

# A CFD elemzés minőségéről és megbízhatóságáról

Dr. Kristóf Gergely  
2008. november 18.

## 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

## 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.

## 2. Diszkrétizációs hiba

A leíró egyenletek analitikus megoldása ↔ A diszkrétizált egyenletek pontos megoldása

Véges sűrűségű háló

- Sűrítéssel csökkenthető. A konvergencia rendje a Taylor-sor elhagyott tagjainak nagyságrendjével jellemezhető (konvergencia rendje).  
Elvileg elsőrendű séma esetében az integrálás hibája a felbontás méretével arányosan csökken, másodrendű séma esetében négyzetével arányosan csökken stb.
- Időbeli és térbeli diszkrétizálásból 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.

## 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.

## Hálófüggetlenség vizsgálata

- Legjobb a kétszeri, lineáris (vonali) duplázás: 8x, 64x több cella.
- Durva hálón:  $\Phi_{4h}$   
Praktikus hálón:  $\Phi_{2h}$   
Finom hálón:  $\Phi_h$
- 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 faliörvények érvényességi tartományából, ami egy nagyságrenddel nagyobb hiba forrása is lehet.
- A hiba becslésére Richardson-extrapoláció alkalmazható:

$$\epsilon_h \approx \frac{\Phi_h - \Phi_{2h}}{r^p - 1}, \quad p = \log\left(\frac{\Phi_{2h} - \Phi_{4h}}{\Phi_h - \Phi_{2h}}\right)$$

- $\Phi$  lehet integrál jellemző vagy mezőváltozó, utóbbi esetben a hiba eloszlására is lehet következtetni, így a háló optimalizálható.
- P1: elsőrendű módszer esetében, egyszeri lineáris duplázás (r=2) esetén a finom hálón a megoldás hibája: kb. a két hálón kapott megoldás közötti eltéréssel azonos.

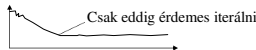
### 3. Iterációs hiba

Bekonvergált megoldás



Véges iterációval kapott megoldás

- Egyáltalán konvergál-e a megoldás? Ha nem konvergál:
  - hibás háló;
  - hibás peremfeltételek;
  - az alkalmazott turbulencia modellel nem kapható adott esetben stationárius 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 ugyanoda ér-e.
- Vannak nehezen konvergáló jellemzők, pl. ellenállás-tényező. A reziduumokon kívül néhány integrál jellemző alakulását is figyelni kell!
- Az iterációs hiba nem csökkenhet a kerekítési hiba határa alá:



### 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 rücsök, 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 változik, pl. sátrortó körüli áramlás, repülőgépek szárnya stb: FEM – FVM kapcsolt futtatás. (Egyelőre FLUENT – ABACUS, rövidesen FLUENT – ANSYS.)
- FLUENT rendszerben a geometriai modell nem megy át a szolverbe > sűrítés esetén finomabb felületi hálót lehet importálni és arra végezni a sűrítést.

### 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

### Peremfeltételi bizonytalanságok

- Legtöbb esetben pl. tudjuk a belépő térfogatáramot, de nem tudjuk a sebességprofil. Belépő turbulens jellemzőkre általában semmilyen információ nincs. Ezek közül  $\epsilon$  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 sebességprofilal „össze kell csiszolni”.
- LES rendkívül peremérzékeny: időfüggő, realiztikus belépősebességprofilokat kell megadni, különben sok számítás ellenére sem javul a szimuláció pontossága.

### 5. Alkalmazási bizonytalanság

Optimálisan paraméterezett modell



Rendelkezésre álló adatokkal paraméterezett modell

#### Bizonytalan alapadatok

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

### 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 állapotú értékek vannak táblázva, de megadhatunk törtvonalas függvényt vagy polinomot.  
Többféle anyagmodell nemnewtoni folyadékokra (csak lamináris).
- Termikus jellemzők erősen hőmérséklet függőek lehetnek. ( $c_p$ ,  $\kappa$ )
- Többfázisú modellek esetében különösen sok hangolnivaló van:  
Pl: buborékméret változása.

## A CFD elemzést terhelő hibák és bizonytalanságok

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