Hő- és áramlástan
5. előadás – CFD szimuláció

Dr. Bak Bendegúz
BME Áramlástan Tanszék
2020. március 9.

Tartalom

- **Mi az a CFD? Mire jó? Miért jó? Előnyök/Hátrányok**

- **Véges térfogatok módszere**

- **Hálózás**

- **Szimuláció típusok, szünet, modellezési kérdések**

- **Esettanulmányok**

CFD – Computational Fluid Dynamics

Mi az a CFD?

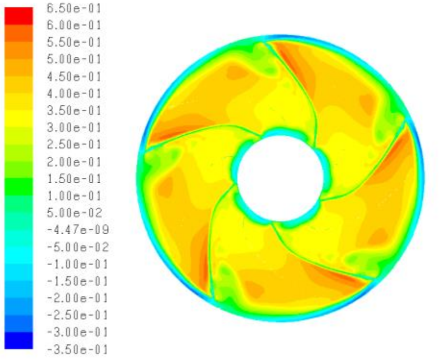
- Numerikus áramlástani szimuláció
- Az áramlást leíró diffegyenletekből egy algebrai egyenletrendszert *„varázsol”*
- Térben diszkrét pontokban határozza meg a megoldást (hálóalapú)

Mire használható?

- Összetett áramlástani problémák megoldása/megértése
- Segíti a tervezést, kiváltja/megerősíti a mérést

Miért használjuk?

- Azért mert *„olcsó”*
- Már a tervezési fázisban vizsgálhatók a kialakuló áramlási viszonyok, feltárhatók az esetleges hibák
- Az alternatíva a mérés, ami sokszor rendkívül költséges vagy nem is valósítható meg



Hallgatók kedvence: színes eloszlásképek

Lehetséges alkalmazások

Összetett hidraulikai problémák vizsgálata
- Nyomásveszteségek feltérképezése
- Hőátadás a csőfalon keresztül

Atmoszférikus áramlási viszonyok
- Új épület hatása a környezetében az áramlási viszonyokra

Épületgépészeti tervezés
- Komfortérzet irodákban
- Sportlétesítményekben az egyenlő feltételek biztosítása

Forgógép elemzés
- Forgógép teljesítményének elemzése

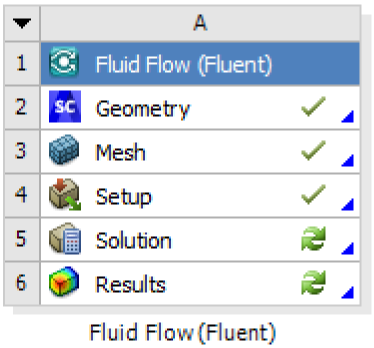
Ellenállástényező, felhajtóerő-tényező számítása
- Különféle áramlásba helyezett testekre ható erők meghatározása

CFD elemzés lépései

1. Áramlási tér geometriájának felépítése
- A szilárd geometria „negatívja” kell
- Kapott CAD geometria letisztázása (CAD Cleanup)

2. Áramlási tér hálózása
- Az áramlási tér felbontása (térbeli diszkretizáció)

3. Fizikai modell felállítása
- Peremfeltételek, anyagmodell megadása
- Turbulencia modellezése és stb.



CFD Szimuláció lépései
ANSYS Workbench környezetben

4. Futtatás
- Megoldó beállításai
- Inicializálás, majd iteráció elégséges konvergencia eléréséig

5. Kiértékelés
- Színes eloszlásképek készítése és stb.

CFD vs. Mérés – Előnyök/Hátrányok

Előny:

- *„Olcsó”*, gyors, nem igényel sok előkészületet
- Általában pontos is

- Nem kell léteznie a vizsgált berendezésnek/létesítménynek

- Emberi hibák kevésbé terhelik (*Laci ferdén rakta be a Prandtl-csövet*)

Hátrány:

- A numerikus eljárás számos hibalehetőséget rejt magában: térbeli felbontás diszkretizációs hibája, fals numerikus diffúzió, rossz minőségű felbontás

- Bizonyos problémáknál rendkívül megbízhatatlan, pl. szerkezetek széltehervizsgálata tipikusan ilyen

- Nem mindig világos, hogyan tudunk peremfeltételeket megadni a rendelkezésre álló adatokból

A CFD szimuláció korlátai

Felbontás:

Nagyobb felbontás → növekvő idő/erőforrás-igény
Tranziens szimulációknál: finomabb felbontás → kisebb időlépés
Nem tudunk egyszerre figyelembe venni több nagyságrendben eltérő méretű részleteket (pl. szűrő, anemosztát)

Tipikus időigény:

Szimuláció előkészítése: 1/2 nap – 2 hét
Futtatás: pár óra – 2 hét
Kiértékelés: 1/2 nap – 1 hét
Általában *„tegnapra”* kell az eredmény mindenkinek…

Rugalmasság:

Peremfeltétel, fizikai modell megváltoztatása általában nem okoz problémát
Módosítás a geometriában általában sok extra munkával jár
„Rájöttünk, hogy a tető nem is ott van/A befúvást átraktuk 14m-rel arrébb, meg lehetne gyorsan nézni, ez mennyit változtat?”

Véges térfogatok módszere

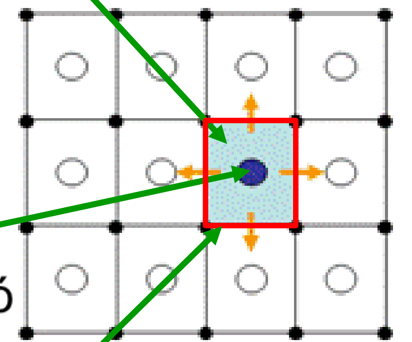
A számítási tartományt térbeli diszkretizációja → cellák

Mezőváltozók: $p, v_x, v_y, v_z, T, \ldots$

Általános transzportegyenlet:

$$\frac{\partial}{\partial t}\int_V \rho\phi dV + \oint_A \rho\phi\vec{v}d\vec{A} = \oint_A \Gamma\nabla\phi d\vec{A} + \oint_A \vec{S}_A d\vec{A} + \int_V S_V dV$$

$$\frac{\partial\rho\phi}{\partial t} + \nabla\cdot(\rho\phi\vec{v}) = \nabla\cdot(\Gamma\nabla\phi) + \nabla\cdot\vec{S}_A + S_V$$



Konkrét példák:

- kontinuitás: $\frac{\partial\rho}{\partial t} + \nabla\cdot(\rho\vec{v}) = \frac{q_m}{V}$ $\boxed{\phi = 1}$
- x-irányú mozgásegyenlet: $\frac{\partial\rho v_x}{\partial t} + \nabla\cdot(\rho v_x\vec{v}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \nabla\cdot(\mu\nabla v_x) + \rho g_x + \frac{F_x}{V}$ $\boxed{\phi = v_x}$

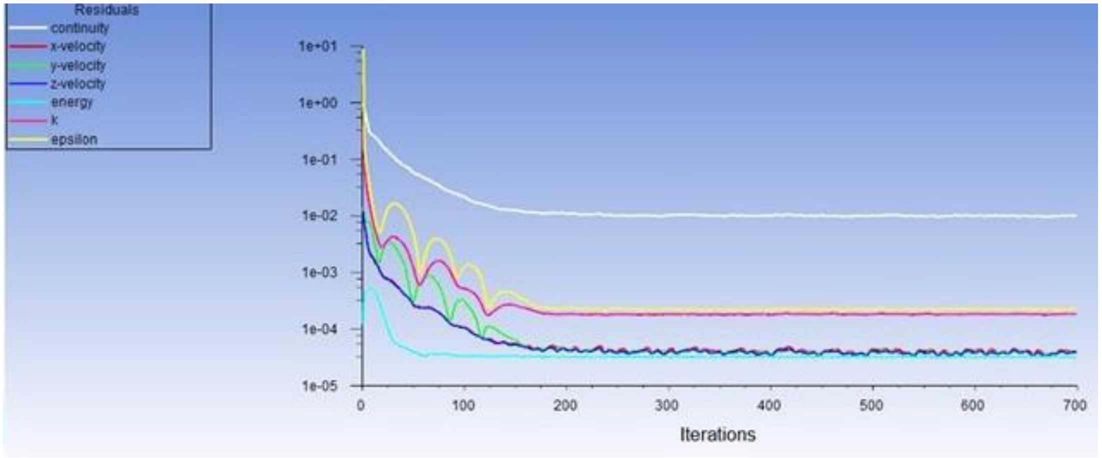
Konvergencia észlelése

A CFD megoldó algebrai egyenletrendszert old meg iteratív úton:

$$A\underline{x}^{(k)} = \underline{b} \quad \Longrightarrow \quad \underline{r}^{(k)}=\underline{b}-A\underline{x}^{(k)}$$

- $\underline{x}^{(k)}$ a mezőváltozók értékeit tartalmazó vektor a k. iterációs lépésben
- $\underline{r}^{(k)}$ a maradékvektor (=reziduum) a k. iterációs lépésben

Iteratív megoldási módszerek: Jacobi-iteráció, Gauss-Seidel iteráció
A reziduumok alakulása monitorozható a futtatás közben ANSYSban
Konvergencia: a reziduumok értéke fokozatosan csökken



Reziduumok konvergenciája

Véges térfogat vs. véges elem

Pontos áramlástani szimulációhoz lényegesen több hálóelemre van szükség, mint mechanikai szimuláció esetében

Processzor fejlesztés lehetőségei:

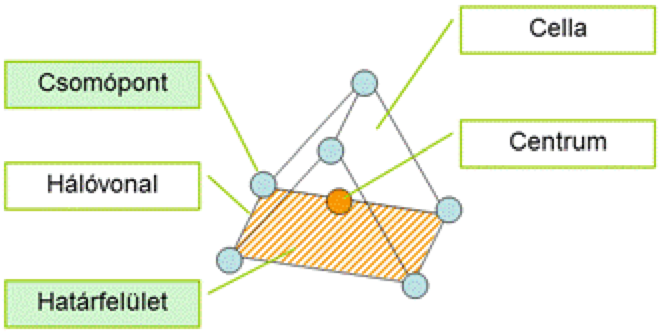
- Növeljük az egymagos teljesítményt
- Növeljük a CPU-k számát → jelenleg ez tűnik nyerőnek

Hiába van 16 magod, ha nem tud párhuzamosan futtatni a kódod…

A véges térfogatok módszere hatékonyan párhuzamosítható

	Véges térfogat	**Véges elem**
Szimuláció	Áramlástani	Mechanikai
Releváns entitás	Cella	Csomópont
Hálóminőség	Érzékeny rá	*„Bármi jó”*
Parallel futtatás	Jól megoldott	Rossz hatásfokú

A numerikus háló



Milyen a jó háló?

„Az a jó háló, ami jó eredményt ad"

A hálóval szemben támasztott követelmények:

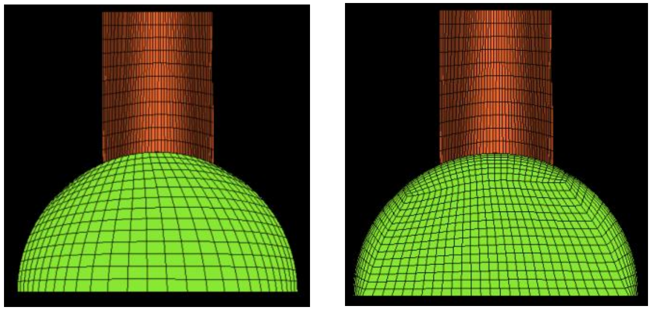
A CFD nem szereti az erősen torzult elemeket,
mivel a *„lila"* hibáját drámaian megdobja (lsd. 8. dia)

Hirtelen nagy cellaméret ugrások növelik a numerikus hibát

Lehetőleg legyen áramvonalas a háló,
ezzel eliminálható a fals numerikus diffúzió

Áramvonalas háló: a cellák határfelületei párhuzamosak ill. merőlegesek az áramvonalakra

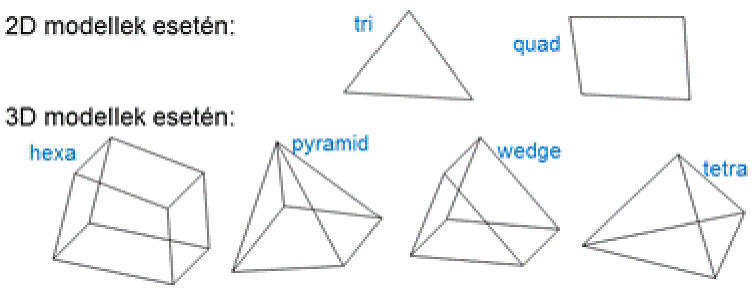
Fals numerikus diffúzió: a program túlbecsüli viszkozitás és hővezetés hatását



Torzult elemek vs. Szép háló

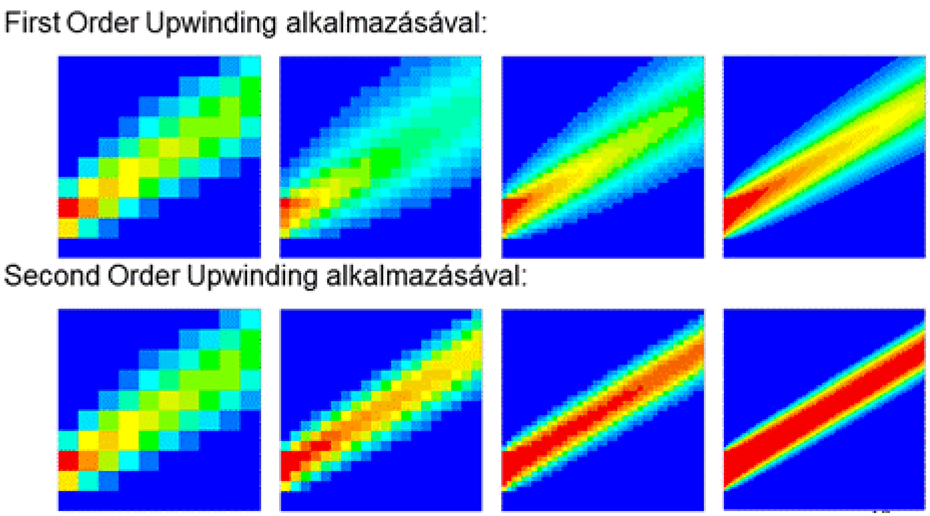
A háló áramvonalassága

Néhány elemtípus:



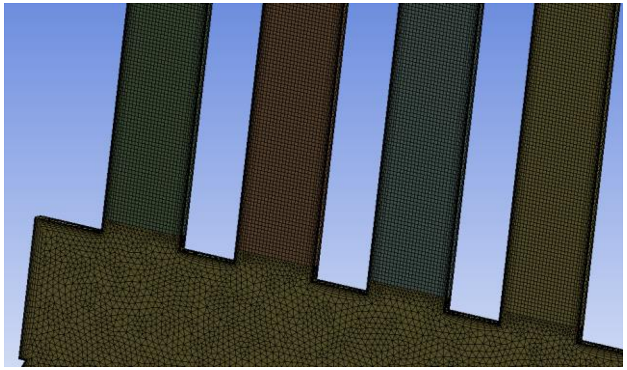
Nyilván hexa hálót lehet áramvonalasítani
Ha nem áramvonalasítunk, akkor legalább legyen jó a felbontás és az alkalmazott diszkretizációs séma

Különben ez lesz:



Elemméret megválasztása

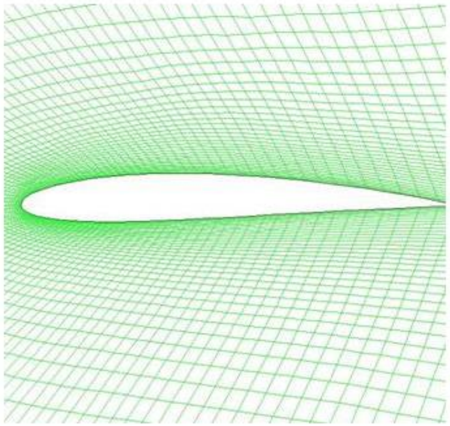
Távoltéri elemméret: a tartomány befoglaló méretei alapján *mérnöki intuícióra* hagyatkozunk és ahol kell, ott lokális sűrítés alkalmazható



Hexa és Tetra háló

Hexa háló:

- nagyságrendekkel kevesebb cellából áll más hálótípusokhoz képest
- cserébe bonyolult geometria (*bármi ami egy kockánál összetettebb…*) esetén több előkészítést igényel



Fali határréteg háló

Határréteg háló:

- Falközelben az áramlási határréteg felbontására használatos
- A határrétegben a háló falra merőleges irányban sűrítendő → lapos cellák
- A határréteghálo kialakítására nem mindig van *mód* (kedv)

Szoftverek

ANSYS:

- Kereskedelmi szoftver (=drága)
- Összevásárolt szoftvercsomag
- Geometria: DesignModeler, Spaceclaim
- Hálózás: Workbench mesher, ICEM, Turbogrid, Fluent mesher
- Solver: Fluent, CFX
- Kiértékelés: Fluent, CFDpost, Ensight

OpenFOAM:

- Open source (=ingyenes), Linux alatt megy
- Nincs grafikus felhasználói felület
- Vannak grafikus Open source hálózók és kiértékelők
- Főleg kutatásban használják (*ahol van határidő is, ott nem játszik*)
- A nyílt forráskód megengedi, hogy belenyúljunk a megoldóba
- Saját megoldó is fejleszthető

Szimuláció típusok

Milyen szimulációra van szükségem?

RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes)
Turbulencia modellezéséhez mezőváltozókat vezet be, amelyekre extra transzportegyenleteket ad meg

LES (Large Eddy Simulation)
A nagyobb, az áramlást meghatározó turbulens struktúrákat ténylegesen szimulálja, a kisebbeket modellezi

SAS (Scale Adaptive Simulation)
Low-budget LES: falközelben RANS-t használ, a távoltérben LES-t

DNS (Direct Numerical Simulation)
Minden turbulens struktúrát szimulál, erőforrás igényessége miatt csak kutatásban használják

Alapvető modellezési kérdések

Geometriai egyszerűsítési lehetőség van-e?
2D modellezés, félmodell, periodikus modellezés

Elég-e egy stacionárius szimuláció?
Stacionárius vagy tranziens a vizsgált jelenség

Elég-e a single precision számábrázolás a számításokhoz
Elég a single vagy szükséges a double precision számábrázolás

Mi a jó anyagmodell?
Állandó sűrűség, összenyomhatatlan/összenyomható ideális gáz, stb.

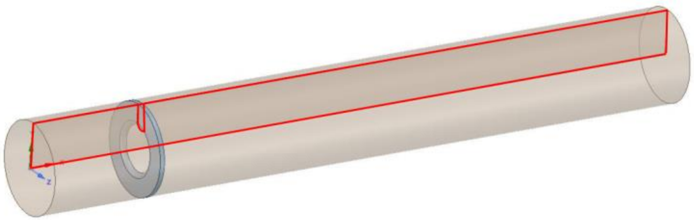
Milyen turbulenciamodellt használjak?
Lamináris, $k-\varepsilon$ modell, $k-\omega$ modell, stb.

Geometria egyszerűsítése

2D modellezés

- Valódi 2D probléma
- Tengelyszimmetrikus probléma

Főleg oktatásra használt mintapéldák
Ipari probléma ritkán egyszerűsíthető ennyire



Tengelyszimmetrikus geometria

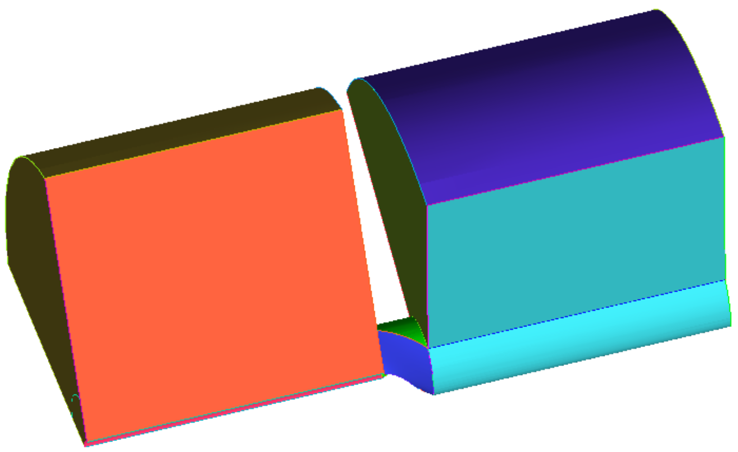
Periodikus modellezés

- Transzlációs periodikus

Hosszú csatorna ismétlődő geometriával

- Rotációs periodikus

Áramlástechnikai forgógépek



Periodikus geometria

Félmodell, negyedmodell

- Szimmetriasík van a geometriában

A megrendelők általában mindent megtesznek, hogy valamivel elrontsák a szimmetriát

Tényleg szimmetrikus a geometria, de SAS kell a jelenség megfogásához

Alapbeállítások

Double precision

- Lassabb iterációs lépések, de kevesebb iterációval konvergál
- Ha hőtan is játszik, kötelező!

Anyagmodell

Állandó sűrűség:

- folyadékok és gázok esetén is alkalmazható

Összenyomhatatlan ideális gáz:

- természetes konvekció
- gravitáció hajtotta keveredés

Ideális gáz:

- gázdinamikai problémák
- sűrűségalapú megoldó kell

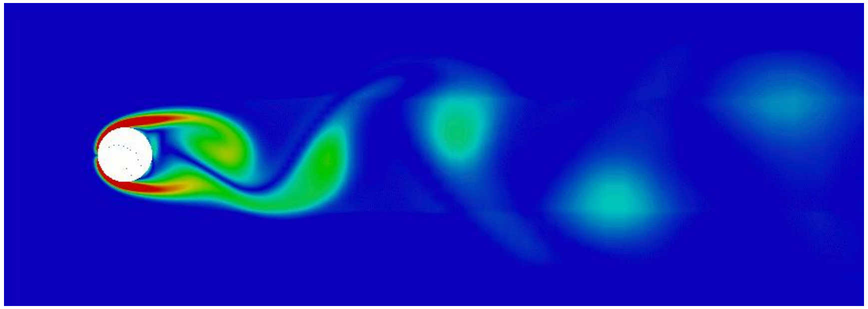
Tranziens szimuláció

Mikor van rá szükség?

- A stacioner megoldás sehogy se akar konvergálni
- Alapvetően tranziens jelenséget szimulálunk

Néhány tipikus példa:

- Kármán-féle örvénysor
- Forgógép indítás/leállás
- Hőterjedés



Kármán-féle örvénysor*

*google képkereső

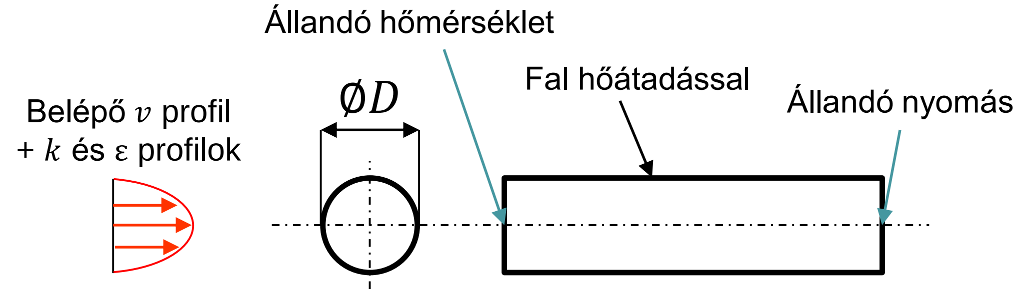
Courant-szám: $\Delta t = Co \left.\frac{\Delta x}{v}\right|_{min}$

- Azt fejezi ki, hogy hány cellányi utat tehet meg az áramlás egy szimulációs időlépésben
- A stabil konvergenciához általában $Co < 1$ szükséges

Peremfeltételek

Számítás közbenső cellákban:
Szomszédos cellák értékei alapján

Számítás szélső cellában:
Elő kell írni valamit a peremre



Peremfeltételek egyszerű csőáramlásra

Példa:

Téli hidegben csőből szabadba áramló forró levegő

Belépő KM:
- Áramlási sebesség előírása (valójában csőáramlási profil)
- Turbulens jellemzők előírása, hőmérséklet előírása

Kilépő KM:
- Külső nyomás előírása (valójában helyesebb egy körülvevő dobozra előírni)

Csőfal:
- 0 a sebesség
- Nincs keresztüláramlás
- Hőátadás is előírható

Szünet

Turbulencia modellek

Két transzportegyenletes modellek a legáltalánosabbban használtak
$k - \varepsilon$ modell: két új mezőváltozó k és ε

Turbulens kinetikus energia: $v = \bar{v} + v'$ $\quad k = \frac{\overline{{v'_x}^2 + {v'_y}^2 + {v'_z}^2}}{2}$

TKE disszipációs rátája: $\varepsilon = -\frac{dk}{dt}$

Turbulens viszkozitás: $\nu_t = C\frac{k^2}{\varepsilon}$

A turbulens viszkozitás hatására az áramlás kinetikus energiája TKE-be megy át, amely ε rátával disszipálódik

$k - \omega$ modell: ε helyett ω a másik turbulens mezőváltozó
ω: specifikus disszipációs ráta

Turbulencia modellek alkalmazása

Belépő peremen is meg kell a turbulens mezőváltozókat adni!
k, ε, ω és társaik mérnöki becslése nem triviális
Helyettük turbulencia intenzitás I és a belépő turbulens struktúrák mértékadó mérete adható meg a hidraulikai átmérő segítségével ($L = 0.07 D_H$)

Turbulencia intenzitás: $I = \frac{v'}{v}$ (szokásos esetekben 5-10%)

Hidraulikai átmérő: geometriafüggő, pl. csőre $D_H = D$

Általános ökölszabályok:
- $k - \varepsilon$ modell a távoltérben jobban működik → atmoszférikus áramlások
- $k - \omega$ a falközelben jobb → csatorna/csőáramlások
- Nincs fali határrétegháló → $k - \varepsilon$ modell félempirikus falfüggvénnyel
- $k - \omega$ SST hibrid modell → falközelben $k - \omega$, távoltérben $k - \varepsilon$
- Alapvetően lamináris jelenség → nem kell turbulenciamodell

Köszönöm a figyelmet!