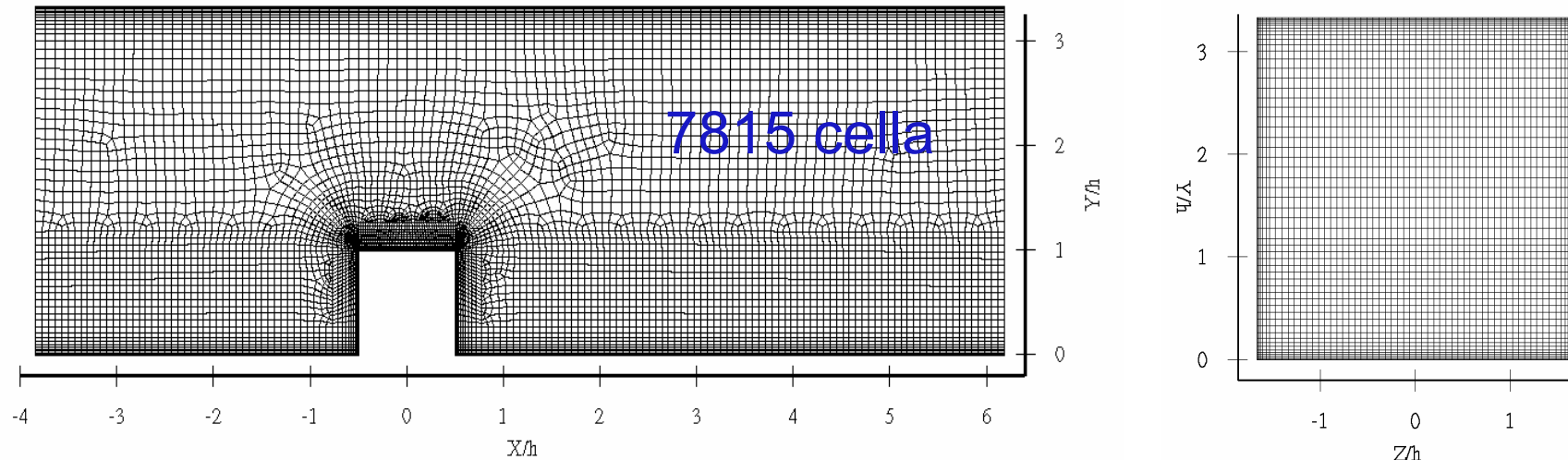


$$Re = U_b D / \nu = 40000$$

$$h/D = 0,3$$

$$p/h = 10$$

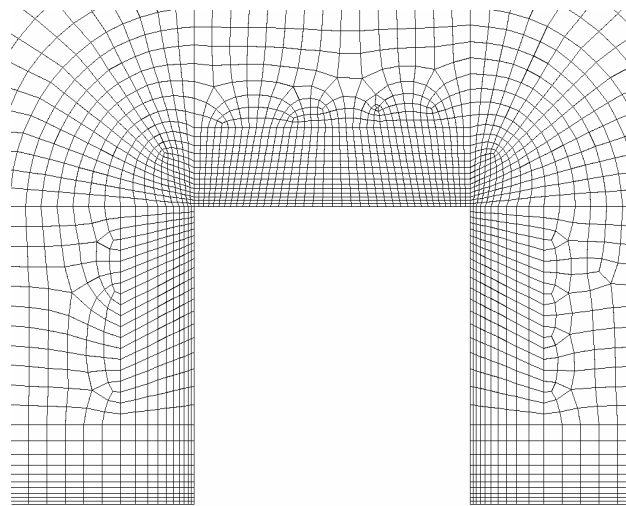
Számítási paraméterek (háló)



7815 cella

60 cella

$60 \times 7815 = 468900$ összes cella szám



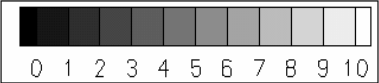
0.0003D

Számítási paraméterek

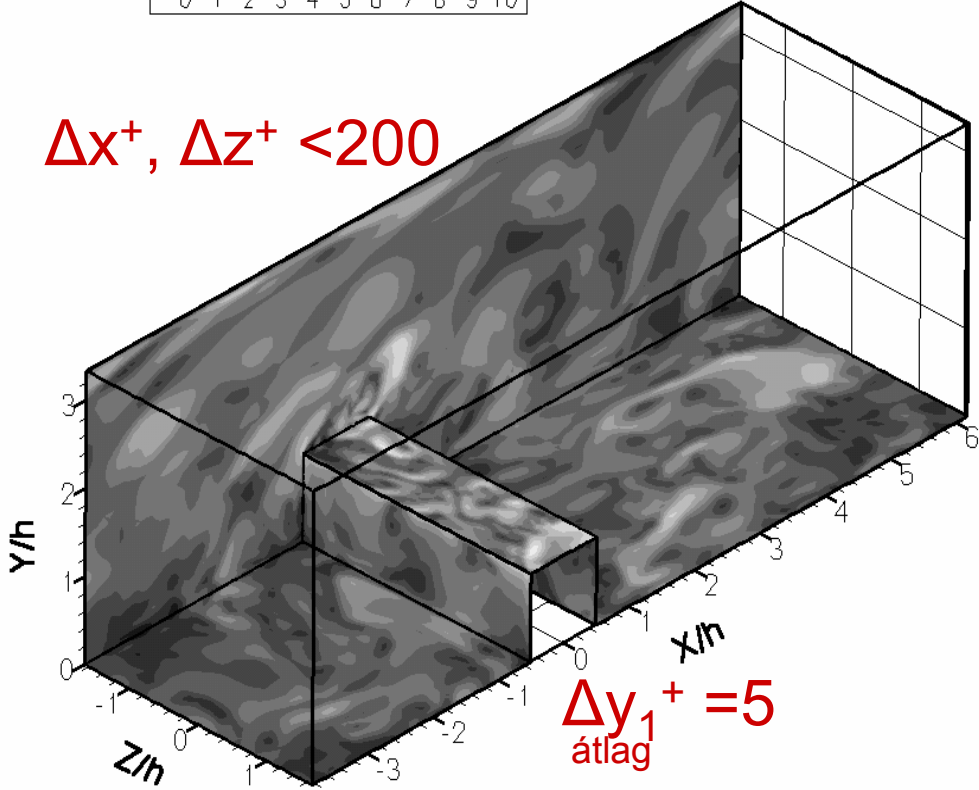
y^+ az első cellában

CFL

$(\Delta t = 0.005D/U_b = 0.0015h/U_b)$

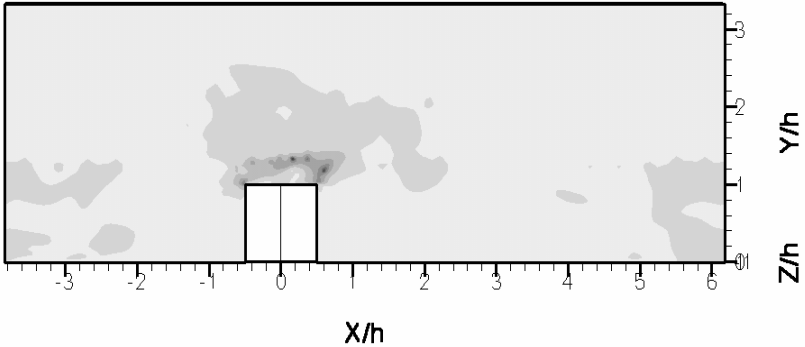


$\Delta x^+, \Delta z^+ < 200$



$\Delta y_1^+ = 5$
átlag

$CFL_{\text{átlag}} = 0.3$



Számítási paraméterek

- Second Order Upwind, a gradienseket cella érték alapján
- Másodrendű séma a nyomásra
- SIMPLE a sebesség nyomás kapcsolatra
- Gear-féle (másodrendű implicit) módszer időben
- Konv. kritérium: 10^{-4} a skálázott kontinuitás reziduuma

$$T_{\text{átlagolás}} = 141D/U_b = 47p/U_b \Leftrightarrow 6 \text{ hét számítás (AMD 2400MHz)}$$

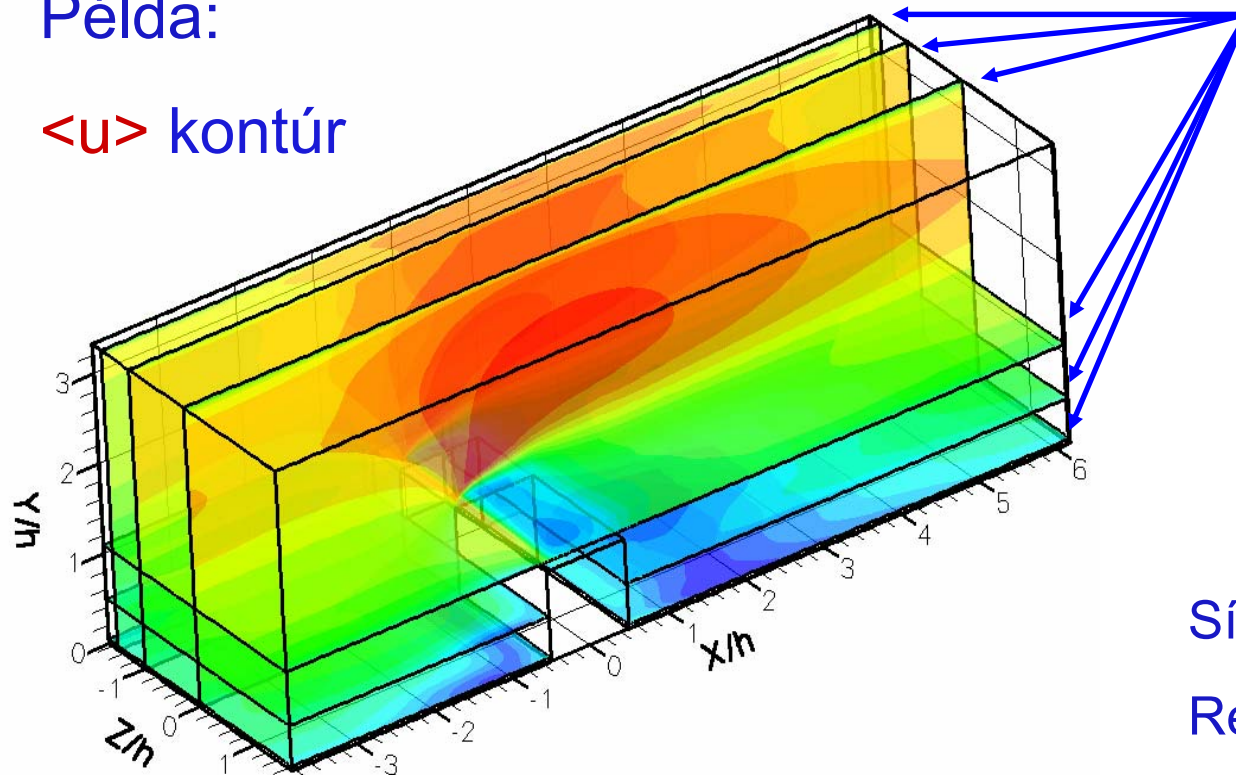
MILES ($C_s=0$)

Összehasonlítás PIV-vel

Összehasonlítás Luca Casarsa (2003) PIV méréséhez

Példa:

$\langle u \rangle$ kontúr



6 sík:

$Z/h=0,1,1.5$

$Y/h=0.05,0.5,1.1$

5 mennyiség:

Síkbeli sebességek (2)

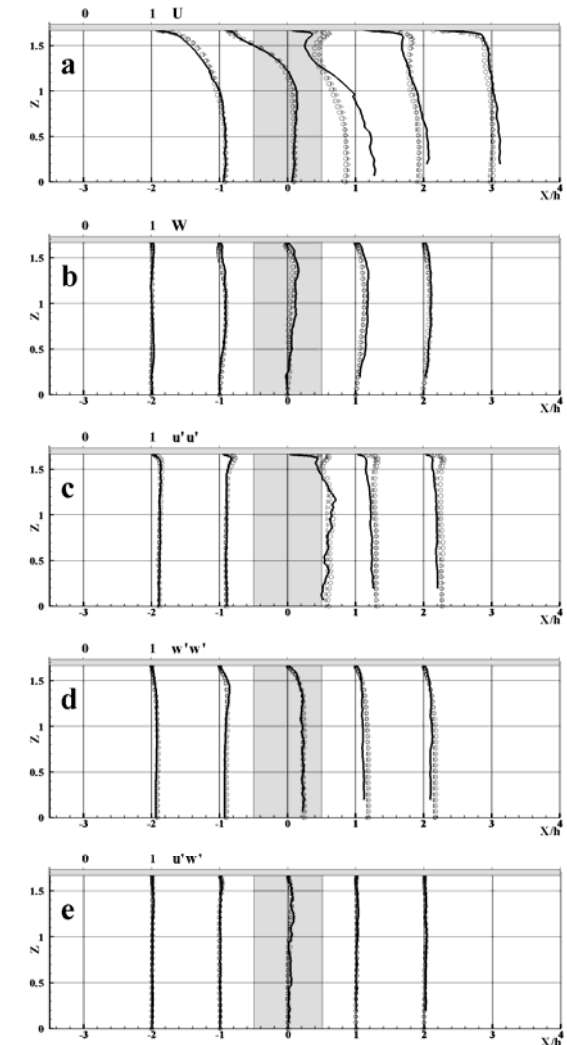
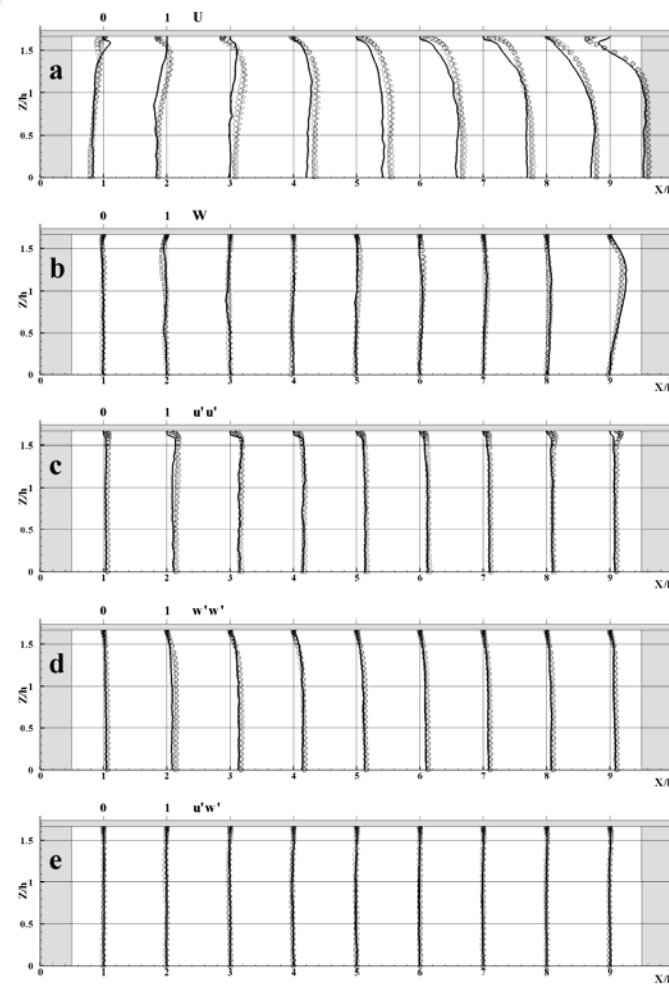
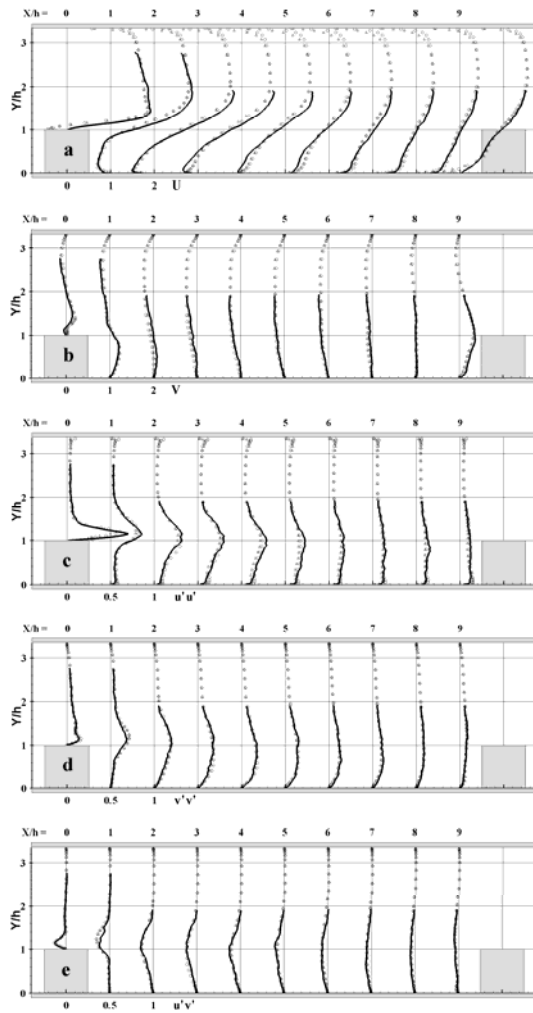
Reynolds feszültségek (3)

Profilok összehasonlítása 3 síkban


$Z/h=0$

$Y/h=0,5$

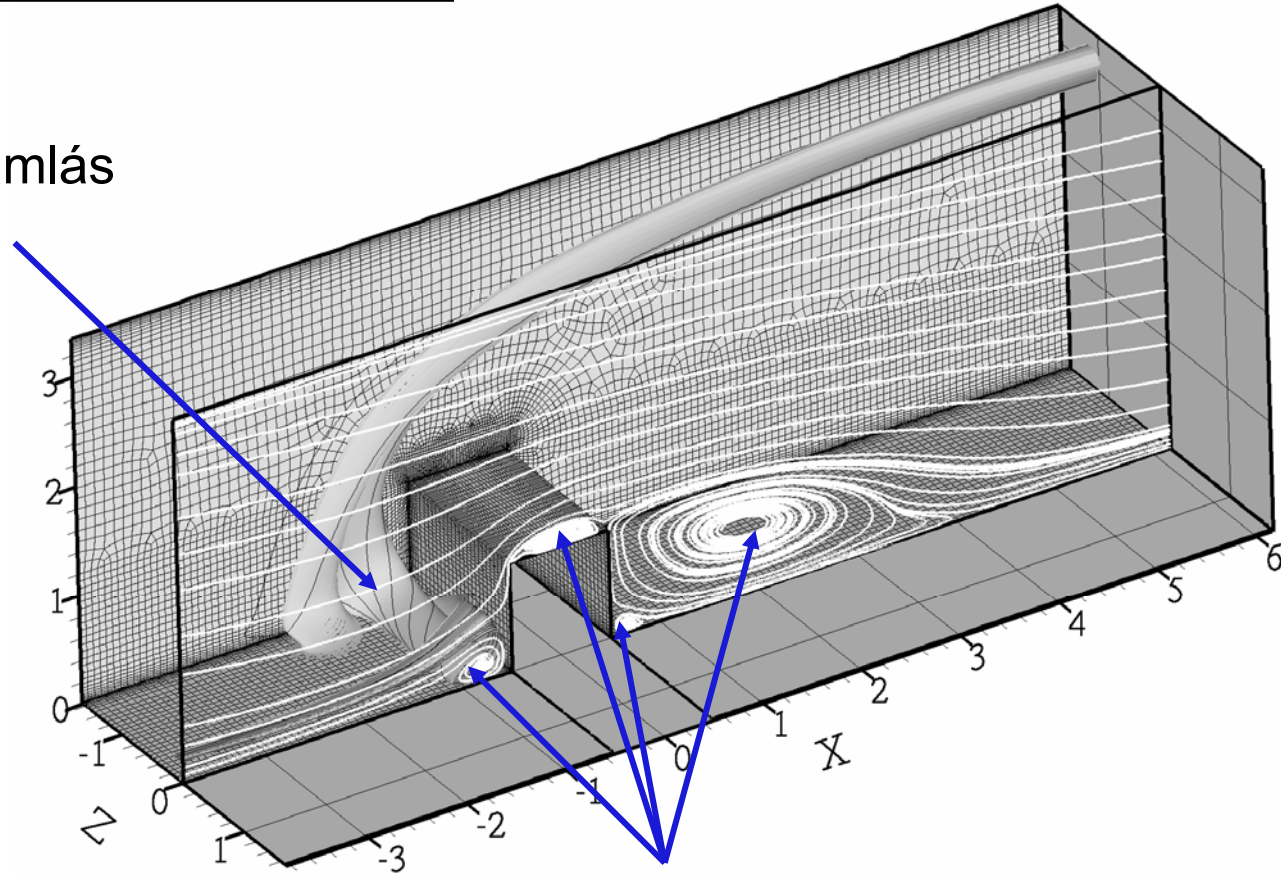
$Y/h=1,1$



Átlag áramkép elemzése

 Középsíkbeli áramvonal \Rightarrow Mint egy 2D bordázott csatorna

Szekunder áramlás
a borda előtt

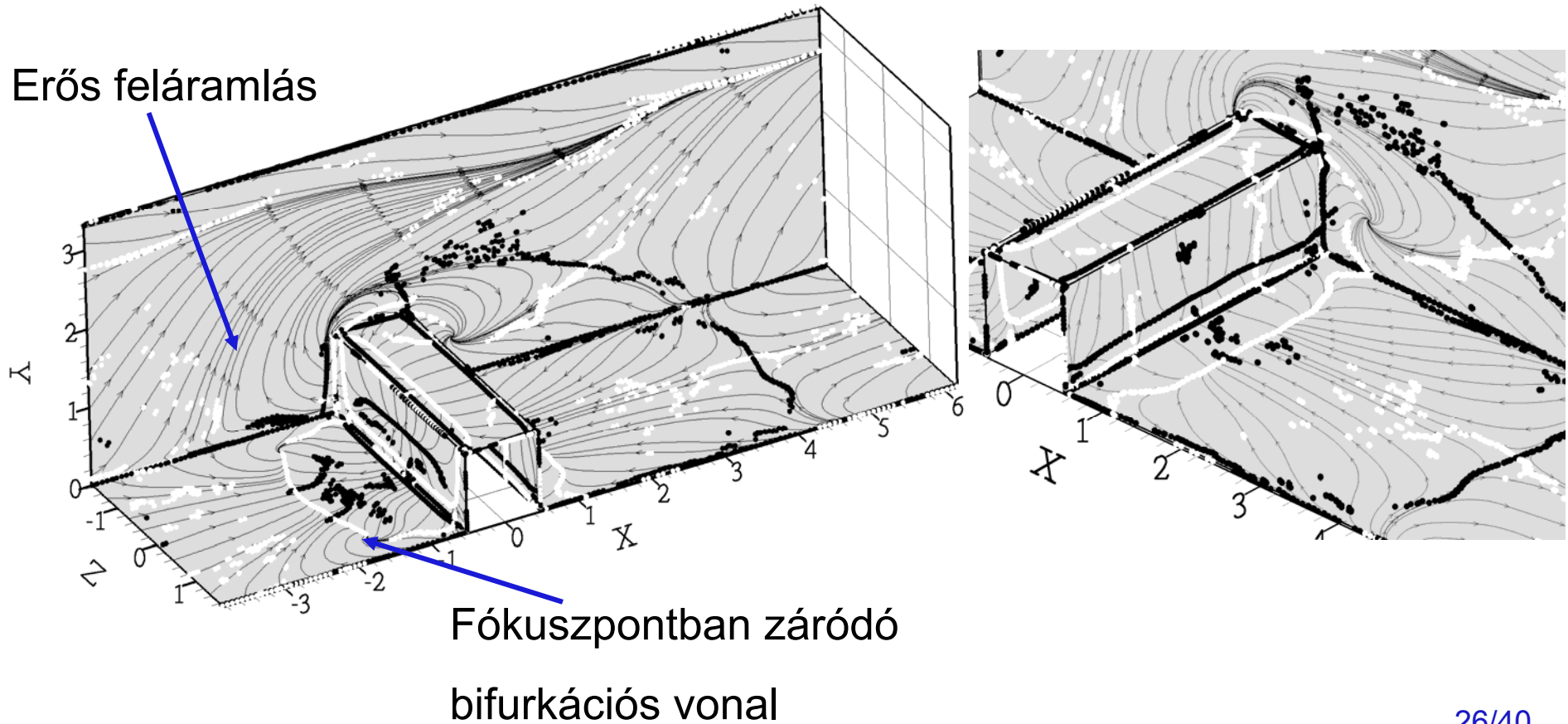


4 fontos leválási zóna

Átlag áramkép elemzése

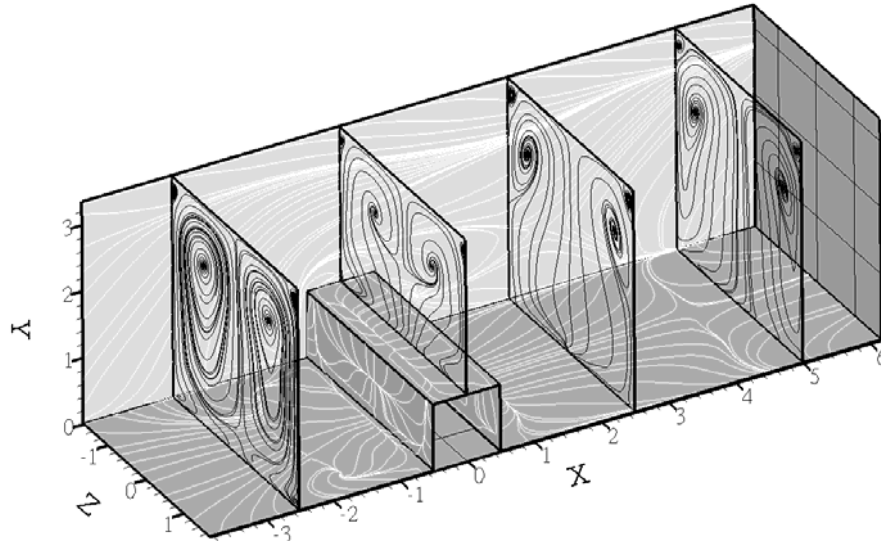
 + Bifurkációs vonalak (visszafekvés)

 - Bifurkációs vonalak (leválás)



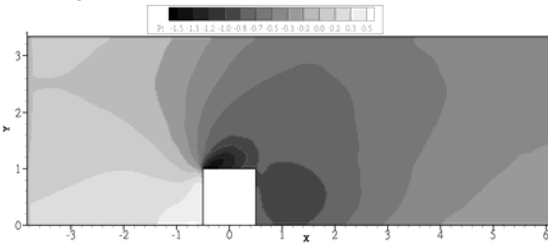
Átlag áramkép elemzése

Az oldalfalak okozta szekunder áramlás

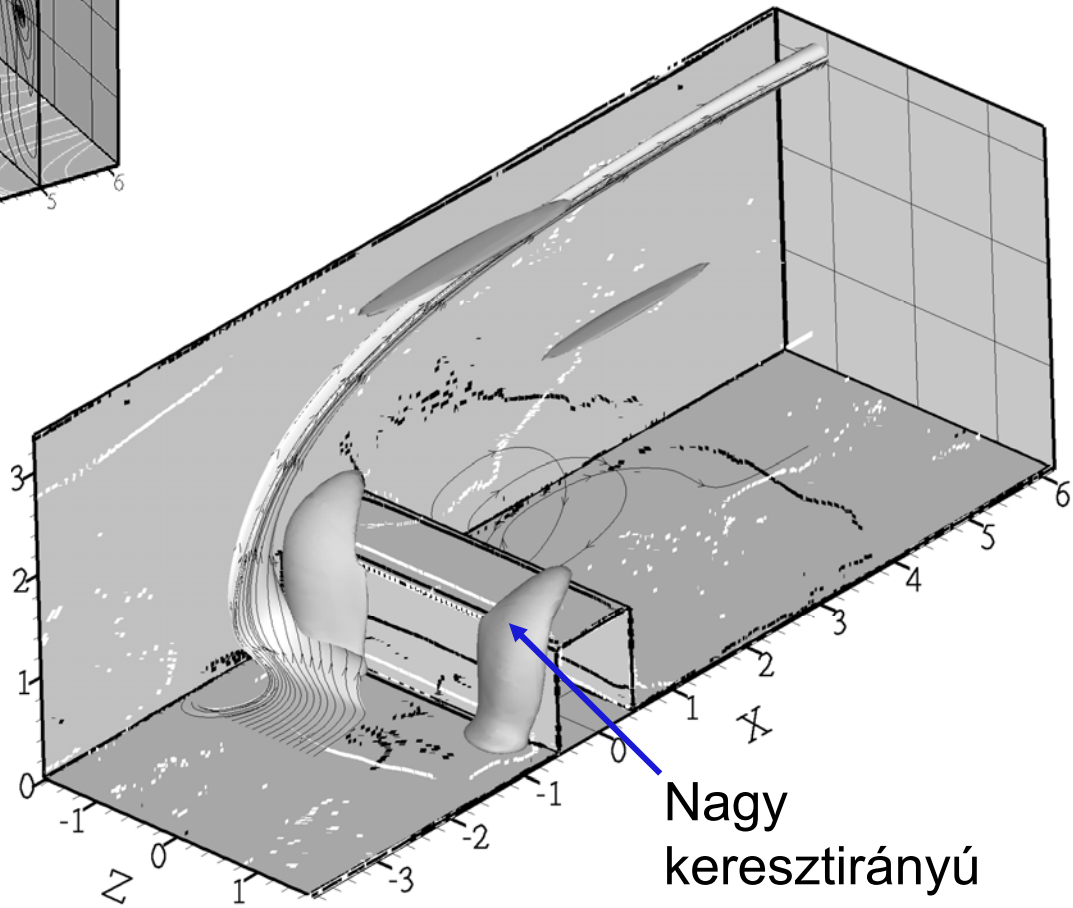
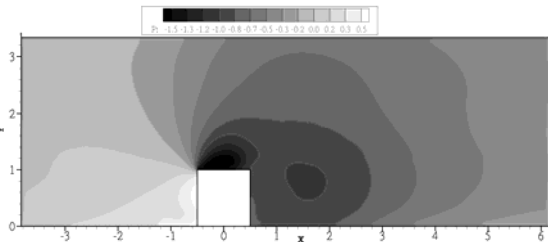


Nyomáseloszlás

Falon

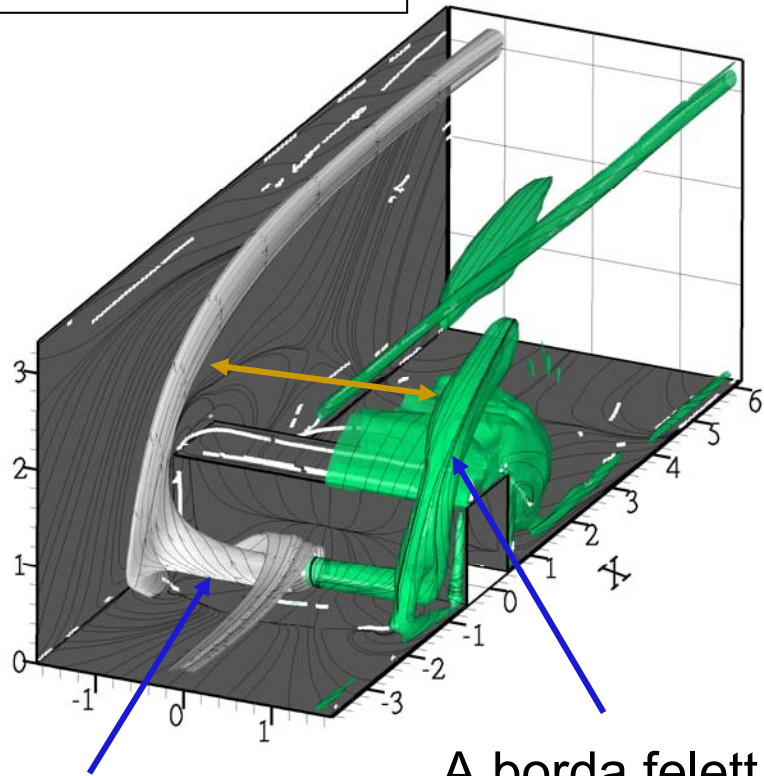
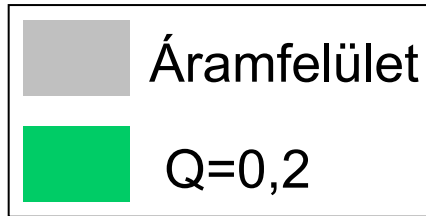


Középen



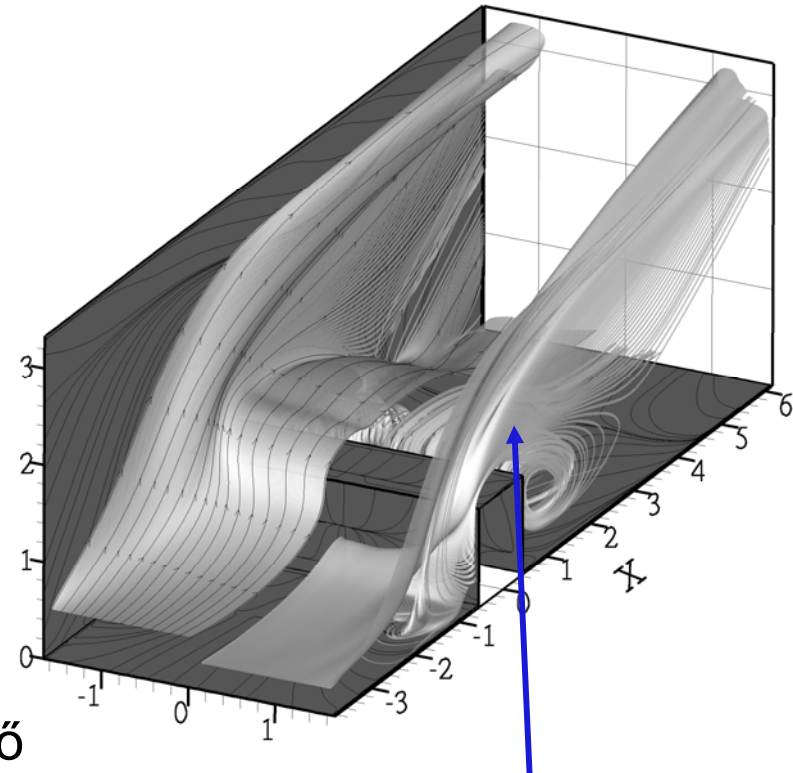
Nagy keresztirányú áramlás

Átlag áramkép elemzése



A leváló folyadék
oldalra távozik

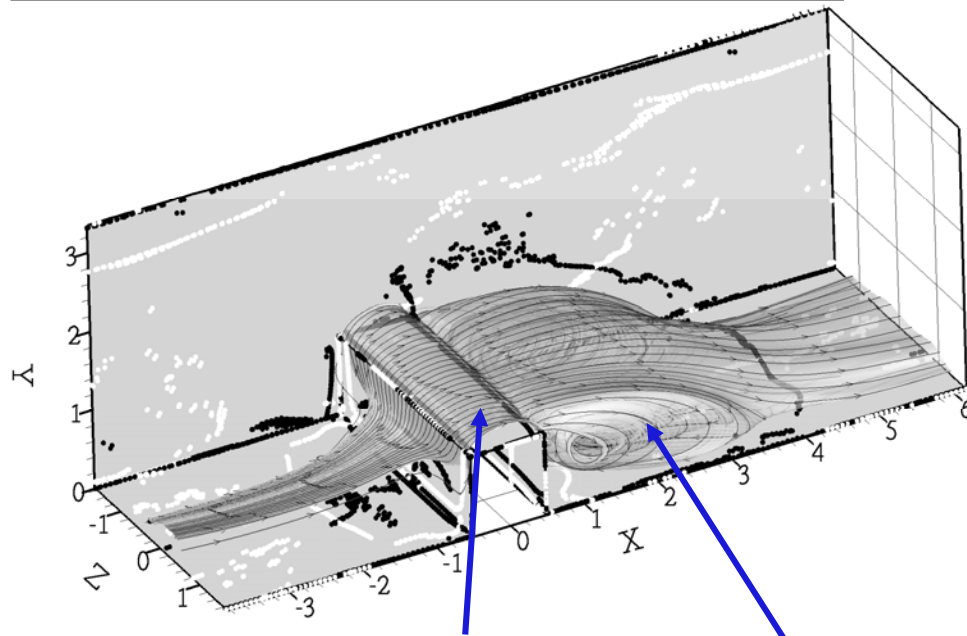
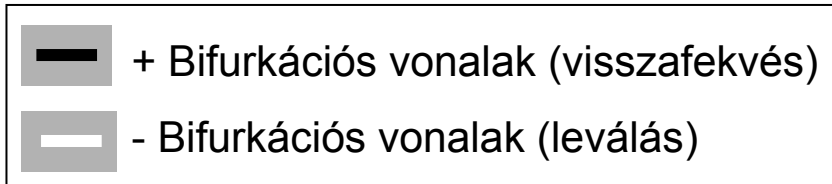
A borda felett átívelő
forgó struktúra



A fal közeli folyadék az
oldalfal mellett halad

Átlag áramkép elemzése

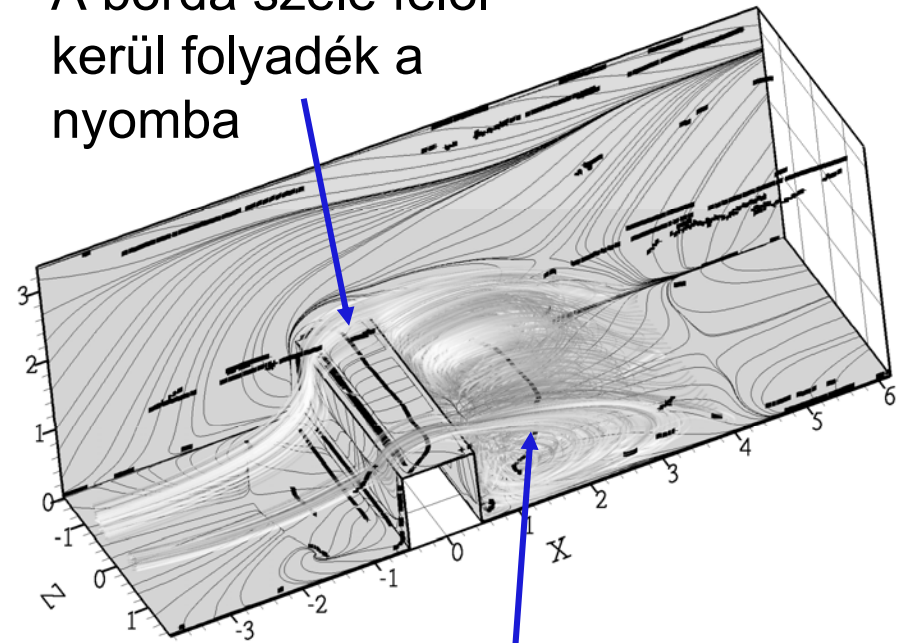
A nagy nyom alakja és vonzási tartománya



Az oldalfal hatása
csekély

Az oldalfal hatása

A borda széle felől
kerül folyadék a
nyomba

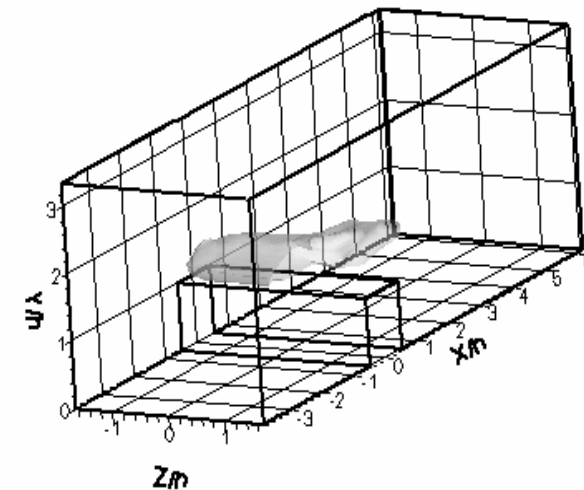
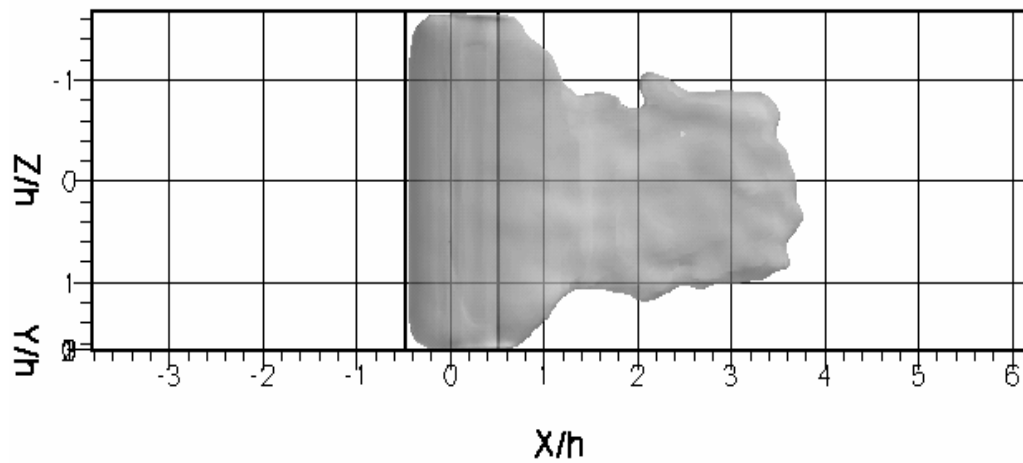
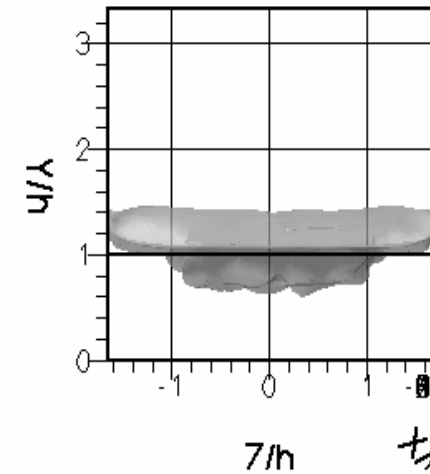
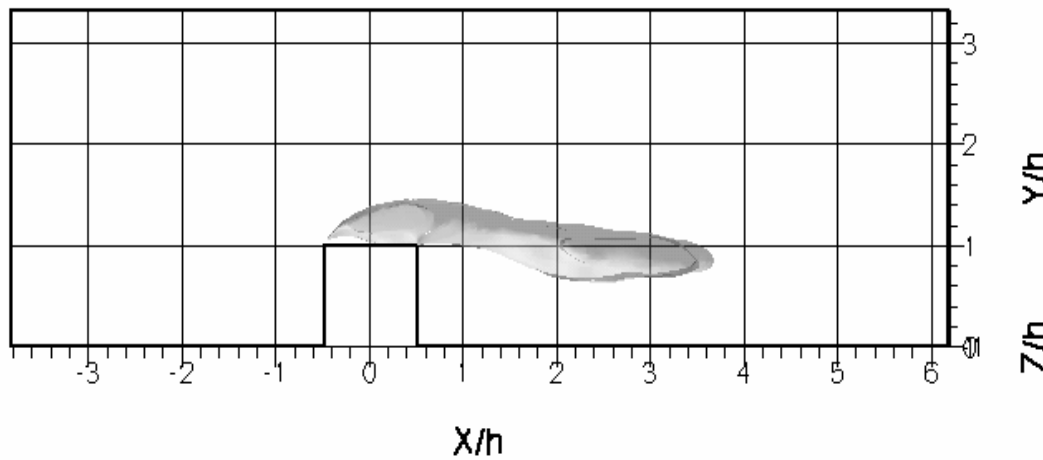


A fal mellett rövidül a
nyom

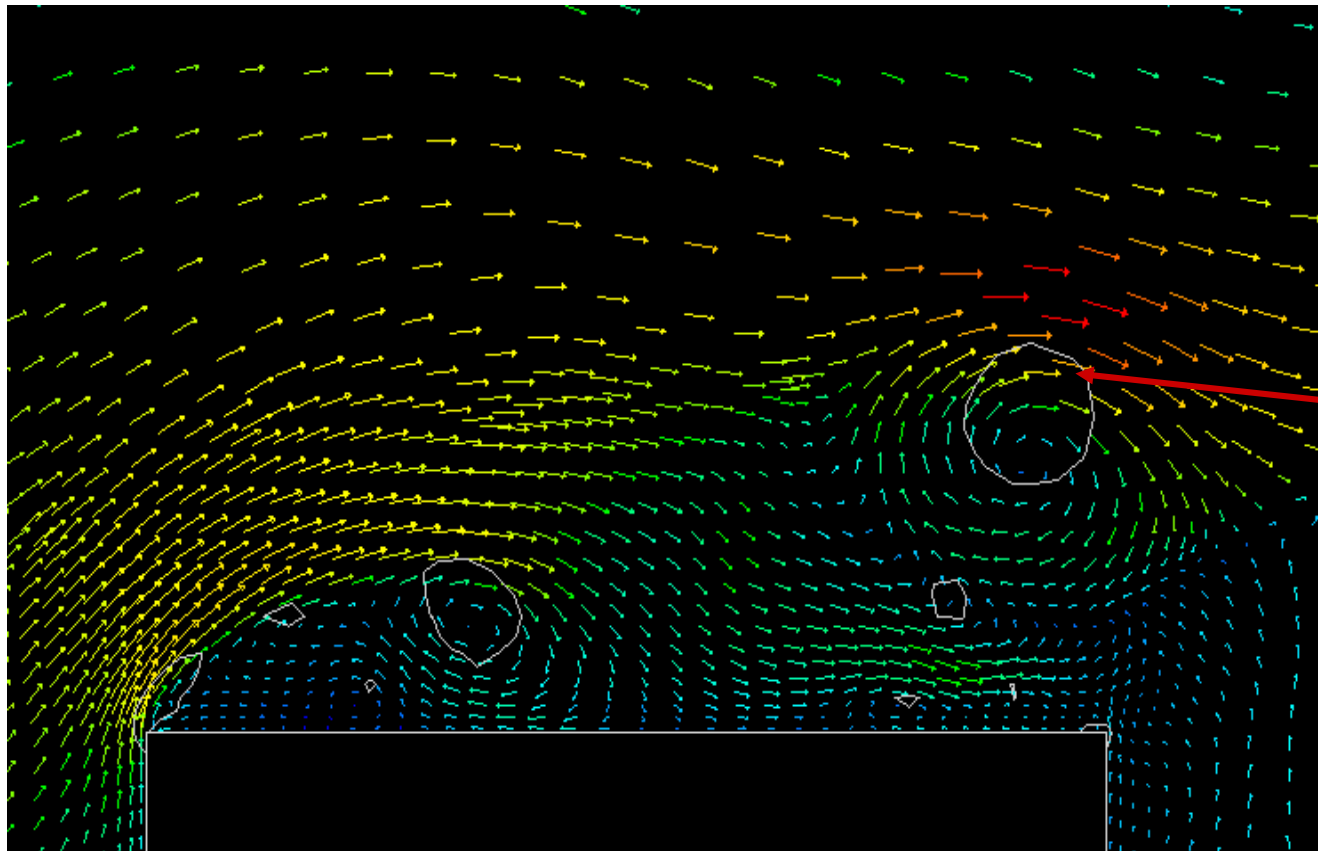
Nagy turbulens kinetikus energiájú tartomány

$$2k = \langle u_i' u_i' \rangle = 0,6$$

Szabad nyíróréteg turbulencia a legfontosabb



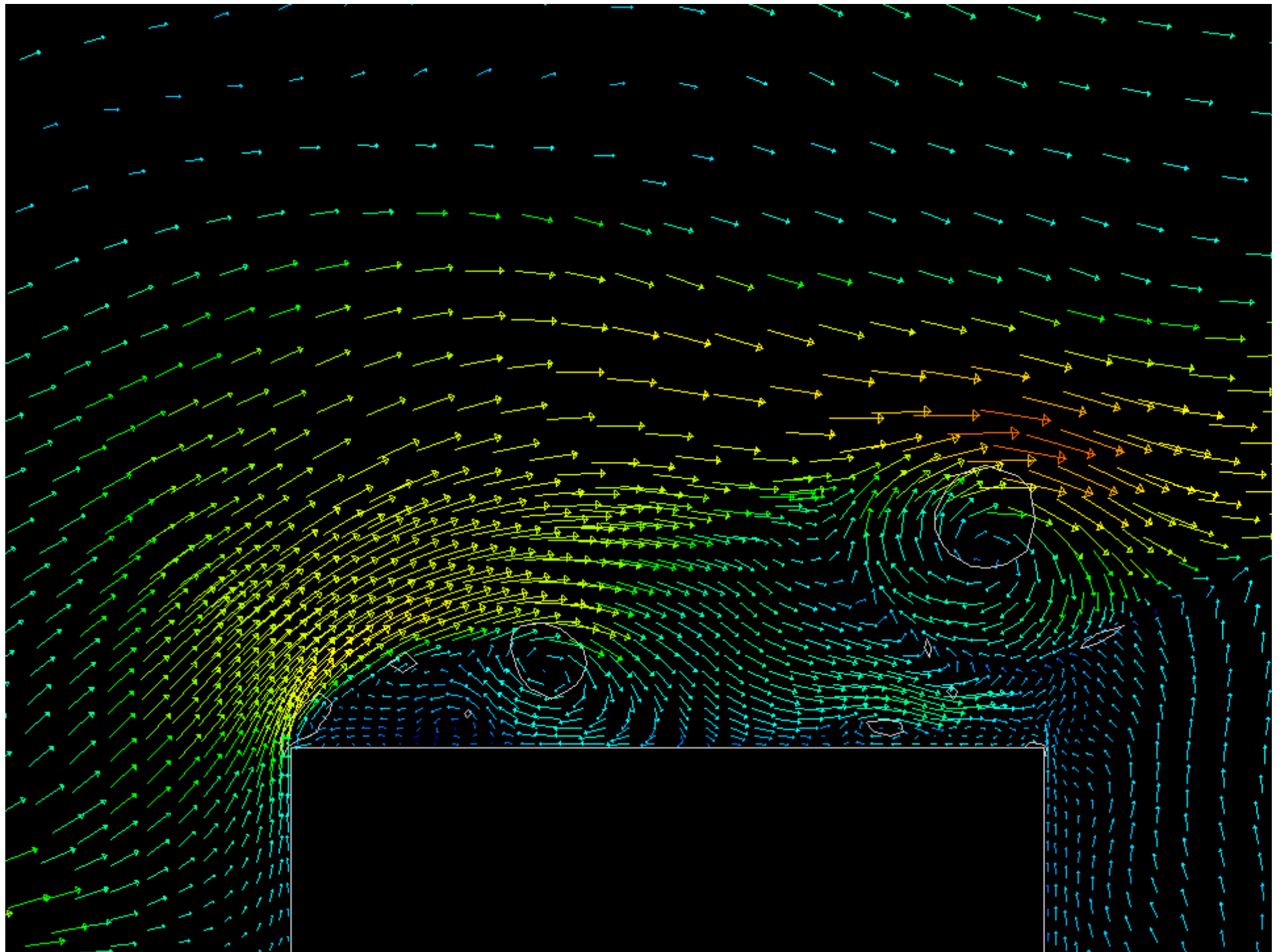
Forgó struktúrák az időfüggő áramképben a Q kritériumot használva



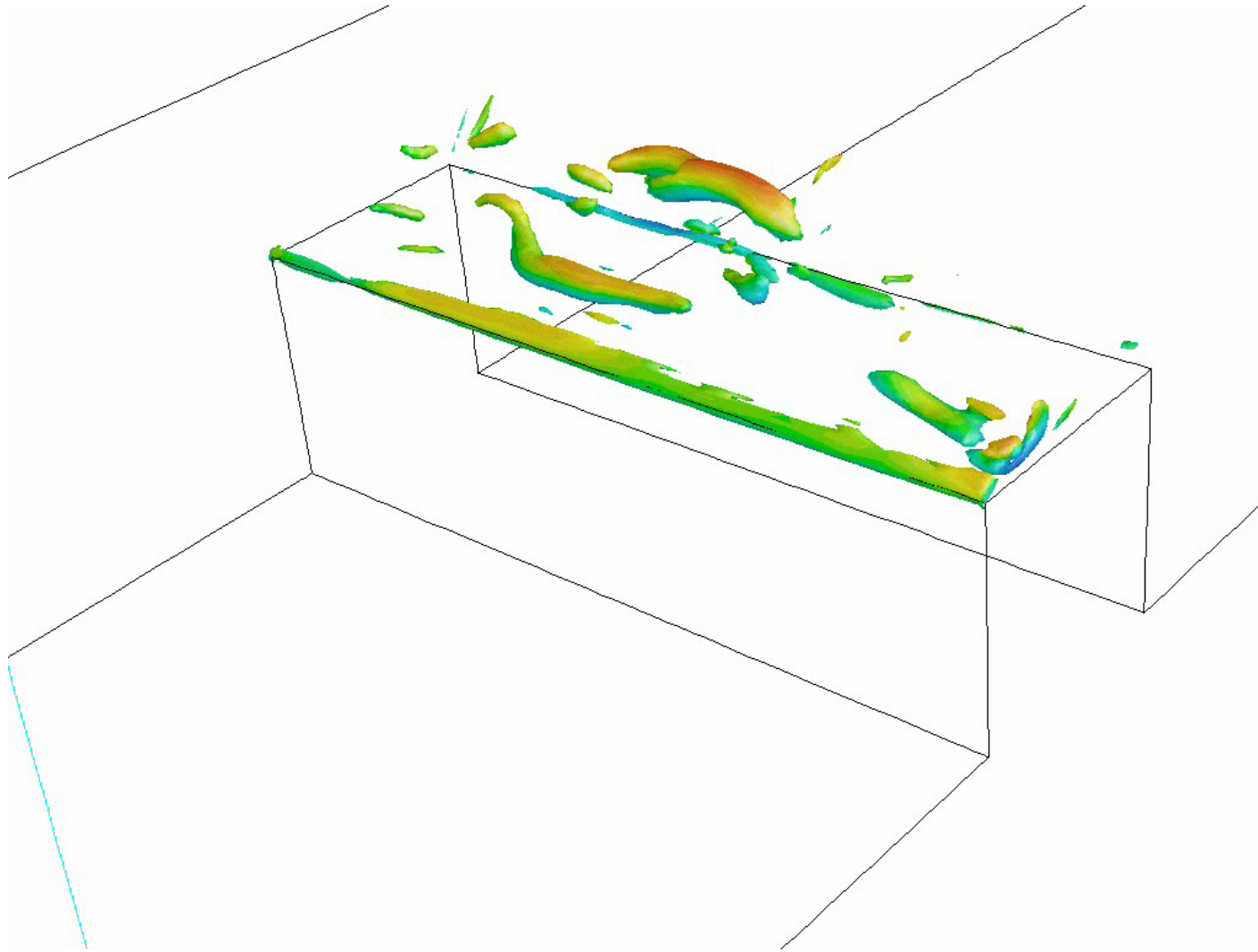
Q állandó

“felület”=

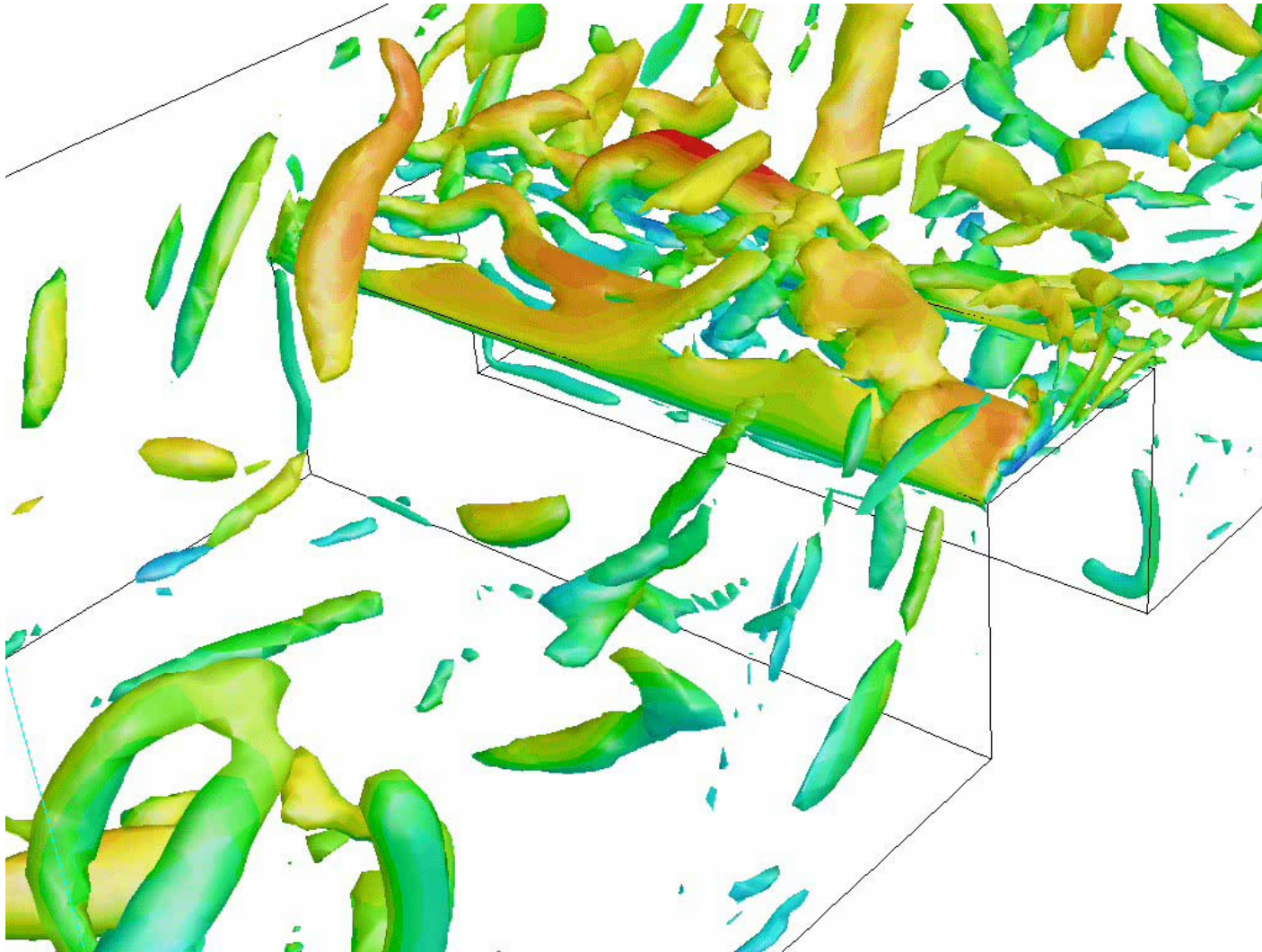
Forgó struktúra



Örvények mozgása a borda körül (Q=1500 felületek)



Örvények mozgása a borda körül (Q=200 felületek)



Feltételes átlagolás

-örvények szerepének, tulajdonságainak megértése-

Osztályok:

$$Q_I = \{x; x \in \mathfrak{R} \wedge x < 0\}$$

$$Q_{II} = \{x; x \in \mathfrak{R} \wedge 0 < x < 200\}$$

$$Q_{III} = \{x; x \in \mathfrak{R} \wedge 200 < x < 1500\}$$

$$Q_{IV} = \{x; x \in \mathfrak{R} \wedge 1500 < x\}$$

Indikátor függvény:

$$I_\alpha(x, t) = \begin{cases} 1 & Q(x, t) \in Q_\alpha \\ 0 & Q(x, t) \notin Q_\alpha \end{cases} \quad \alpha \in \{I, II, III, IV\}$$

Feltételes átlagolás:

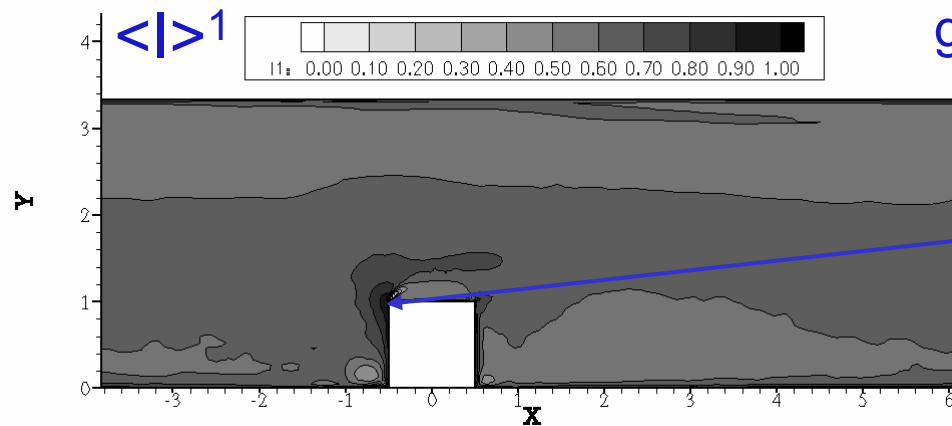
$$\langle \varphi \rangle^\alpha \doteq \frac{\langle \varphi I_\alpha \rangle}{\langle I_\alpha \rangle} \quad (\text{osztályon belüli átlag})$$

Átlagolt mennyiségek:

$$\langle I_\alpha \rangle \quad \langle U_i \rangle^\alpha \quad \langle U_i U_j \rangle^\alpha \quad \langle P \rangle^\alpha \quad \langle P^2 \rangle^\alpha \quad \langle S_{ij} S_{ij} \rangle^\alpha \quad \langle \Omega_{ij} \Omega_{ij} \rangle^\alpha$$

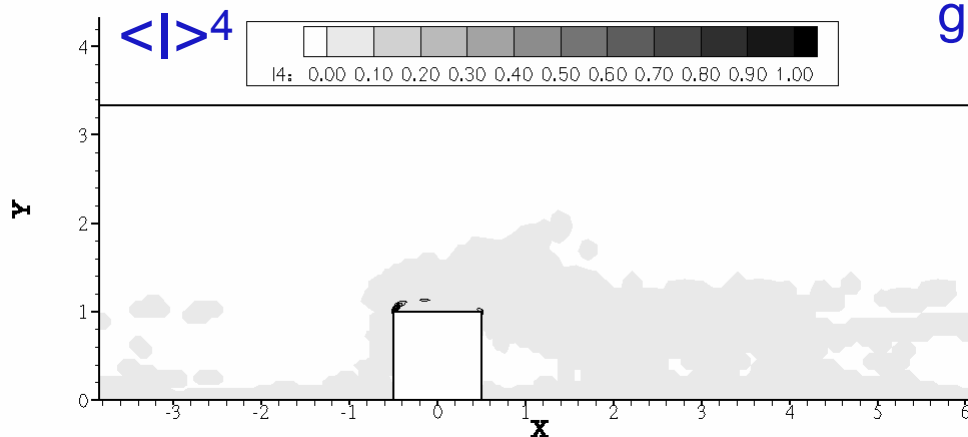
Feltételes átlagolás eredmény a középsíkban

Örvénymentesség ($Q < 0$)
gyakorisága



Ritka az örvények
jelenléte

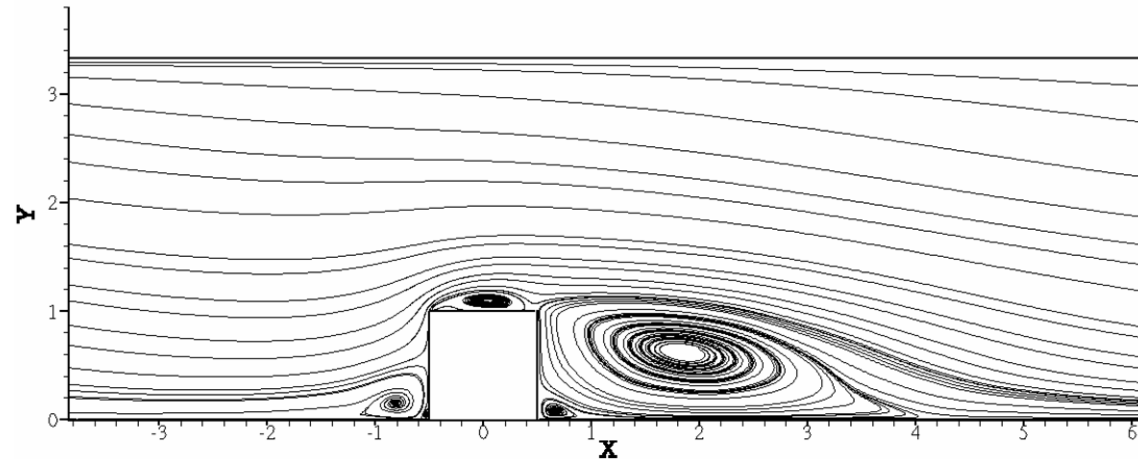
Erős örvények ($Q > 1500$)
gyakorisága



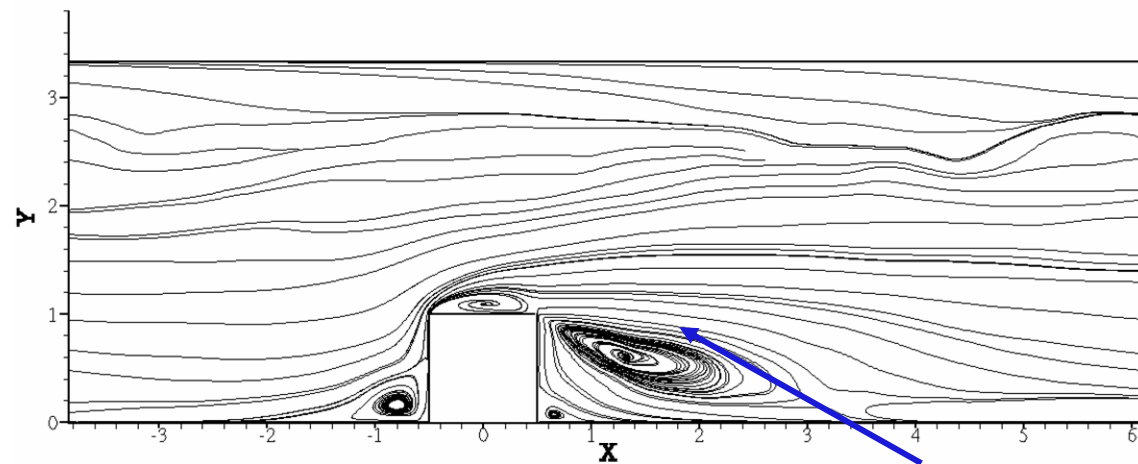
Csak itt vannak nagy
Q-jú örvények

Feltételes átlagolás eredmény a középsíkban

Áramkép a szimmetria síkban



Egész áramlásra átlagolt



$Q > 200$ átlagolt
(Az örvények mozgása)

Az „örvények” lefelé repülnek

Összefoglalás

➤ FLUENT-et lehet használni LES-re, sőt jövőben: nem iteratív időlépés, „jobb” sémák, örvényeket tartalmazó belépő peremfeltételek, dinamikus SGS modell

➤ Validáció:

A fő jellemzők megegyeznek

Lokális problémák (problémák a fal közelében)

➤ Az átlagos áramkép fő struktúráinak leírása

Szekunder áramlás magyarázata

Forgó struktúrák Q szintfelületekkel és síkbeli áramképekkel

Az átlagos áramkép keverése

➤ Nagy Reynolds feszültségű zónák feltüntetése

➤ Előzetes eredmények feltételes átlagolással

Jövőbeli tervek

- Részletesebb, hosszabb filmek
- Feltételes átlagolás további kiértékelése
- Hőátadás kiértékelése
- Eredmények természetes koordináta rendszerben
- Új számítások:
 - Ferdén bordázott csatorna

Köszönöm a figyelmet!

- Kérdések...
- Megjegyzések...
- Javaslatok...

Fontosabb irodalmak

➤ LES:

- Pope, S. (2000). *Turbulent Flows*
- Sagaut P. (2002). *Large Eddy Simulation for incompressible Flows. An Introduction* 2nd Edition, Springer
- Piomelli, U. (1999). *Large-Eddy and Direct Simulation of Turbulent Flows*

➤ Koherens struktúrák:

- Hunt, J. C. R. Wray, A. A. and Moin, P. (1988). Eddies, Streams, and Convergence Zones in Turbulent Flows *Center for Turbulence research, Proceedings of the summer Program.*
- Dubief, Y. and Delcayre, F. (2000). On coherent-vortex identification in turbulence. *Journal of Turbulence*, **1**, 011
- Lesieur, M. Begou, P. Briand, E. Danet, A. Delcayre F. and Aider J. L. (2003). Coherent-vortex dynamics in large-eddy simulations of turbulence, *Journal of Turbulence*, **4**, 016

Fontosabb irodalmak

➤ Topológiai analízis:

- Hornung, H. and Perry, A. E. (1984). Some aspect of three dimensional separation Part I.: Streamsurface bifurcations. *Zeitschrift für Flugwissenschaften und Weltraumforschung*, **8**, 77-87.
- Haines, R. and Kenwright, D. (1999). *On the velocity gradient tensor and fluid feature extraction*. AIAA Paper No. 99-3288, Norfolk VA, June, 1999.
- Sujudi, D. and Haines, R. (1995). Identification of Swirling Flow in 3D Vector Fields. *Tech. Report, Dept. of Aeronautics and Astronautics, MIT, Cambridge, MA*

Fontosabb irodalmak

➤ Saját, témabeli:

- Lohász, M. M., Rambaud, P. and Benocci, C. (2003). LES simulation of ribbed square duct flow with Fluent and comparison with PIV data. *Conference on Modelling Fluid Flow CMFF'03 The 12th International Conference on Fluid Flow Technologies, Budapest, Hungary*
- Lohász, M. M., Rambaud, P., Benocci, C. (2004). LES computation of flow in a ribbed square duct using fluent and comparison to PIV *Topical Problems of Fluid Mechanics 25th February, Prague*
- Lohász, M. M., Rambaud, P., and Benocci, C. (2004). MILES flow inside a square section ribbed duct. *RTO Meeting, AVT-120 Workshop on "Urban Dispersion Modelling" April 1-2., Rhode Saint Genèse, Belgium*
- Lohász, M. M., Rambaud, P., Benocci, C. (2005). Flow Features in a fully developed ribbed Duct Flow as a Result of LES *ERCOFTAC Int. Symposium on Engineering Turbulence Modelling and Measurements, ETMM6, May 23-25, 2005, Sardinia, Italy (accepted)*