A CFD elemzés minőségéről és megbízhatóságáról

Dr. Kristóf Gergely

2016. Október 11.

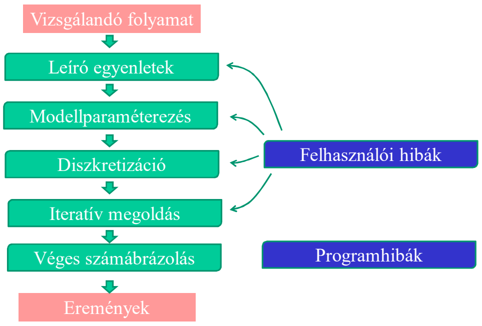
Modell fejlesztési folyamata

I. Ellenőrzés:
Jól oldjuk-e meg a leíró egyenleteket?
Teljesülnek-e az elvárt konvergencia jellemzők?
Eredmények összehasonlítása analitikus megoldással, vagy pontosabb numerikus megoldással.

II. Validálás:
Jók-e a leíró egyenletek?
Helyesek-e a peremfeltételek?
Mérésekhez viszonyítunk.

III. Kalibrálás:
Modell fontos paramétereinek illesztése egy-két méréshez.
Illesztés után a modell feltehetően jól adja vissza a módosítások hatását.

A közelítési rendszer



Hiba és bizonytalanság

- Pontos ↔ Közelítő
- Hiba:
  Az okát ismerjük, szándékos elhanyagolásokból adódik. Az erőforrások növelésével vagy a megoldási módszer fejlesztésével csökkenthető.
- Bizonytalanság:
  Az ismeretek valamilyen hiányából adódik, ezért nem tudjuk a mértékét becsülni és az erőforrások növelésével csökkenteni.

1. Modell bizonytalanságok

Valóság ↔ A leíró egyenletek analitikus megoldása

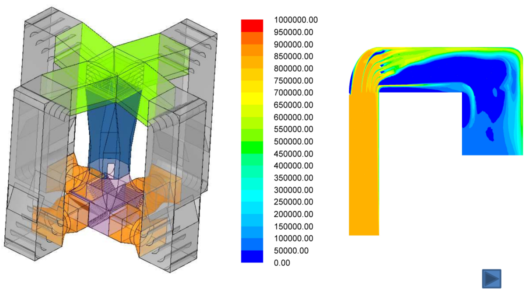
Nem jó egyenleteket oldunk meg.

- Turbulencia modellek
- Stacionárius-e az áramlás?
- Ideális gáz, egyéb állapotegyenletek
- Nem newtoni folyadék tulajdonságok
- Reakciómodellek egyszerűsítése
- 2D áramlás

Példa: Lebegtető szélcsatorna

2D – 3D?

Turbulencia modellezés – hidraulikai veszteségek



2. Diszkretizációs hiba

A leíró egyenletek analitikus megoldása ↔ A diszkretizált egyenletek pontos megoldása

Véges sűrűségű háló

- Sűrítéssel csökkenthető. A hálókonvergencia rendje a Taylor-sor elhagyott tagjainak nagyságrendjével jellemezhető. Elvileg pl. elsőrendű séma esetében az integrálás hibája a felbontás méretével arányosan csökken, másodrendű séma esetében négyzetével arányosan csökken.
- Időbeli és térbeli diszkretizálásból adódhat.
- Hogy gyakorlatban teljesül-e a konvergencia formális rendje az nem biztos, mert függ a háló minőségétől, upwinding esetében cella Reynolds-számtól, falfüggvény empirikus elemet visz a modellbe stb. A rendet mérni kell.
- Az eredmények hálófüggetlensége szisztematikus sűrítéssel vizsgálható.

Hálófüggetlenség vizsgálata

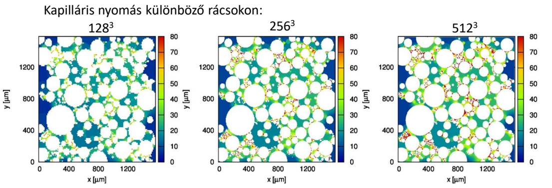
- Legjobb a kétszeri, lineáris (vonal menti) duplázás: 8x, 64x több cella.
- Durva hálón: Φ_{4h},
  Praktikus hálón: Φ_{2h},
  Finom hálón: Φ_h.
- Nem feltétlenül kell felezni az intervallumokat, de legalább 1.5-szörösére növeljük az intervallumok számát (min 3.4-szeres cellaszám növekedés)
- A sűrítés legyen egyenletes, hasonló háló struktúrát és közel azonos háló minőséget kell biztosítani. (Hálóméret ugrás, torzultság…)
- Vigyázat! Fal közelében is azonos arányban kell sűríteni: kiléphetünk a faltörvények érvényességi tartományából, ami egy nagyságrenddel nagyobb hiba forrása is lehet.
- A hiba becslésére Richardson-extrapoláció alkalmazható:

$$\varepsilon_h \cong \frac{\Phi_h - \Phi_{2h}}{r^p - 1}, \qquad p = \log_r\left(\frac{\Phi_{2h} - \Phi_{4h}}{\Phi_h - \Phi_{2h}}\right)$$

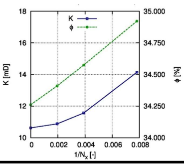
- Φ lehet integrál jellemző vagy mezőváltozó, utóbbi esetben a hiba eloszlására is lehet következtetni, így a háló optimalizálható.
- Pl: elsőrendű módszer esetében, egyszeri lineáris duplázás (r=2) esetén a finom hálón a megoldás hibája: kb. a két hálón kapott megoldás közötti eltéréssel azonos.

Példa: digitális kőzetmodell

Kapilláris nyomás különböző rácsokon:



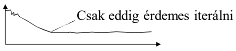
Áteresztőképesség és porozitás rácsméret függvényében:



3. Iterációs hiba

Bekonvergált megoldás ↔ Véges iterációval kapott megoldás

- Egyáltalán konvergál-e a megoldás? Ha nem konvergál:
  1. hibás háló;
  2. hibás peremfeltételek;
  3. az alkalmazott turbulencia modellel nem kapható adott esetben stacionárius eredmény. > Időfüggő megoldással érdemes próbálkozni. (URANS)
- Figyeljük a reziduumokat. Az első néhány iterációs lépés kivételével az iterációs hiba arányosan változik a reziduumokkal: a kezdeti reziduum értékét 10^{-3}, 10^{-6}-szorosára csökkentjük. (Vannak olyan esetek, amikor pl. a kezdeti feltétel pontosan kielégíti a kontinuitást.)
- Ha bekonvergált, érdemes megnövelni az underrelaxation faktorokat és megnézni, hogy tartja-e a megoldást.
- Más kezdőértékről indítva is ugyanoda érkezik?
- Vannak nehezen konvergáló jellemzők, pl. ellenállás-tényező. <u>A reziduumokon kívül néhány integrál jellemző alakulását is figyelni kell!</u>
- Az iterációs hiba nem csökkenhet a kerekítési hiba határa alá:



4. Kerekítési hibák

Pontos számokkal számolva ↔ Véges számábrázolással számolva

- Alapértelmezett számábrázolás 4 byte-os (7 értékes jegy), FLUENT-ben lehet dupla pontossal is.
- Néhány áramlás, ami tudottan érzékeny a kerekítési hibákra:
  - alacsony Re turbulencia modellek;
  - természetes konvekció kis hőfokkülönbséggel;
  - sugárzásos hőtranszport
  - keverék modellek alacsony koncentrációval
  - nagy egyensúlyi (hidrosztatikai) nyomásgradiens

5. Alkalmazási bizonytalanság

Optimálisan paraméterezett modell ↔ Rendelkezésre álló adatokkal paraméterezett modell

Bizonytalan alapadatok

- Geometriai bizonytalanság;
- Peremfeltételek és forrástagok bizonytalanságai;
- Anyagjellemzők bizonytalanásga.

Geometriai bizonytalanság

- Nem a terveknek megfelelően készítik el a berendezést (gyárthatósági szempontok, kísérleti vizsgálat alapján tovább optimalizálták a geometriát);
- Kis geometriai részleteknek is lehet nagy jelentősége:
  - résáram ventilátoroknál;
  - fali rücskök, hegesztési varratok.
- Nagyon tagolt geometria esetében porózus modelleket alkalmazunk: figyelni kell, hogy jól legyen paraméterezve. > Mikro modell készíthető.
- Terhelés alatt (áramlás közben) a geometria jelentősen változat, pl. sátortető körüli áramlás, repülőgépek szárnya stb: FEM – FVM kapcsolt futtatás.

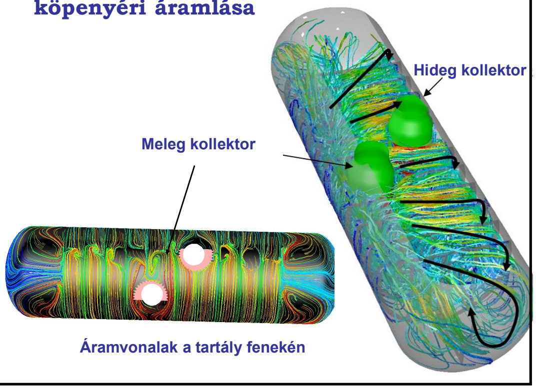
Peremfeltételi bizonytalanságok

- Legtöbb esetben pl. tudjuk a belépő térfogatáramot, de nem tudjuk a sebességprofilt. Belépő turbulens jellemzőkre általában semmilyen információ nincs. Ezek közül ε nem is mérhető.
- A peremfeltételi bizonytalanságok numerikus érzékenységvizsgálatokkal határolhatók be.
- Olyan nagyra kell venni a geometriát, hogy ne legyen nagy a peremérzékenység: felvízi oldalon nagyobb, alvízi oldalon kisebb lehet.
- Pl. épületmodell esetében ne az ajtóban írjuk elő a légnyomást, hanem készítsünk kívül egy dobozt.
- Pl. atmoszférikus áramlások rendkívül érzékenyek a belépő sebesség és turbulens profilokra: a turbulens profilokat a sebességprofillal „össze kell csiszolni".
- LES rendkívül peremérzékeny: időfüggő, realisztikus belépősebességprofilokat kell megadni, különben sok számítás ellenére sem javul a szimuláció pontossága.

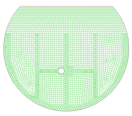
Anyagjellemzők bizonytalansága

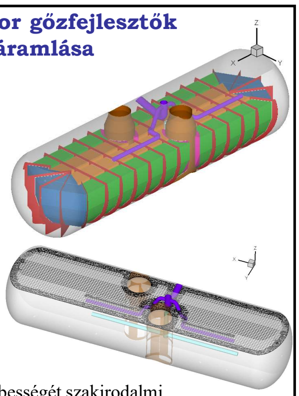
- Sűrűségmodell megválasztása: számolhatunk-e állandó sűrűséggel?
  Pl: a légköri sűrűség? Tengerszinten eddig tartósan mért nyomás szélső értékei:
  p: 877 – 1079 kPa → 20 %
  T: 253 – 313 K → 22 %
- Anyagösszetétel változhat?
- Viszkozitás erősen hőmérséklet függő lehet, FLUENT-ben csak a normál állapoti értékek vannak táblázva, de megadhatunk törtvonalas függvényt vagy polinomot.
  Többféle anyagmodell nemnewtoni folyadékokra (csak lamináris).
- Termikus jellemzők erősen hőmérséklet függőek lehetnek. (c_p, κ)
- Többfázisú modellek esetében különösen sok hangolnivaló van:
  Pl: buborékméret változása.

Példa: VVER reaktor gőzfejlesztők köpenyéri áramlása



Példa: VVER reaktor gőzfejlesztők köpenyéri áramlása

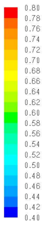


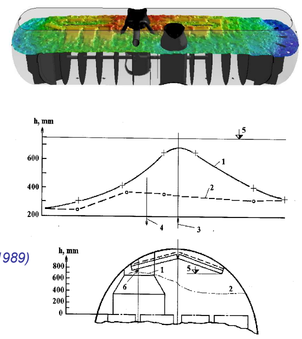


FLUENT model
- 2D (4100 cella)
- 3D durva (500 000 cella)
- 3D részletes (1 200 000 cella 90 - 40 mm felbontás)

A víz- és gőzfázisok relatív sebességét szakirodalmi korreláció alapján írtuk elő a gőztartalom függvényében.

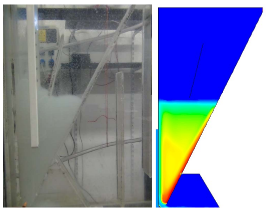
Példa: VVER reaktor gőzfejlesztők köpenyéri áramlása



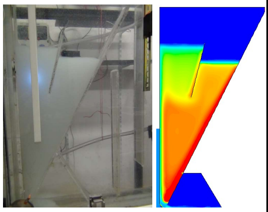


Mért felszínalakok
Ref: Dmitrijev (1989)

Példa: Ülepítő modellezése



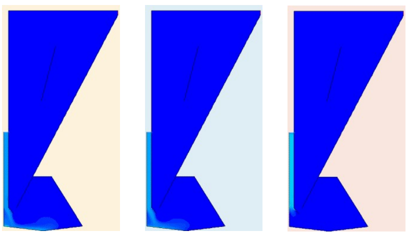
Iszapszint 2.5 óránál



Iszapszint 5 óránál

Példa: Ülepítő modellezése
A viszkozitás hatása

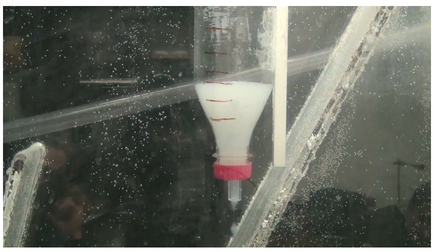
Megfigyelendő:
- Buzgár szélesség
- Iszapkoncentráció
- Iszapszint különbség a távtartó két oldalán



10 μ_{water} | 100 μ_{water} | 1000 μ_{water}

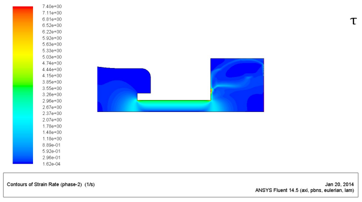
Példa: Ülepítő modellezése

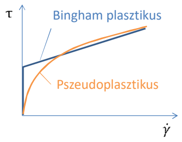
A reológiai paraméterek azonosítása laborkísérlettel



Példa: Ülepítő modellezése

A reológiai paraméterek azonosítása laborkísérlettel





A pszeudoplasztikus anyagmodell feltételezésével:

$$\tau = K\dot{\gamma}^n$$

n=0.15
k=0.02…0.04

A CFD elemzést terhelő hibák és bizonytalanságok

1. Modell bizonytalanságok
2. Diszkretizációs hiba
3. Iterációs hiba
4. Kerekítési hiba
5. Alkalmazási bizonytalanság
6. Felhasználói hibák
7. Program hibák