



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Vasúti Járművek, Repülőgépek és Hajók Tanszék
Budapest, 1111, Sztoczek u. 6. J. ép. 4. em.
Tel: +36-1-463-1922, Fax: +36-1-463-30-80

Numerikus áramlástan és alkalmazása járművek hő- és áramlástechnikai berendezéseiben lezajló folyamatok modellezésére

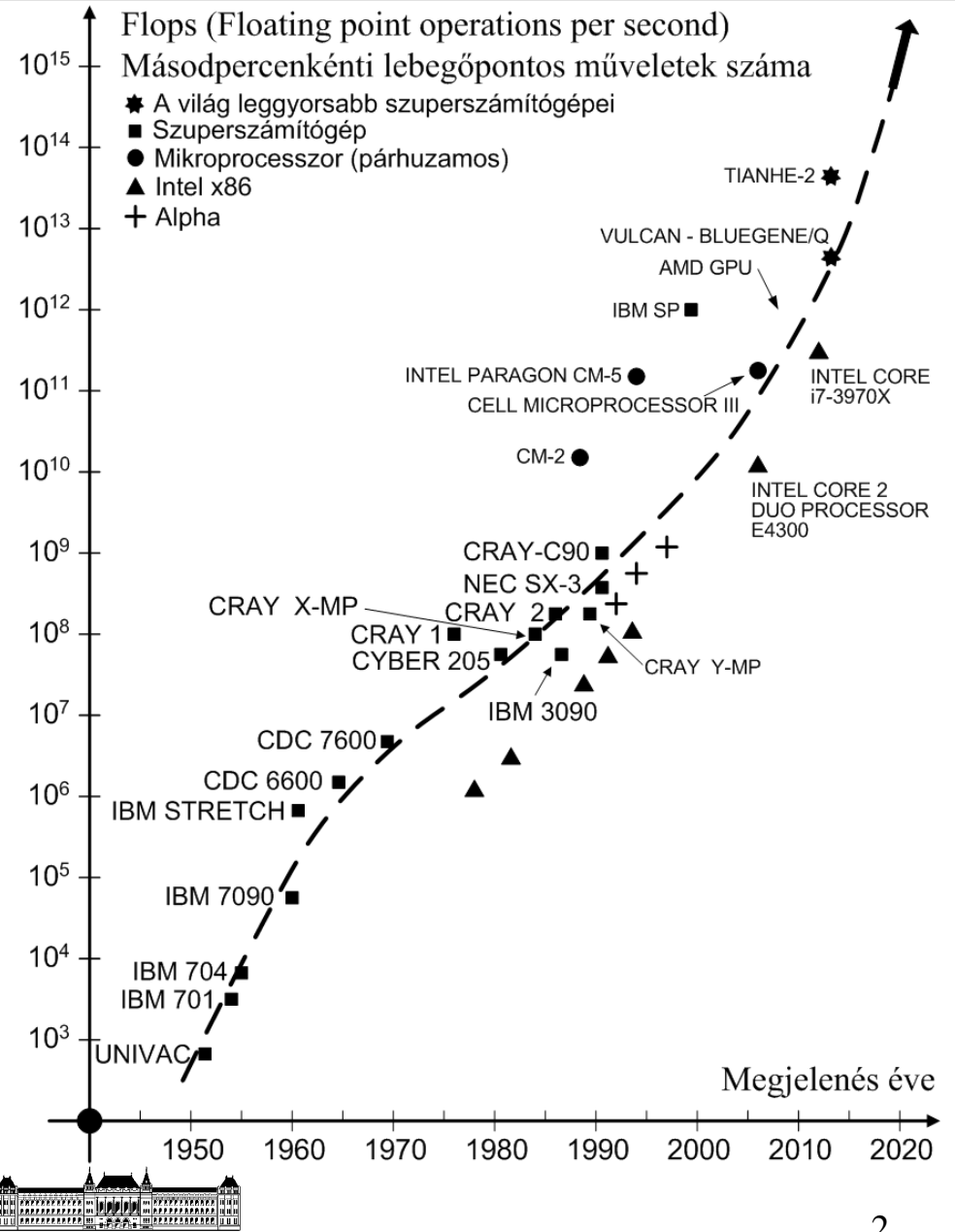
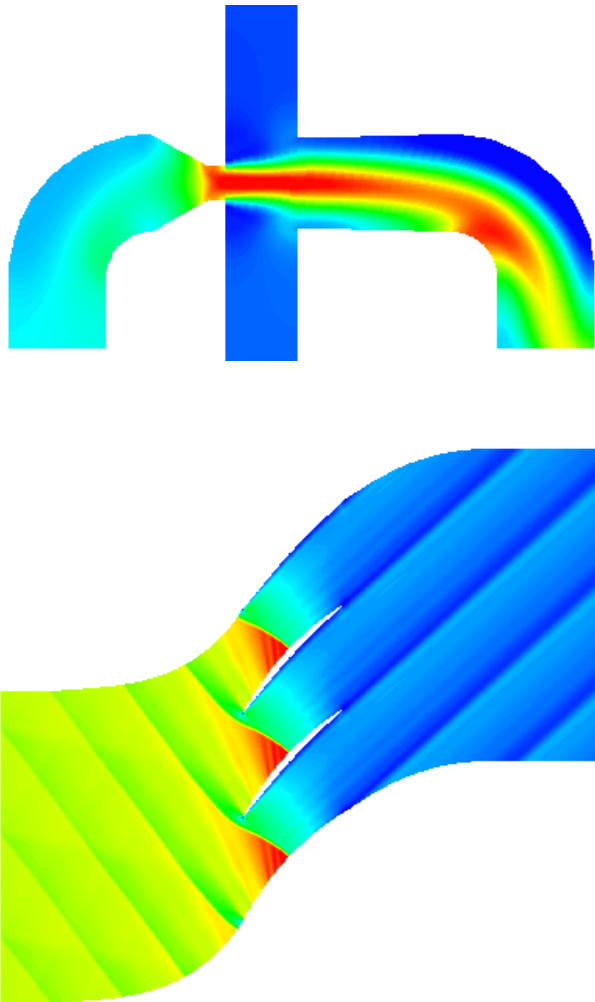
JÁHBER I.

Dr. Veress Árpád
egyetemi docens

Budapest, 2020-09-07



Aktualitás

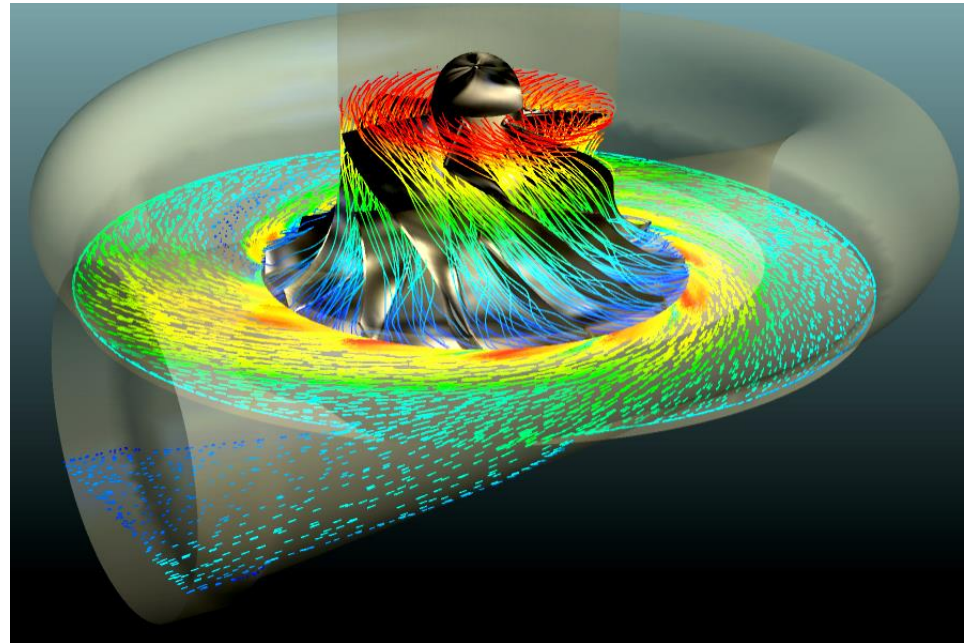
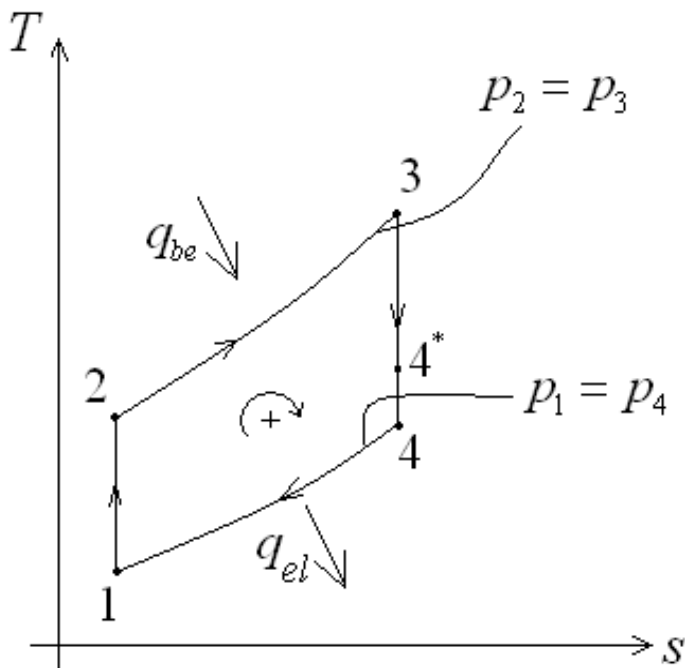


Közelítési elvek és alkalmazhatósági feltételek

Fizikai folyamatok leírása → mérnöki számítások → alapvető közelítési elvek :

1. Koncentrált paraméterű

2. Elosztott paraméterű



Termodinamika, hőközlés és áramlástan → Egyenletek alkalmazhatóságának vizsgálata



Áramlásmodellezés – Kontinuum-mechanika alapján

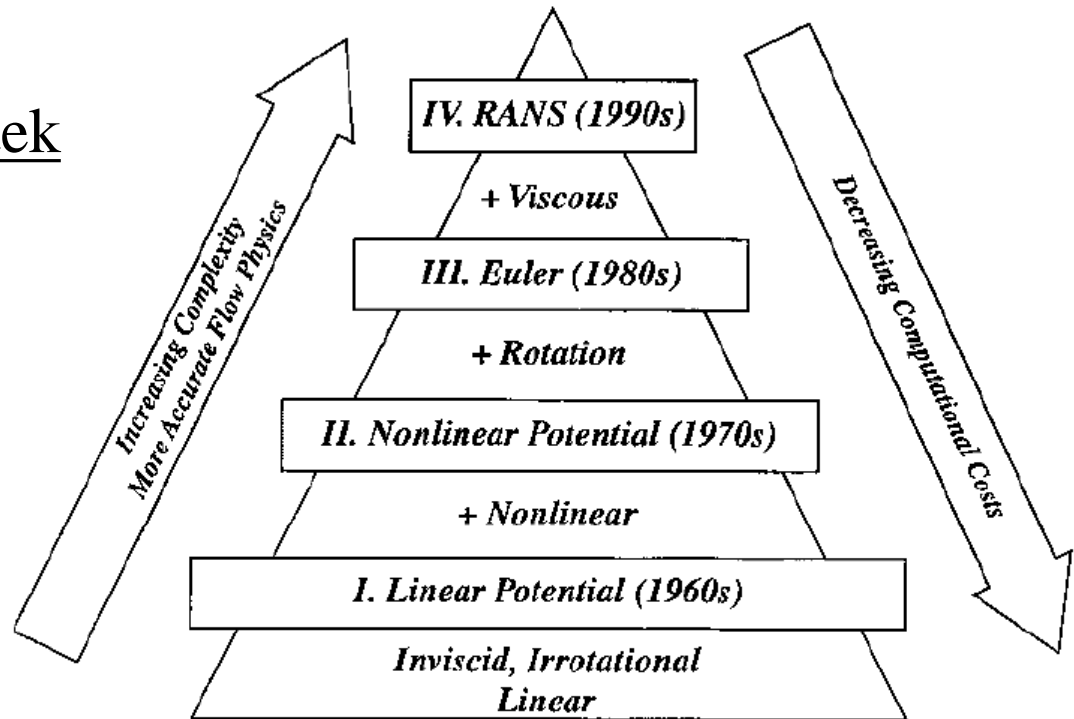
Navier-Stokes egyenletek

*Ideális =
Súrlódásmentes =
Nem viszkózus*

Euler egyenletek

*Izentrópikus,
örvénymentes*

Potenciál egyenletek



Hierarchy of Fluid Flow Models

Forrás: Antony Jameson: A perspective on computational algorithms for aerodynamic analysis and design, Progress in Aerospace Sciences, Volume 37, Issue 2, February 2001, Pages 197–243

<http://aero-comlab.stanford.edu/Papers/SEVILLE.pdf> (2013.09.01.)



Áramlásmodellezés – Kontinuum-mechanika alapján

Navier-Stokes egyenletek

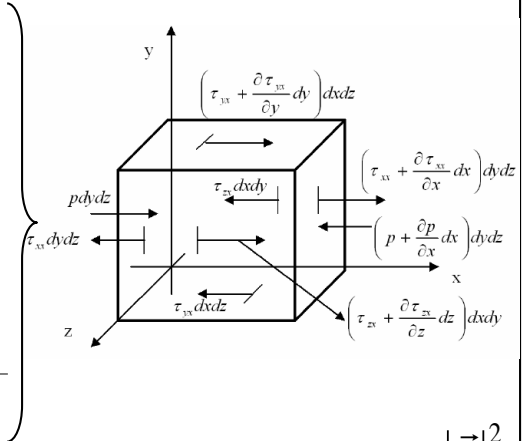
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad \longrightarrow \quad \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} = 0 \quad \xrightarrow{\iiint_V} \quad \iint_A \rho u dA = \rho u A = \text{Állandó}$$

$$\boxed{F = ma}$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2 + p)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} = \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z}$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho vu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2 + p)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} = \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z}$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho wu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho wv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w^2 + p)}{\partial z} = \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z}$$



$$\boxed{P = Fv}$$

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u H)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v H)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w H)}{\partial z} = \frac{\partial(u \tau_{xx} + v \tau_{xy} + w \tau_{xz} + k \partial T / \partial x)}{\partial x} + \frac{\partial(u \tau_{yx} + v \tau_{yy} + w \tau_{yz} + k \partial T / \partial y)}{\partial y} + \frac{\partial(u \tau_{zx} + v \tau_{zy} + w \tau_{zz} + k \partial T / \partial z)}{\partial z}$$

$$E = c_v T + \frac{|\vec{V}|^2}{2}$$

$$H = c_p T + \frac{|\vec{V}|^2}{2}$$

$$\downarrow p = \rho R T$$



Áramlásmodellezés – Kontinuum-mechanika alapján

Navier-Stokes egyenletek

Az előző oldalon felírt nemlináris parciális differenciál-egyenletrendszer (a matematikai modell) érvényességi (alkalmazhatósági) feltételei fizikai szempontból:

- Összenyomható ideális gáz relatív, nyugvó rendszerben,
- Folytonos anyag (kontinuum), lehet lamináris és turbulens áramlás is,
- Homogén (egyféle anyag) izotróp anyagtulajdonsággal,
- Tranziens folyamatok figyelembevétele,
- Valóságos (súrlódásos) áramlás,
- Erőtérmentes áramlás (nincs gravitáció, mágneses tér, stb.),
- Forrás és nyelőmentes áramlás,
- Konzervatív forma → szakadások (kontakt szakadás, örvényvonal és lökéshullám) leírására alkalmas.

$$v_{n,1} - v_{n,2} = [v_n] = 0; [p] = 0;$$

$$[\rho] \neq 0; [v_t] = 0;$$

$$[v_n] = 0; [p] = 0;$$

$$[\rho] \neq 0; [v_t] \neq 0;$$

$$[v_n] \neq 0; [p] \neq 0;$$

$$[\rho] \neq 0; [v_t] = 0;$$



Mi az a CFD (Computational Fluid Dynamics) ?

- A CFD a számítógépes áramlás-modellezés rövid angol elnevezése
- Az áramlás matematikai-fizikai modellezése számítógépek segítségével
- A modern tervezési folyamatok alapvető összetevője
- Hozzásegít jobb, olcsóbb és biztonságosabb járművekhez, termékekhez és folyamatokhoz
- Hatékony eszköz lehet el nem végezhető, költséges folyamatok szimulációjára
- A verifikáció mellett, érvényessége kísérletekkel, illetve egyéb tesztesetekkel (benchmark) ellenőrizendő



A CFD előnyei

- Az ipari alkalmazások 80 %-ban 5-10% százalék alatti pontossággal képes visszaadni a valóságot.
- A termék teljes életciklusában alkalmazható (az előfejlesztéstől az újrahasznosításig).
- Alkalmazásával jelentős költség, kapacitás és idő takarítható meg a költséges mérésekkel szemben, hiszen a virtuális valóságban módosítani és analizálni egy terméket összehasonlíthatatlanul gyorsabb, mint újra legyártani és mérni.
- A sokféle vizualizációs technikának köszönhetően jobban megérthetők a fizikai jelenségek, mint kísérletek esetén.
- Többféle fizika vizsgálható egyszerre elfogadható számítógépi kapacitás-igénnyel.



A CFD előnyei

- Olyan esetekben is alkalmazható, ahol nem lehet mérni (pl. működő atomerőmű belsejében, idegen bolygók légkörében), illetve a mérőműszer jelentősen megzavarná a mérendő mennyiséggel kapcsolatos folyamatot.
- A numerikus áramlástanai számítások parametrizálhatók, könnyen reprodukálhatók és automatizálhatók.
- Az alkalmazott numerikus módszerek optimalizációs algoritmusokkal kapcsolhatók össze
- Egy teljes fejlesztési folyamat nem alapulhat kizárólag számításokra. Validációra mindenképp szükség van.



Fontosabb alkalmazási területek

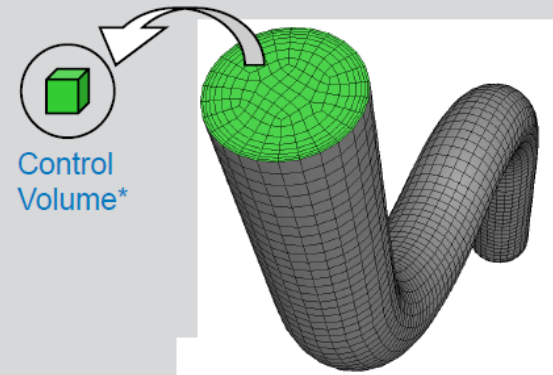
- Gépjárműgyártás: kocsiszekrény aerodinamika, utastér ventiláció, légkondicionálás, motor, stb.
- Repülőipar (külső, belső és lapátrácsba való áramlás)
- Hő- és áramlástan gépek
- Biztonságtechnika: tűz- és füstterjedés előrejelzés, robbanás és egyéb véletlenszerű események modellezése
- Gyártási folyamatok: hatásfoknövelés a könnyű-, a nehéz-, a vegy-, és az élelmiszeriparban
- Meteorológia: hosszú és rövid távú időjárás-előrejelzés, globális klíma modellek
- Környezetvédelem: szennyezés terjedés az atmoszférában
- Épületgépészet: épület fűtés és szellőzés analízis
- Csillagászat



A CFD működésének rövid összefoglalása

How Does CFD Work?

- ANSYS CFD solvers are based on the finite volume method
 - Domain is discretized into a set of control volumes
 - General conservation (transport) equations for mass, momentum, energy, species, etc. are solved on this set of control volume



$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \phi dV}_{\text{Unsteady}} + \underbrace{\oint_A \rho \phi \mathbf{V} \cdot d\mathbf{A}}_{\text{Convection}} = \underbrace{\oint_A \Gamma_\phi \nabla \phi \cdot d\mathbf{A}}_{\text{Diffusion}} + \underbrace{\int_V S_\phi dV}_{\text{Generation}}$$

- Partial differential equations are discretized into a system of algebraic equations
- All algebraic equations are then solved numerically to render the solution field

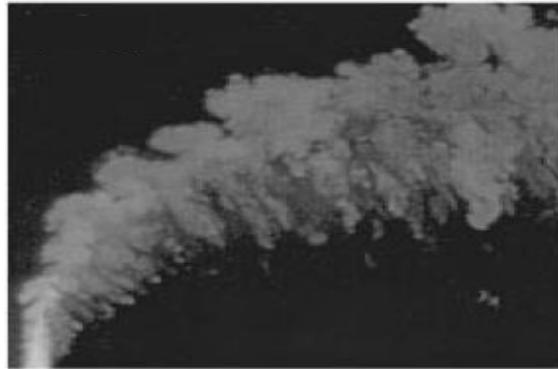
<u>Equation</u>	ϕ
Continuity	1
X momentum	u
Y momentum	v
Z momentum	w
Energy	h

Forrás: Introduction to ANSYS CFX, Lecture 02 – Introduction to CFD, CFX-Intro_14.0_L02_IntroCFD_CFX.pdf (2013.09.01.)



Áramlásmodellezés – Kontinuum-mechanika alapján

Navier-Stokes egyenletek – turbulens áramlás



Áramlásmodellezés – Kontinuum-mechanika alapján

Navier-Stokes egyenletek – turbulens áramlás - elmélet

- The Reynolds number is the criterion used to determine whether the flow is **laminar** or **turbulent**

$$Re_L = \frac{\rho \cdot U \cdot L}{\mu}$$

- The Reynolds number is based on the length scale of the flow:

$$L = x, d, d_{\text{hyd}}, \text{ etc.}$$

- Transition to Turbulence varies depending on the type of flow:

- External flow

- along a surface : $Re_x > 500\,000$

- around on obstacle : $Re_L > 20\,000$

- Internal flow : $Re_D > 2\,300$

Forrás: Introduction to ANSYS CFX, Lecture 07 - Turbulence, CFX-Intro_14.0_L07_Turbulence .pdf (2013.09.01.)



Áramlásmodellezés – Kontinuum-mechanika alapján

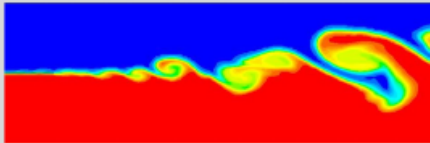
NS egyenletek – szimulációs közelítések - elmélet

Overview of Computational Approaches

- Different approaches to make turbulence computationally tractable

DNS

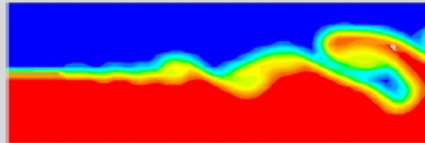
(Direct Numerical Simulation)



- Numerically solving the full unsteady Navier-Stokes equations
- Resolves the whole spectrum of scales
- No modeling is required
- **But the cost is too prohibitive!**
Not practical for industrial flows!

LES

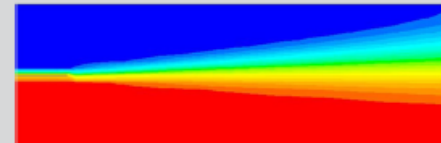
(Large Eddy Simulation)



- Solves the spatially averaged N-S equations
- Large eddies are directly resolved, but eddies smaller than the mesh are modeled
- **Less expensive than DNS, but the amount of computational resources and efforts are still too large for most practical applications**

RANS

(Reynolds Averaged Navier-Stokes Simulation)



- Solve time-averaged Navier-Stokes equations
- All turbulent length scales are modeled in RANS
- Various different models are available
- **This is the most widely used approach for calculating industrial flows**

Forrás: Introduction to ANSYS CFX, Lecture 07 - Turbulence, CFX-Intro_14.0_L07_Turbulence .pdf (2013.09.01.)



Áramlásmodellezés – Kontinuum-mechanika alapján RANS egyenletek – Diszkretizáció - CFX

- **finite difference**, in which the differential terms are discretised for each element

- **finite volume**, in which the governing equations are integrated around the mesh elements

- **finite element**, in which variation of variables within elements is approximated by a function, and a residual (or error term) is minimised.

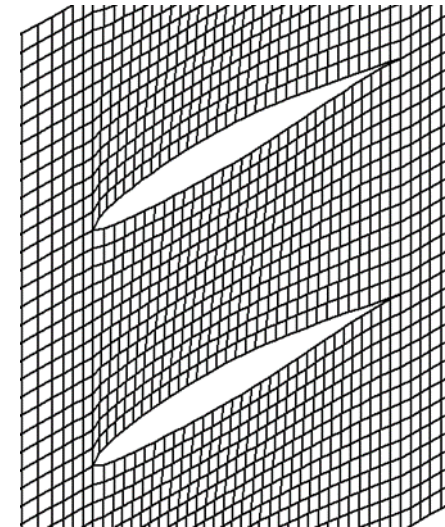
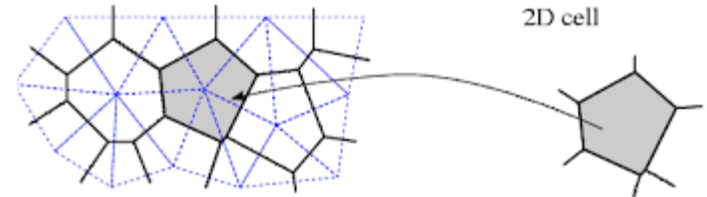
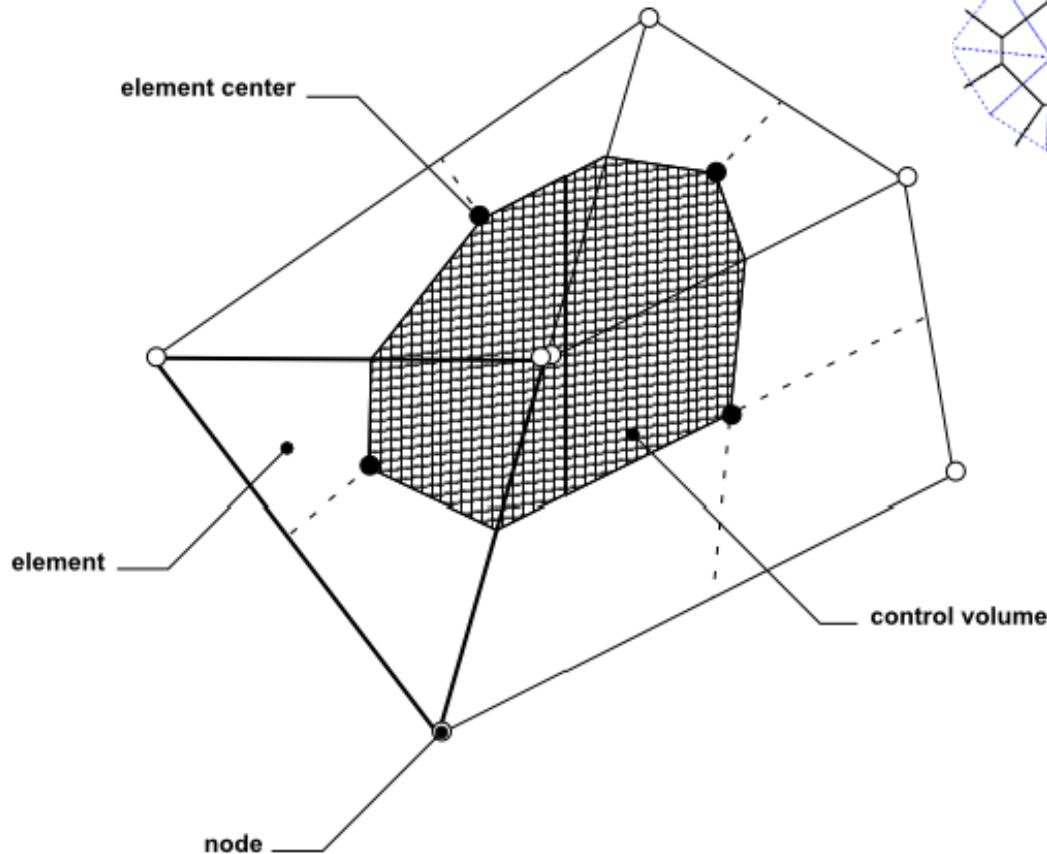
Forrás: www.tech.plym.ac.uk/sme/dsgn313/CFDNotes06.ppt (2013. 09.01)



Áramlásmodellezés – Kontinuum-mechanika alapján

RANS egyenletek – Diszkretizáció - CFX

Control Volume Definition



Forrás: ANSYS CFX-Solver Theory Guide, ANSYS Inc., Southpointe, 275 Technology Drive, Canonsburg, PA 15317, October 2012



Áramlásmodellezés – Kontinuum-mechanika alapján

RANS egyenletek – Diszkretizáció - CFX

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}_j} (\rho U_j) = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho U_i) + \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}_j} (\rho U_j U_i) = - \frac{\partial P}{\partial \mathbf{x}_i} + \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}_j} \left(\mu_{eff} \left(\frac{\partial U_i}{\partial \mathbf{x}_j} + \frac{\partial U_j}{\partial \mathbf{x}_i} \right) \right)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varphi) + \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}_j} (\rho U_j \varphi) = \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}_j} \left(\Gamma_{eff} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial \mathbf{x}_j} \right) \right) + S_\varphi$$

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho dV + \int_s \rho U_j dn_j = 0$$

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho U_i dV + \int_s \rho U_j U_i dn_j = - \int_s P dn_j + \int_s \mu_{eff} \left(\frac{\partial U_i}{\partial \mathbf{x}_j} + \frac{\partial U_j}{\partial \mathbf{x}_i} \right) dn_j + \int_V S_{U_i} dV$$

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \varphi dV + \int_s \rho U_j \varphi dn_j = \int_s \Gamma_{eff} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial \mathbf{x}_j} \right) dn_j + \int_V S_\varphi dV$$

Forrás: ANSYS CFX-Solver Theory Guide, ANSYS Inc., Southpointe, 275 Technology Drive, Canonsburg, PA 15317, October 2012



Áramlásmodellezés – Kontinuum-mechanika alapján

RANS egyenletek – Diszkretizáció - CFX

$$V \left(\frac{\rho - \rho^o}{\Delta t} \right) + \sum_{ip} \dot{m}_{ip} = 0$$

$$V \left(\frac{\rho U_i - \rho^o U_i^o}{\Delta t} \right) + \sum_{ip} \dot{m}_{ip} (U_i)_{ip} = \sum_{ip} (P \Delta n_i)_{ip} + \sum_{ip} \left(\mu_{eff} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \Delta n_j \right)_{ip} + \overline{S_{U_i}} V$$

$$V \left(\frac{\rho \varphi - \rho^o \varphi^o}{\Delta t} \right) + \sum_{ip} \dot{m}_{ip} \varphi_{ip} = \sum_{ip} \left(\Gamma_{eff} \frac{\partial \varphi}{\partial x_j} \Delta n_j \right)_{ip} + \overline{S_{\varphi}} V$$

- a következő iterációs időlépés paramétereit. Az algebrai egyenletrendszer megoldása: implicit első v. másodrendű Backward Euler módszerrel

Forrás: ANSYS CFX-Solver Theory Guide, ANSYS Inc., Southpointe, 275 Technology Drive, Canonsburg, PA 15317, October 2012



CFD feladat főbb lépései

Pre-processzálás

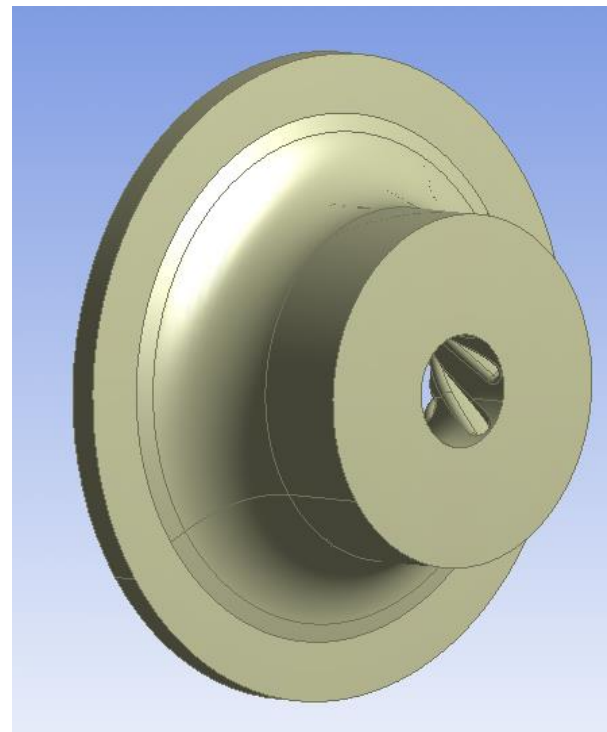
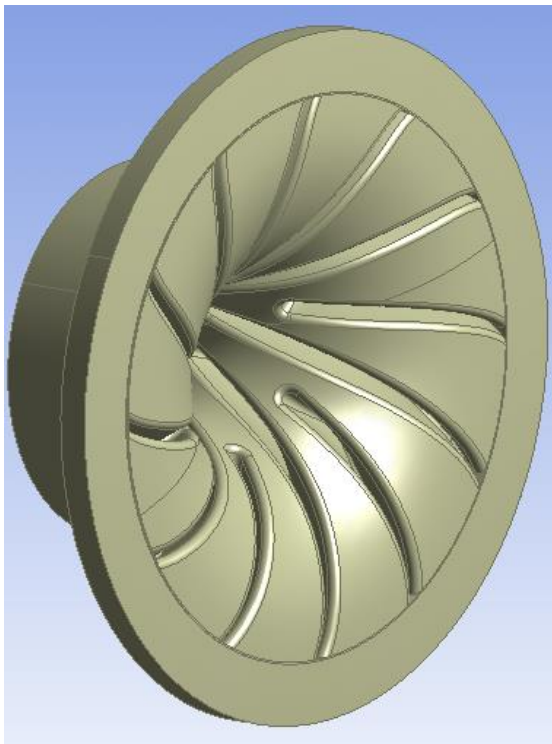
- Célkitűzés, a megoldandó feladat áttekintése és lefordítása a modellezéssel kezelhető formára, idő és ütemterv (esetleg árajánlat) elkészítése,
- Geometriai modellalkotás (áramlási tér),
- A numerikus háló elkészítése,
- Anyagtulajdonságok definiálása,
- Kapcsolódó fizikai modellek és paramétereik beállítása,
- Peremfeltételek megadása és a geometriához rendelése,
- Kezdeti feltételek megadása,
- A megoldó tulajdonságainak beállítása,
- A számítás elindítása és a konvergencia értékelése,
- Az eredmények megtekintése, elemzése és értékelése.
- Validáció (ha van rá lehetőség) és verifikáció.
- Paraméter érzékenységi vizsgálatok elvégzése. Szükség szerint javaslattétel a javító intézkedések meghozására és ellenőrzése.
- Dokumentáció elkészítése.

Post-processzálás



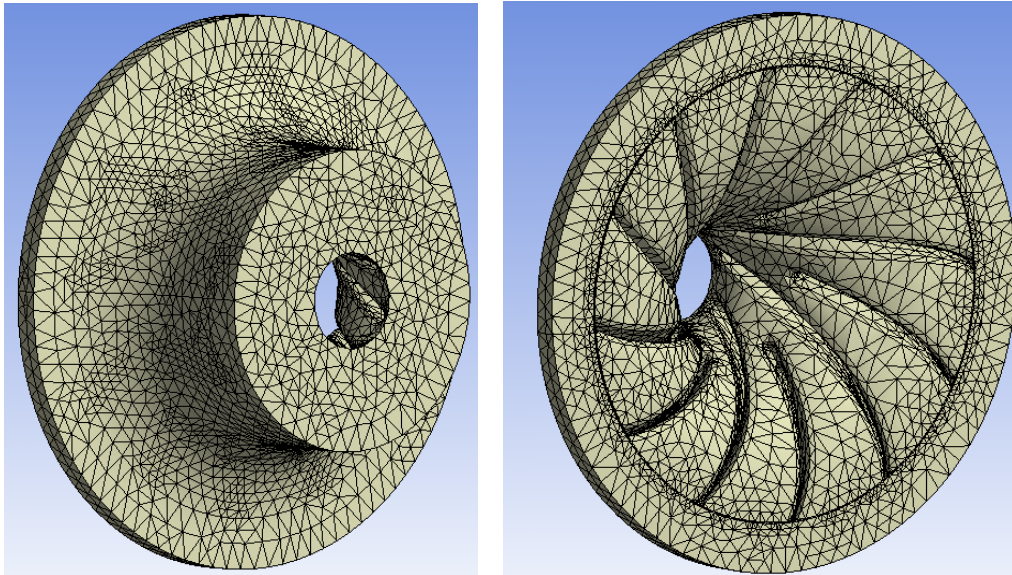
CFD feladat főbb lépései

Geometria – áramlástanai tér



CFD feladat főbb lépései

Geometriai diszkretizáció



Centrifugál kompresszor-forgórész áramlási terének modellje. (A háló elemek méretét és minőségét, különösen a nagy gradienseket tartalmazó helyeken, addig kell javítani, ameddig nem lesz hatással a végeredményre.)



CFD feladat főbb lépései - Geometriai diszkretizáció

Meshing: Capture Flow Physics

- **Grid must be able to capture important physics:**
 - Boundary layers
 - Heat transfer
 - Wakes, shock
 - Flow gradients
- **Boundary layers:**
 - Velocity and temperature
 - 10-15 elements
 - Expansion ratios:
 - $\leq 1.2 \dots 1.3$
 - $y^+ \approx 1$ for heat transfer and transition modeling

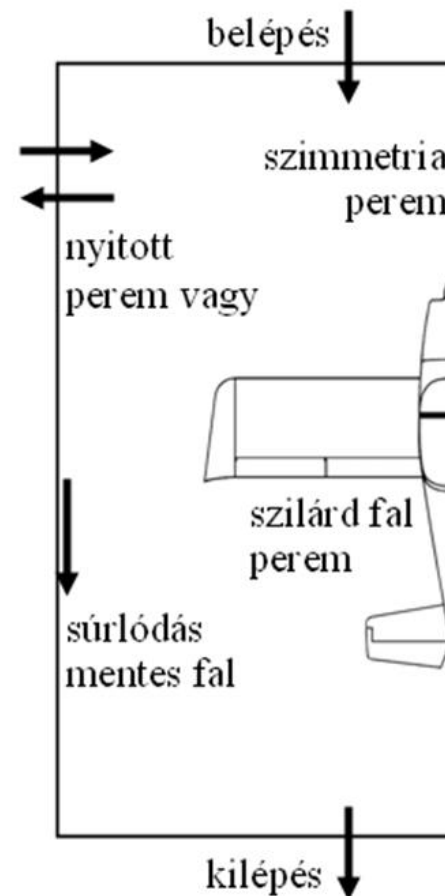
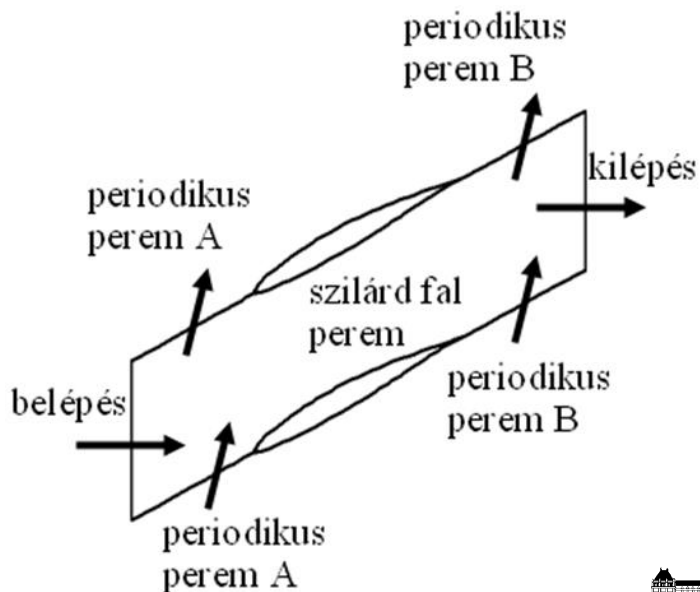
Forrás: Introduction to ANSYS CFX, Lecture 10 - Best Practice Guidelines - CFX-Intro_14.0_L10_BestPractices (2013.09.01.)



CFD feladat főbb lépései

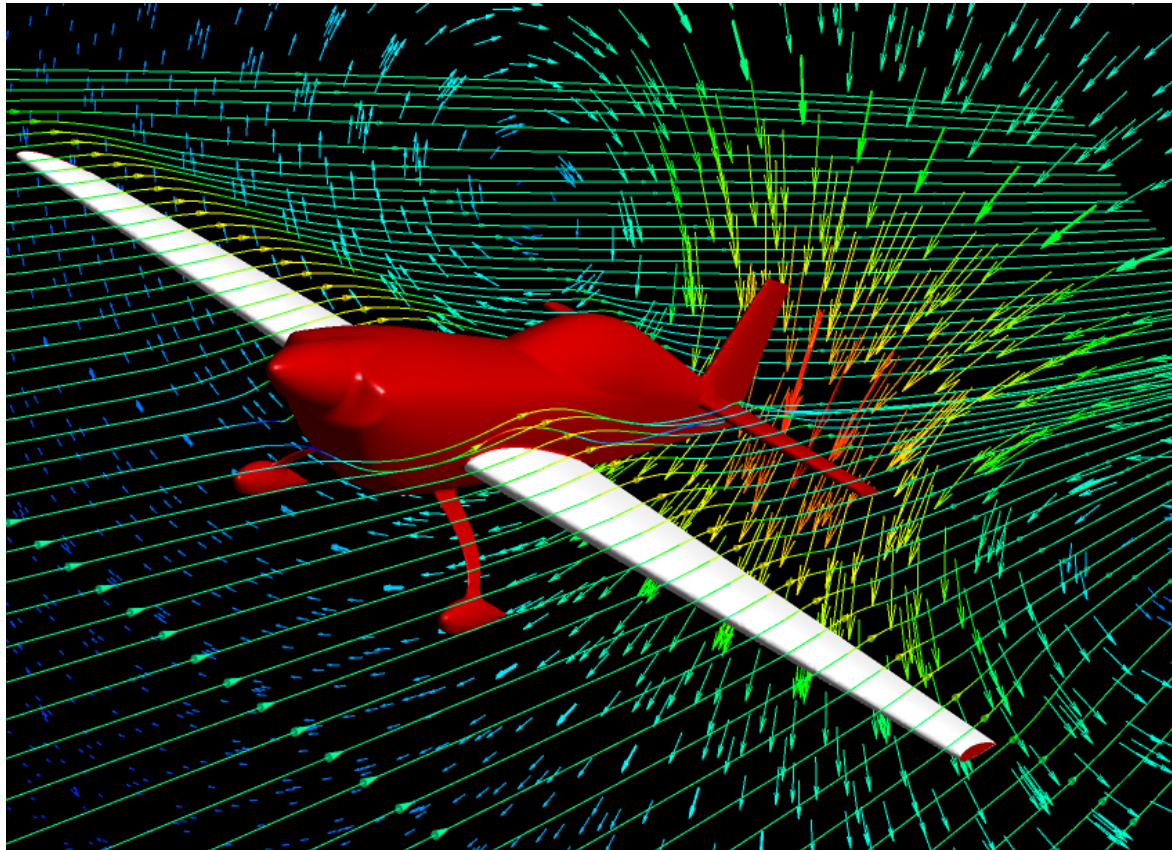
Peremfeltételek definiálása és anyagtulajdonságok megadása

Jellemző peremfeltételek CFD számítások esetén; belépés, kilépés, szilárd fal, nyitott és periodikus perem (megj.: a peremeket olyan távol célszerű felvenni a geometriától, hogy annak zavaró hatása lehetőleg ne terjedjen el a peremig (pl. kilépő peremnél visszaáramlás, áramvonalak ne lépjenek ki, illetve be a nyitott (távoltéri) peremnél), illetve ne legyen hatása a végeredményre a cellaszám minimalizálása és az eredmények hálófüggetlensége mellett)



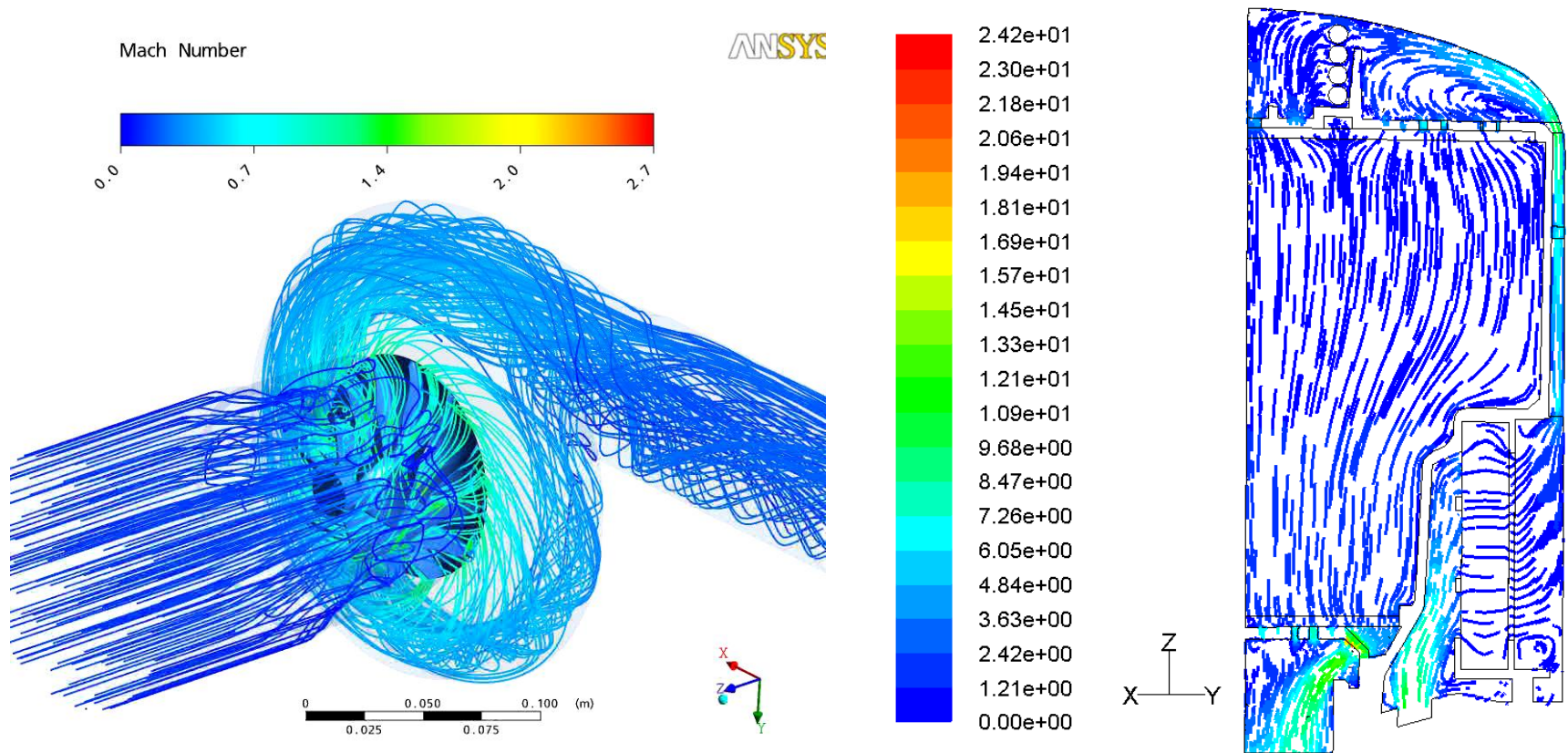
CFD feladat főbb lépései

Eredmények megjelenítése



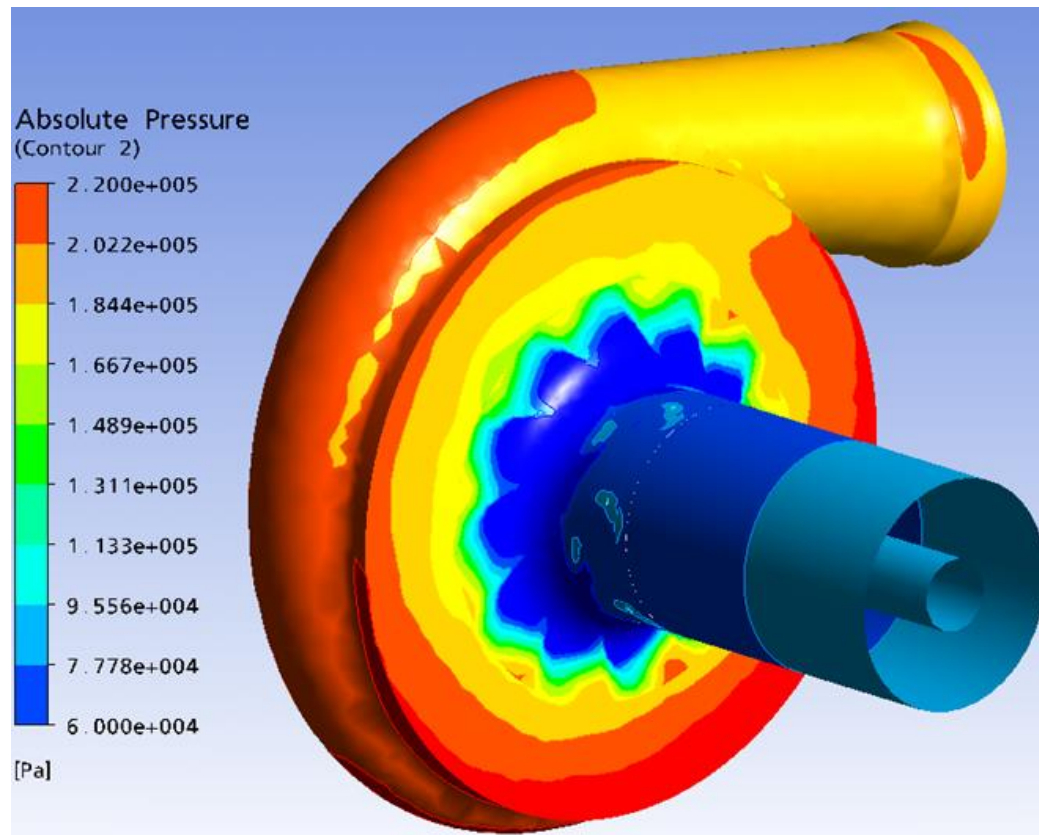
CFD feladat főbb lépései

Eredmények megjelenítése



CFD feladat főbb lépései

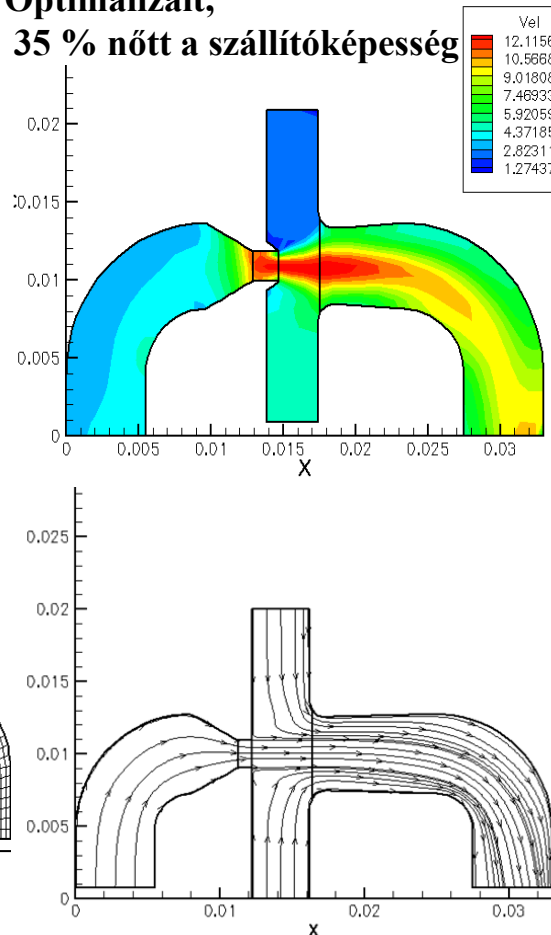
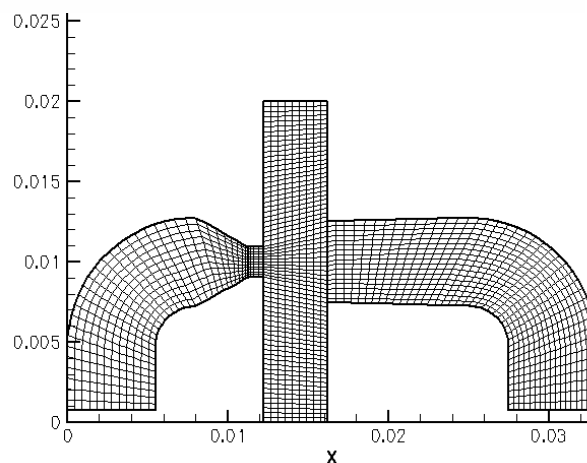
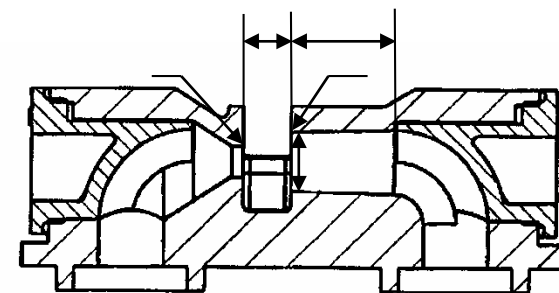
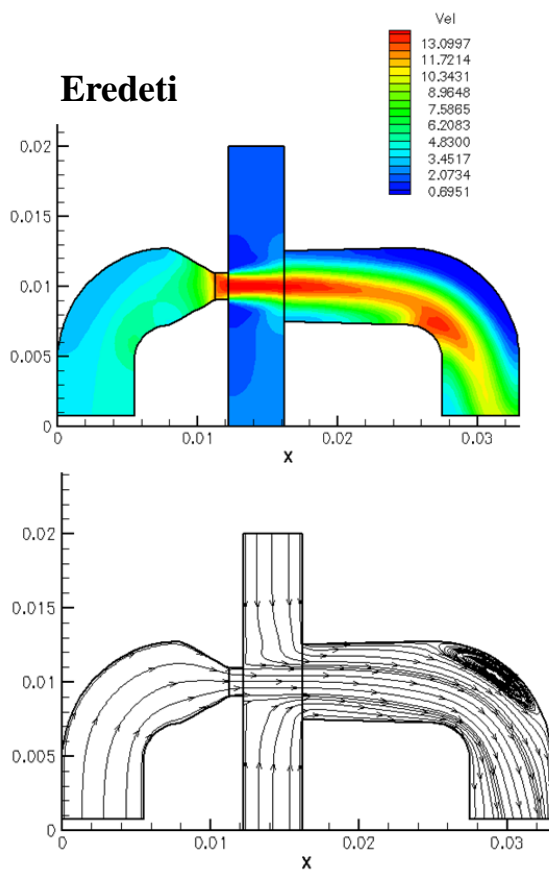
Eredmények megjelenítése



Tüzelőanyag sugárszivattyú direkt numerikus optimalizálása - Ipari alkalmazás I.

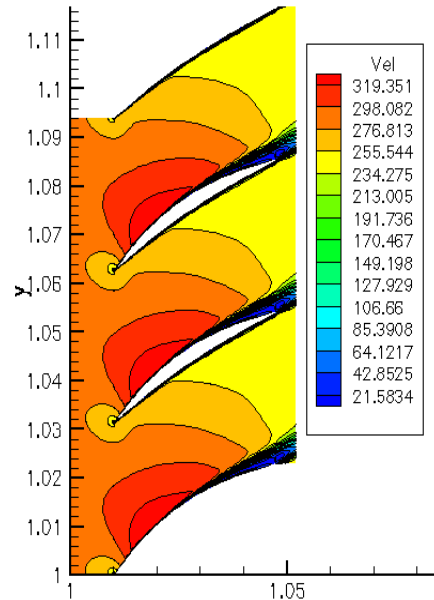
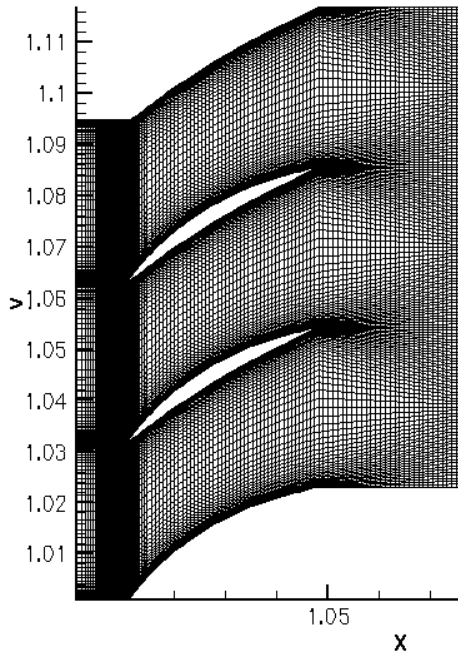
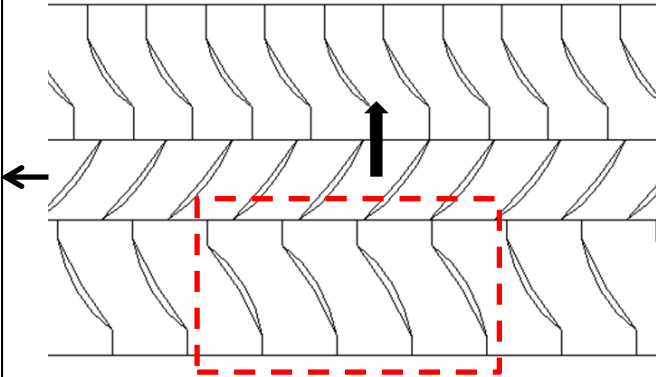
- Tanszéki fejlesztésű szoftver
- 2D-s Euler egyenletek
- Chorin pseudo-kompresszibilitási módszere
- Explicit véges térfogat módszer negyed rendű Runge-Kutta módszerrel

**Optimalizált,
35 % nőtt a szállítóképesség**

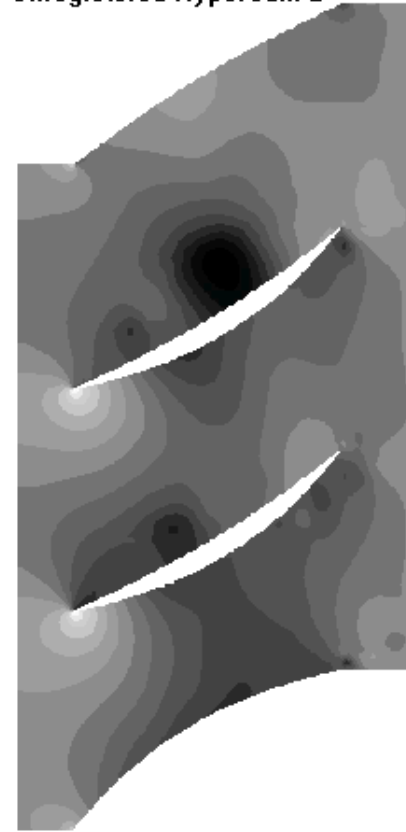


Lapátrács numerikus áramlástanai vizsgálata - Ipari alkalmazás II.

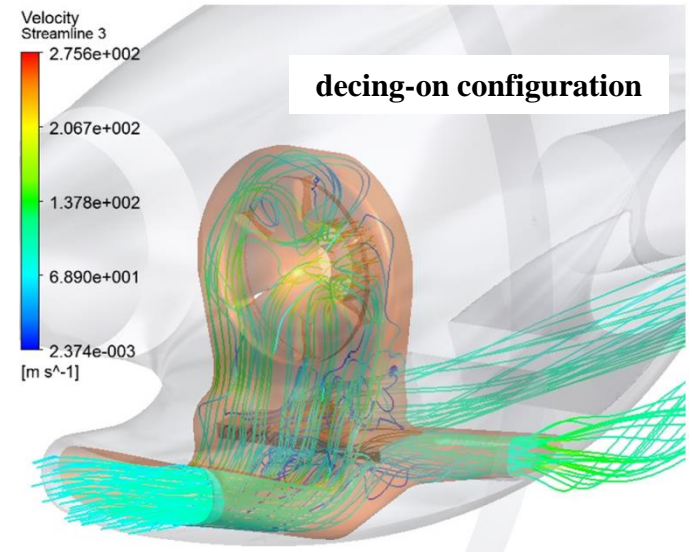
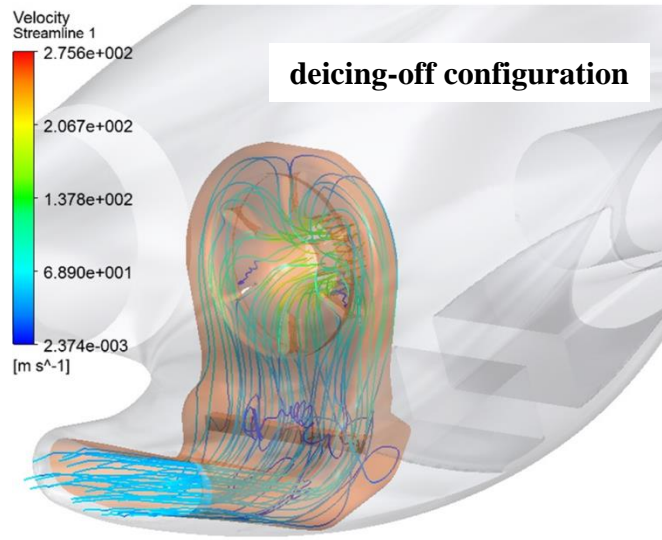
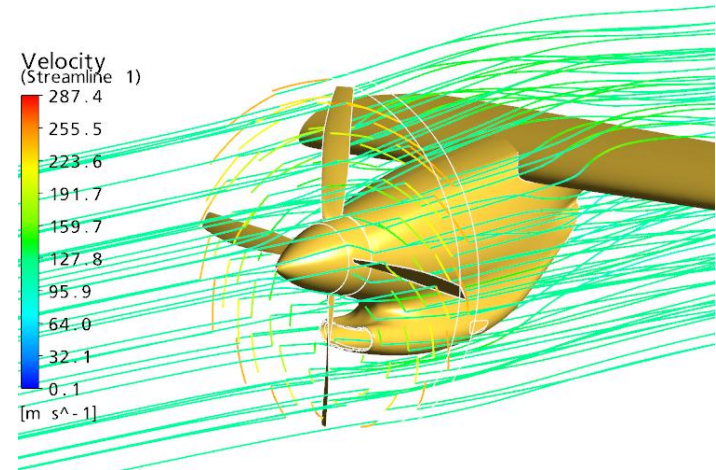
- Tanszéki fejlesztésű szoftver
- 2D-s NS egyenletek, k-omega turbulencia modellel
- Roe által közelített Riemann megoldó MUSCL közelítéssel
- Explicit véges térfogat módszer negyed rendű Runge-Kutta módszerrel



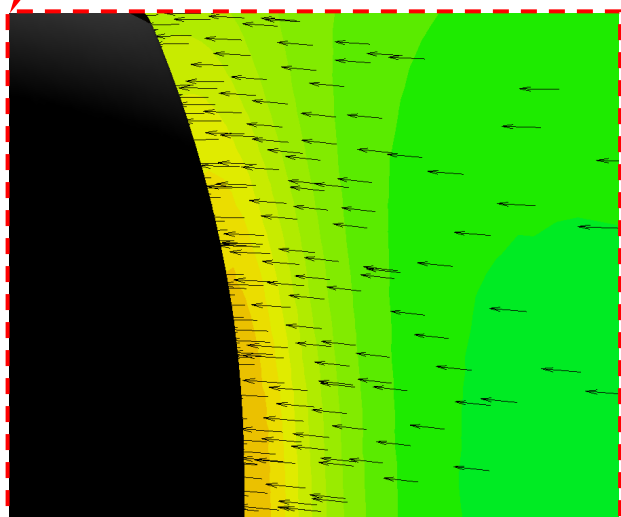
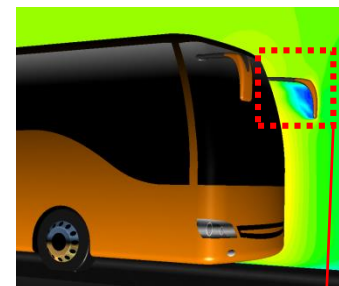
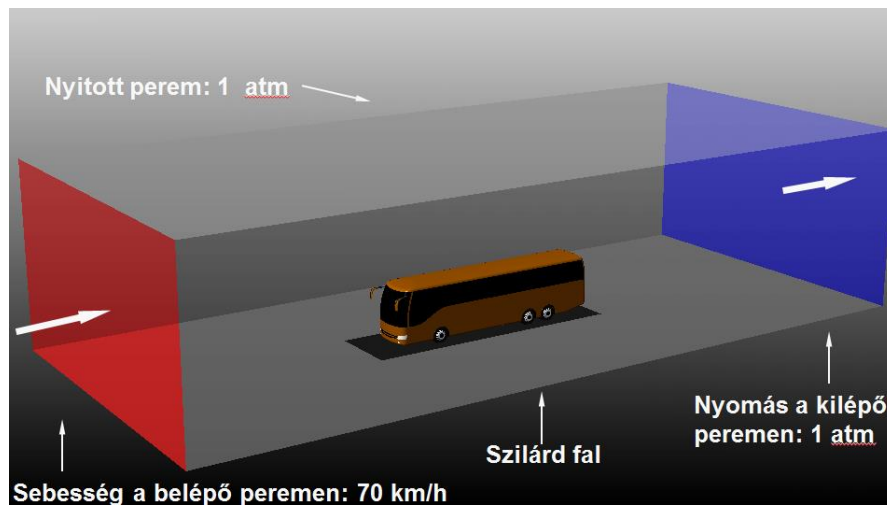
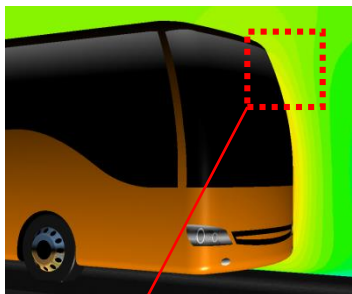
Unregistered HyperCam 2



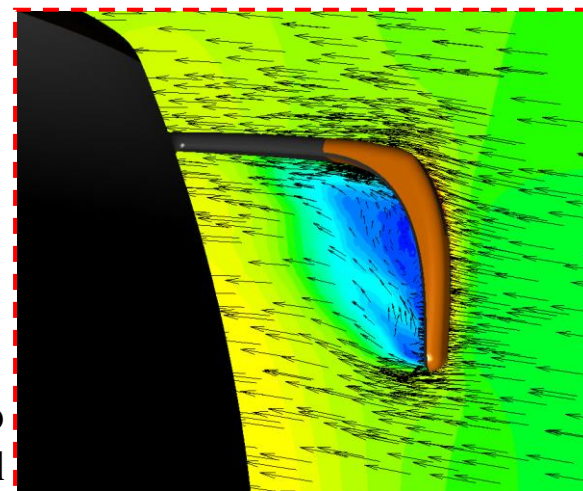
Légcsavaros repülőgép numerikus áramlástanai vizsgálata - Ipari alkalmazás III. (ESPOSA Project)



Járművek körüli áramlás vizsgálata - Ipari alkalmazás IV.



Visszapillantó
tükör nélkül



Visszapillantó
tükörrel



Összefoglalás

- A numerikus áramlástani módszerek segítségével jobban megérthetők a fizikai folyamatok többek között a vizualizációs eszközöknek köszönhetően.
- Kapcsolt fizikai folyamatok modellezése is lehetséges elfogadható számítógépi kapacitással.
- A numerikus módszereket optimalizációs algoritmusokkal is lehet csatolni.
- Alkalmazásukkal jelentős költség- és kapacitás-csökkenés érhető el.
- Kivitelezhetetlen, extrém körülmények közötti, illetve nagy költségű mérések kiváltására is alkalmas.
- Az analízisek paraméterezhetőek, könnyen megismételhetőek minimális ráfordítással az előírt geometriai változtatásokat követően.
- A számítási eredmények validációjára és paraméter-érzékenységi vizsgálatok elvégzésére minden esetben szükség van.



Köszönöm a figyelmet.

BME, Vasúti Járművek, Repülőgépek és Hajók Tanszék
Sztoczek u. 6. J. ép. 4. em. 426
H-1111, Budapest
Telefon: +36 1 463-1922
Fax: +36 1 463-3080
e-mail: averess@vrht.bme.hu

