Numerikus áramlástan alkalmazása járműgépészetben

Dr. Horváth Zoltán
Matematika és Számítástudomány Tanszék
Széchenyi István Egyetem
Győr

Dr. Horváth András
Fizika és Kémia Tanszék
Széchenyi István Egyetem
Győr

CFD workshop – MTA Áramlás- és Hőtechnikai Bizottság Numerikus Áramlástani Albizottság
Budapest, BME, 2006. május 11.

Tartalom

1. Bevezetés, motiváció
   - Elméleti kutatási tevékenység
   - Megvalósult ipari gázáramlástani projektek (Rába, Ganz)
2. Diesel-motor numerikus modellezése
3. Erősáramú megszakító numerikus modellezése
   - Elméleti vizsgálat: kód lerobbanása a numerikus módszernek a fizikai feladat diszkrét megfelelői megsértése miatt
4. Szívócsatorna optimalizálása párhuzamos programozással
5. Általános áramlástani optimalizáló algoritmus (SZE JRET projekt)

Megvalósult ipari gázáramlástani projektek

A projektek témavezetője: Dr. Molnárka Győző (SZE Mat. Tsz.)

Ezekből az áramlástani alprojekteket HA és HZ vezették és végezték.

Rába-projekt: motorfejlesztés támogatása numerikus modellezéssel

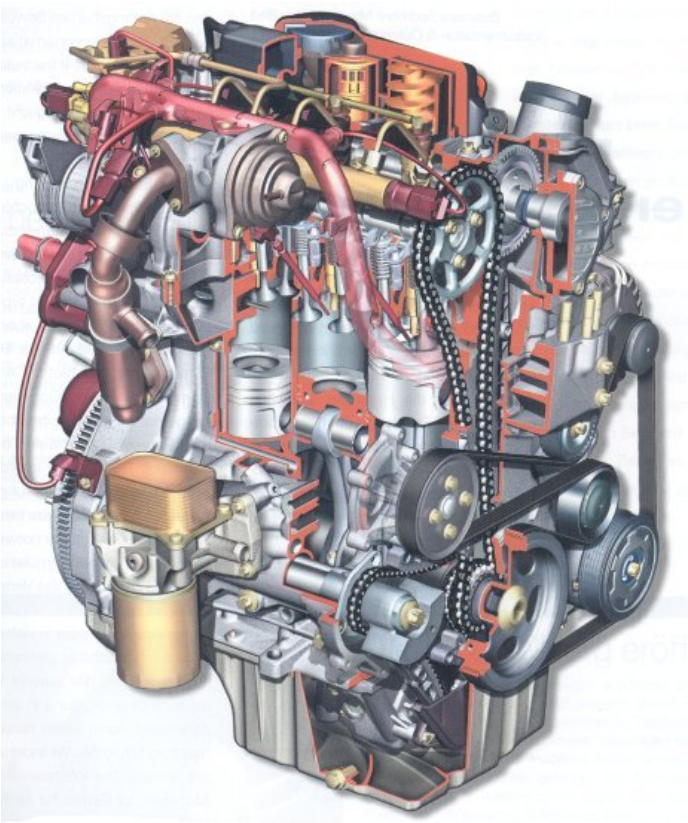
- Időtartam: 1999. szeptembertől 2001. novemberig
- Saját kód fejlesztése
- Szoros részhatáridők $\Longrightarrow$ kódot nem lehetett sokat finomítani
- Fizikai mérési eredmények léteznek bizonyos részfeladatokra $\Longrightarrow$ kód ellenőrzési lehetősége

Célok: egy adott létező motor teljesítménynövelése; környezetszennyezés csökkentése; fogyasztás és gyártási költségek csökkentése; stb.

Bonyolult, összetett feladat $\Longrightarrow$ szétszedik kisebb, független részfeladatokra

Részfeladatok:

- motor légfelvételi tulajdonságainak javítása $\Longrightarrow$ szívócsatorna optimalizálása
- mozgó alkatrészek (dugattyú, szelepek) numerikus modellezése
- keverékképződés numerikus vizsgálata: üzemanyag befecskendezése, párolgása



1. részfeladat: Szívócsatorna numerikus modellezése

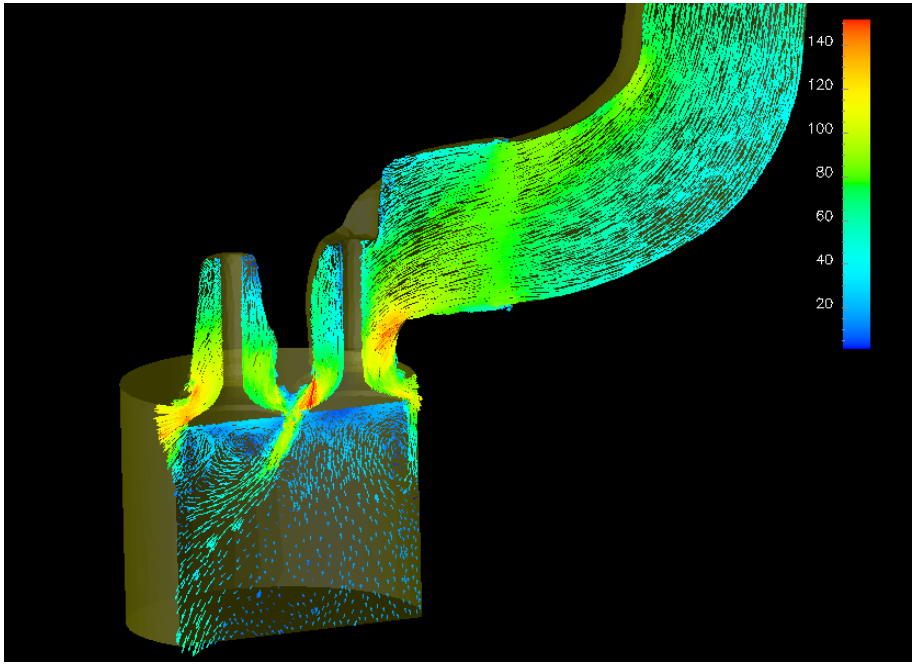
Gázáramlási numerikus algoritmus jellemzői:

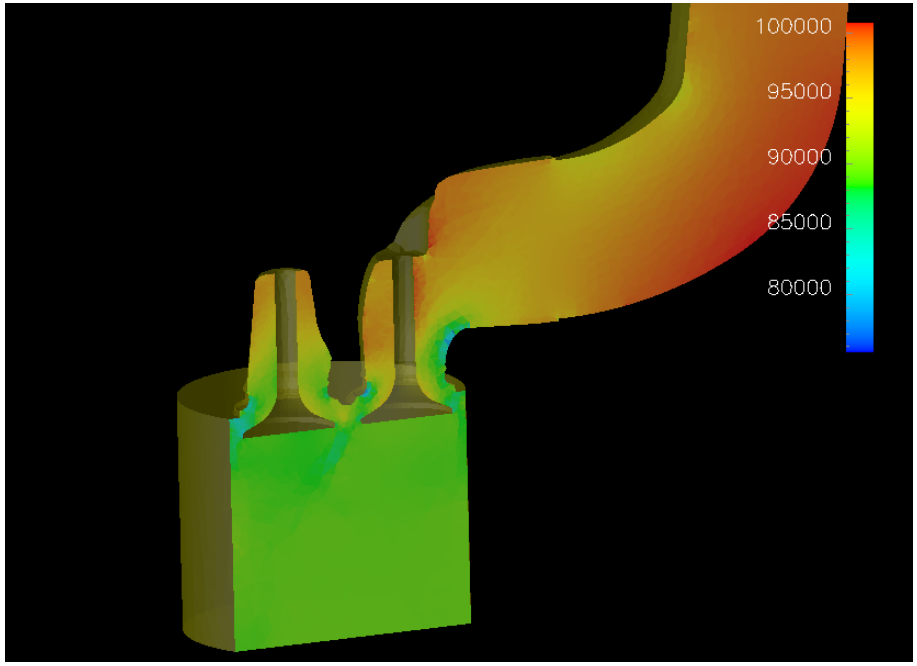
- véges térfogatok módszere
- Steger-Warming és Vijayasundaram féle fluxus-hasító módszerek
- cellánként konstans közelítés
- teljesen konzervatív séma
- minden időszinten pontos közelítés, nemcsak stac. megoldásra (további projektpontok miatt szükséges)

Stacionárius próbapadon mért adatokkal egyezés
Méréseket készítette: Cser Gyula, Csíkos Antal (Autókut)

$\Delta p = 15$kPa	SW	Vijaya.	mért
C_f	0.281	0.509	0.509
C_s	0.034	0.260	0.261

Stacionárius állapot: (kb. 147000 tetraéderes felbontás)





Sebességvektorok keresztmetszetben.

Másik irányból.

2. részfeladat: Mozgó alkatrészek numerikus modellezése

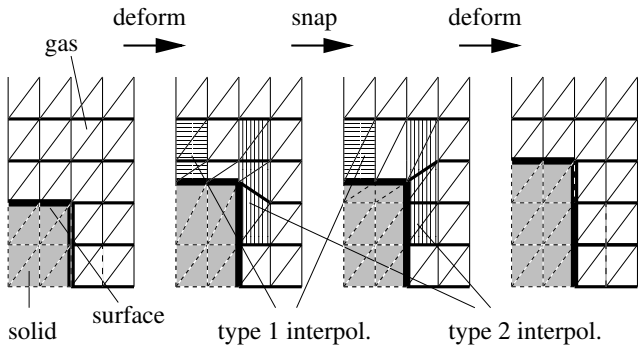
A KIVA-ból ismert csettintéses módszer kidolgozása tetraéder-hálóra

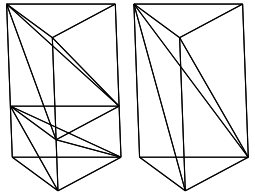
Lényege:

- réteges rács;
- mindig csak egy réteget torzítunk;
- amikor a torzított réteg túl megnyúlt, akkor ezt két réteggé vágjuk és interpolálunk
- ha egy réteg túl lapos, akkor összevonjuk a szomszéd réteggel és interpolálunk

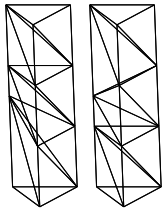
Előnyök:

- csak lokális interpoláció kell, nem kell az egész tartományon
- gyors, egységes végrehajtás
- teljesen konzervatív séma



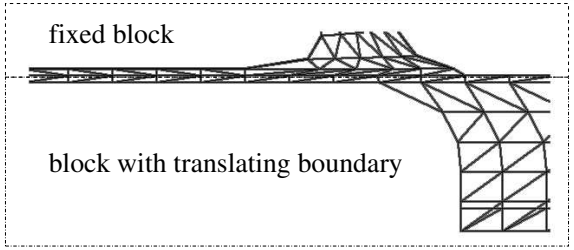


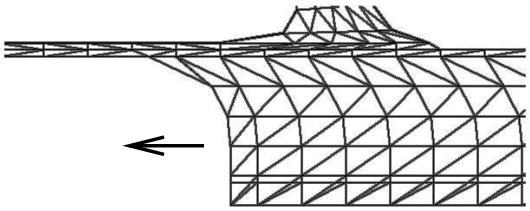
1. típusú interpoláció



2. típusú interpoláció

1. ábra. 2D vázlat a csettintős algoritmusról (balra) és két fajta intepolációs rendszer 3D-ben (jobbra).





kódrészlet típusa	CPU ideje [%]
fluxus számítás	65
hálószámítás	18.4
termodin. szám.	12.4
peremfelt.	3.4
más (i/o)	0.8

2. ábra. A háló mozgása (balra) és a kódrészek relatív költsége (jobbra).

Animáció egyszerű teszt esetre: magyarázat, csak a rács.

Beszívási folyamat modellje: sebességvektorok: A, B, C; keveredés: A, B, C.

3. részfeladat: keverékképződés numerikus vizsgálata

- Üzemanyag befecskendezése: sok folyékony üzemanyagcsepp belövése a gázáramlásba és ezek nyomonkövetése, egyenkénti párolgás közben
- Keverékképződéshez többkomponensű áramlás számítása
- KIVA-modell alkalmazása
- Egyéni fejlesztések a módszer stabilitásának növelésére.

Néhány demonstráció: Nem párolgó teszt, párolgó teszt, hatágú üzemanyag-sugár.

A karakterisztikus méretek egyeznek a szakirodalmival, mérésekkel való összevetés nem történt.

Szívócsatorna optimalizálása genetikai algoritmussal

„Optimalizálás" = a kiindulási berendezésnél jobb konstruálása

Cél: minél több friss levegőt szívjon be egy ütem alatt, de a keveredés ne romoljon

Minősítő számok: beszívott levegő

- tömegárama (C_f)
- perdületi száma (C_s)

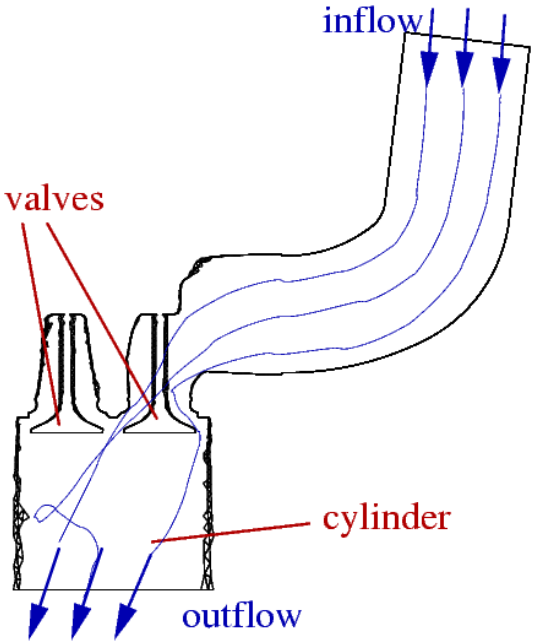
Mérés: az ún. stacionárius próbapadon

Hagyományos módszer: mérés, módosítás; mérés, módosítás; ...

Megoldás numerikus szimulációval

Az áramlási tartomány áttekintése:

A felület áttetsző ábrázolása



Keresztmetszet

Módszerünk alkalmas erre: C_f-ben 0,5–1%-os, C_s-ben 5%-os pontosságú. (Mérésekkel összevetve.)

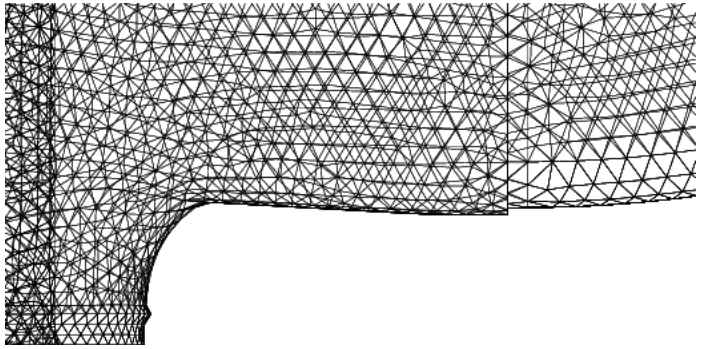
A megoldás fő lépései

1. Kiindulási adatok meghatározása

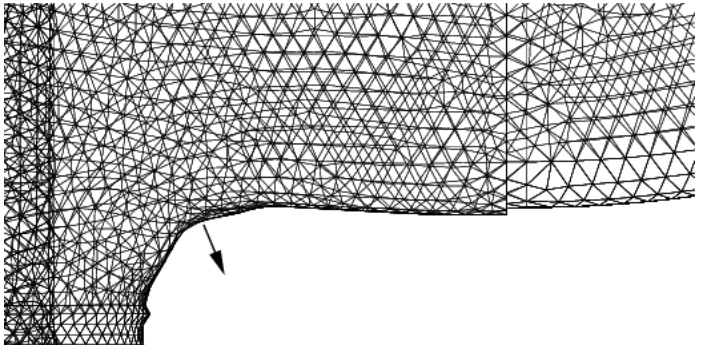
   (a) kiindulási áramlási tartomány diszkretizálása (kb. 147000 tetraéderrel) $\rightarrow \Omega_{h,0}$

   (b) t_{max}, valamint a kezdeti- és peremfeltételek lerögzítése
   (beáramlásnál: p_{be} nyomás és hőmérséklet, kiáramlásnál: p_{ki} nyomás megadása, ahol $p_{ki} < p_{be}$)

2. Lehetséges változtatások kijelölése
   d_i = az i-edik ellenőrzési pont (ez $\Omega_{h,0}$ felületi pontja) normális irányú elmozdításának mértéke; ezen pontok környezete folytonosan deformálódik.$\rightarrow \Omega_{h,\mathbf{d}}$
   $\rightarrow$ Tervezési változó: $\mathbf{d} = (d_1, ..., d_{20})^T \in D := \times_i [d_{i,min}, d_{i,max}]$



$\Omega_{h,0}$



$\Omega_{h,\mathbf{d}}$

3. Célfüggvény értelmezése és az optimalizálási feladat

Maximalizálandó C_f míg C_s lényegében állandó. Ez az F_{obj} célfüggvénnyel:

$$\max_{\mathbf{d}\in D} F_{obj}(\mathbf{d}) \to !, \qquad \text{ahol} \quad F_{obj} := \frac{C_f}{C_f^{ref}} - \left(1 - \frac{C_s}{C_s^{ref}}\right)^2$$

ahol

$$C_f = \frac{\dot{m}\,/\rho_0}{A\,v_0}, \qquad C_s = \frac{8T}{\dot{m}\,B\,v_0}.$$

ltt

- $\dot{m} = \int_{S_{ki}} \rho \mathbf{v} d\mathbf{S}$ (tömegáram), $T = \int_{S_{ki}} (\rho \mathbf{v} \times (\mathbf{r} - \mathbf{r}_0)) d\mathbf{S}$ (perdületi szám)
- C_f^{ref}, C_s^{ref}: a kiindulási geometriához tartozó C_f és C_s értékek
- ρ_0 = levegő sűrűsége beáramláskor, $A = 2\cdot$ szelep-keresztmetszet, $v_0 = \sqrt{2(p_{be} - p_{ki})/\rho_0}$, B =lökethossz.

C_f, C_s-hez ismerni kell az alábbi állapotváltozót: $\rho\mathbf{v}$ (gáz lendületsűrűsége) $\Longrightarrow$áramlási feladat megoldása szükséges

4. Célfüggvény kiszámítása

Legyen ρ, e, $\mathbf{v} = (v_1, v_2, v_3)^T$, p, $t \in [0, t_{max}]$ rendre a tömeg-, összenergiasűrűség, sebesség, nyomás, idő; $\mathbb{R}^3$ pontjai $(x_1, x_2, x_3)^T$. Továbbá

$$\begin{aligned}
u &= (\rho, \rho\mathbf{v}^T, e)^T : \Omega_{h,d} \times [0, t_{max}] \to \mathbb{R}^5, \qquad \text{,,konzervatív változó''} \\
f &= (f_1, f_2, f_3)^T, \qquad f_i : \mathbb{R}^5 \to \mathbb{R}^5, \qquad \text{,,fluxus függvény''} \\
f_i(u) &= \left(\rho v_i, (\rho v_i \mathbf{v} + p\mathbf{e}_i)^T, v_i(e+p)\right)^T, \qquad i \in \{1, 2, 3\}, \\
\mathrm{div} f(u) &= \sum_{i=1}^{3} \frac{\partial f_i(u)}{\partial x_i}
\end{aligned}$$

Az áramlási egyenletek: Euler-egyenletek (tömeg-, lendület-, energiamegmaradási tétel) ideális gáz állapotegyenletével:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial u}{\partial t} + \mathrm{div}\, f(u) &= 0 \qquad \Omega_{h,d} \times [0, t_{max}] \text{ -on} \\
p &= (\gamma - 1)(e - \frac{\rho}{2}|\mathbf{v}|^2) \\
&+ \quad \text{kezdeti- és peremfeltételek}
\end{aligned}$$

A feladat megoldása numerikusan, véges térfogatok módszerével (ez konzervatív).

5. Célfüggvény maximalizálása genetikai/evolúciós eljárással

(a) „Kézi” ad-hoc javítások:

- Adatok importálása CAD-rajzból, majd egyedi futtatások és a tartomány kézi módosítása $\Rightarrow$ mérésekkel ellenőrzött, lényeges javulás C_f-ben (1,2%)

(b) Optimalizálás genetikai, ill. evolúciós algoritmussal

- 20-30 számítógép önállóan, párhuzamosan számolt 2 hétig
- 4000 célfüggvény–kiértékelés áramlási feladat megoldása
- az addig legjobb paraméterekből számol újakat

$\Rightarrow$ C_f lényeges, 2.5-szer nagyobb javítása, mint az egyedi futtatásokkal

Hagyományos mérési módszerekkel ugyanennek a végrehajtása kb. 800 mérnöknap lett volna!

Részletesebben:

Evolúciós algoritmust (EA) alkalmaztunk valós kódolású génekkel, változó populáció mérettel és ,,niching"-eléssel.

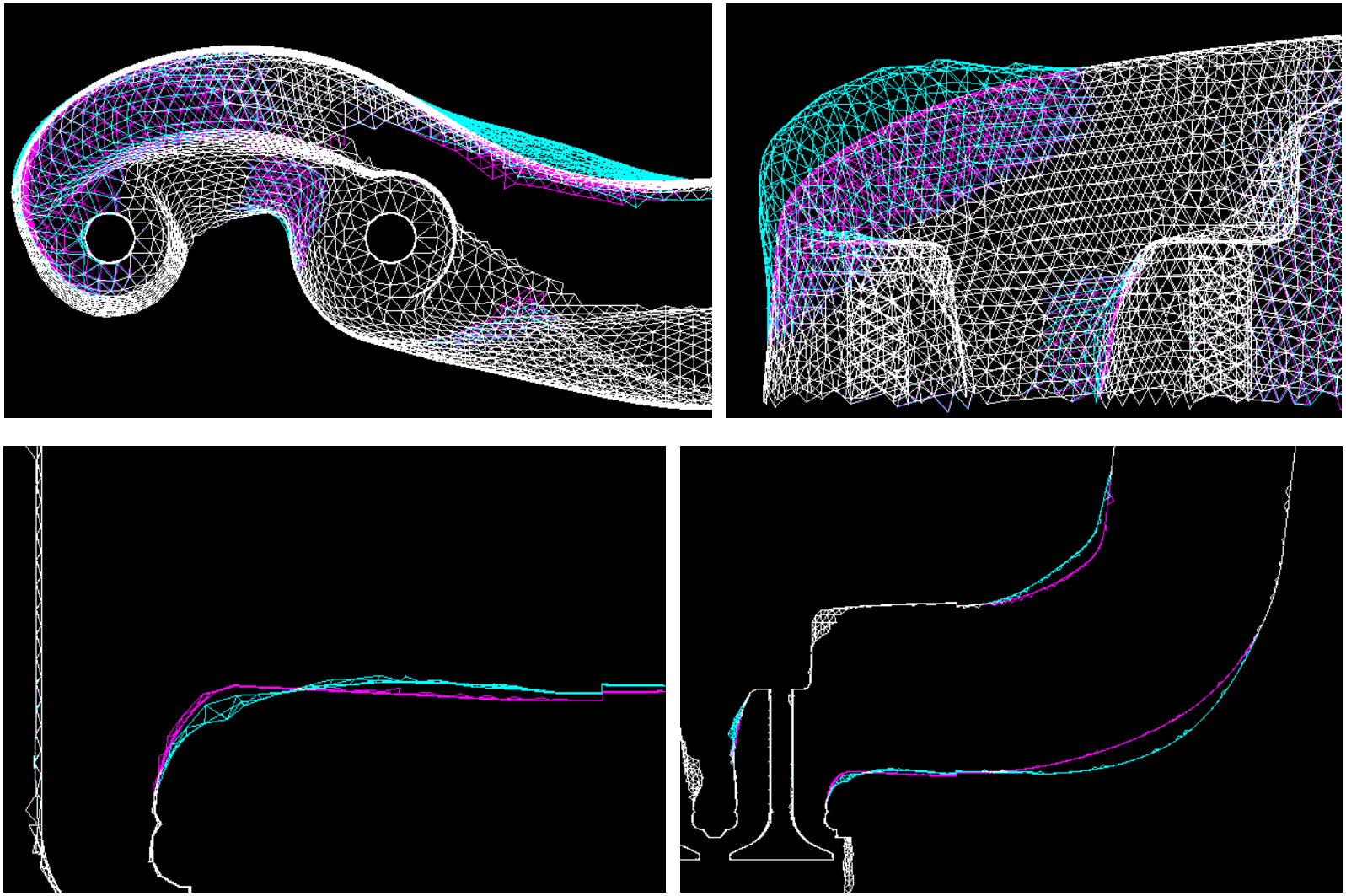
Minden számítógépen külön alpopuláció lett optimalizálva EA-val.

Ezek gyakran ellenőrzik, hogy más gépekről az ottani legjobb kromoszómákat megkapták-e és ha igen, akkor felhasználják azokat.

A legjobb kromoszómákat a számítógépek között ,,ügynök" programok szállítják (nálunk Bourne shell scriptben írt programok), melyek függetlenek az EA-programoktól.

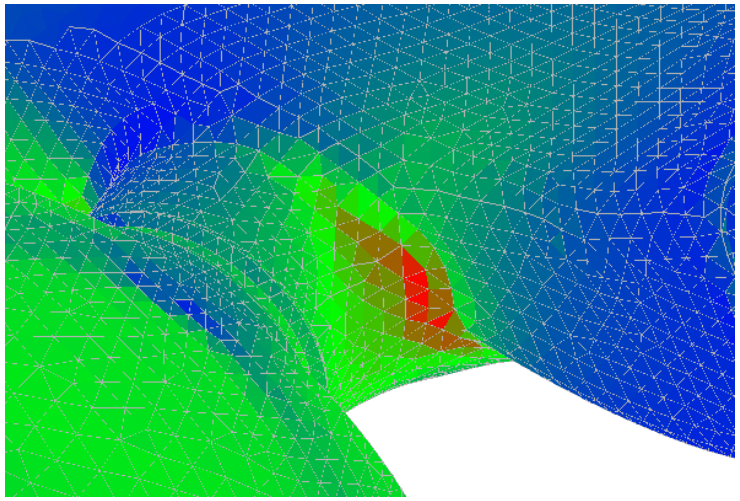
Nem mindenki küld mindenkinek értéket a sokszínűség megőrzése miatt.

Az eredményül kapott legfontosabb deformációk

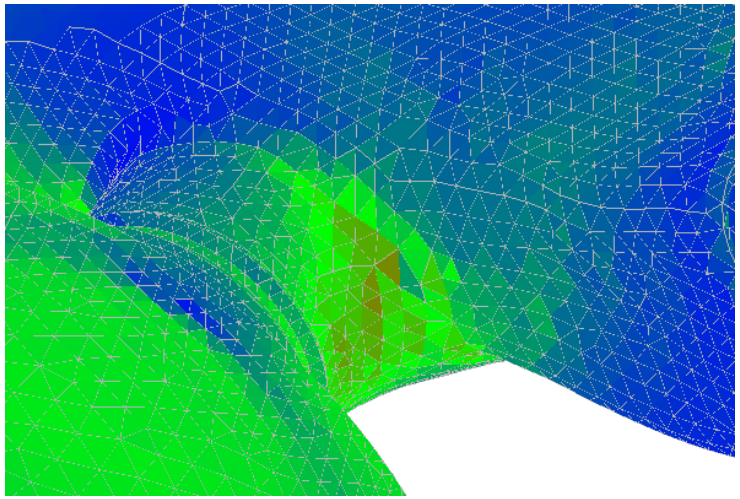


Felületi nyomáseloszlás

Eredeti:



Optimalizált:



Gázáramlás számítása nagyfeszültségű megszakítóban

Résztvevők: H.Z., H.A. (áramlás), Gáspár Csaba (elektromos és mágneses tér), Lotfi Abdelhakim (rácsgenerálás).

Speciális MHD probléma mozgó peremekkel.

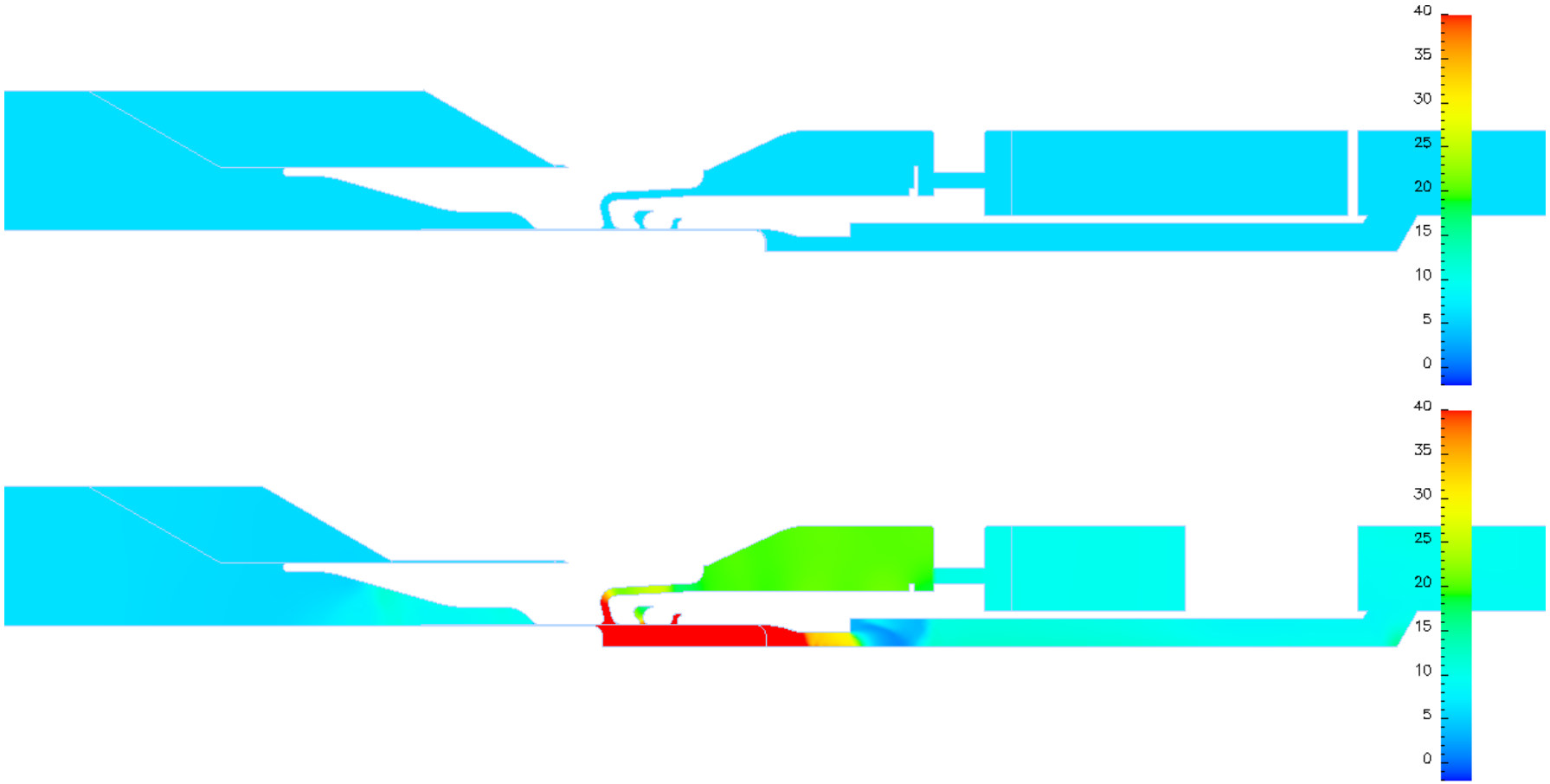
Az áramlási számítás hasonló az előző alkalmazáséhoz, de most

- több komponensű gáz áramlását kell modellezni;
- nem-ideális gáz állapotegyenletei szükségesek ($T = 40000K$ is előfordul);
- erősen torzuló tartományokat eredményező mozgó alkatrészeket kell követni;
- erős lökéshullámok terjednek a rendszerben;
- a pólusok közti elektromos és mágneses teret folytonosan újra kell számolni;
- Joule-hő, Lorentz-erő hatása fontos;
- radiatív hűlés és fűtés alapvető fontosságú;

- turbulencia is szerepet játszik.

A kód futásideje jelentősen növekedett az előző feladatéhoz képest
$\Longrightarrow$genetikai típusú algoritmus nem képzelhető el alakoptimalizációra.

A megszakító geometriájának áttekintése



Eredmények

Áttekintés néhány animáció segítségével:

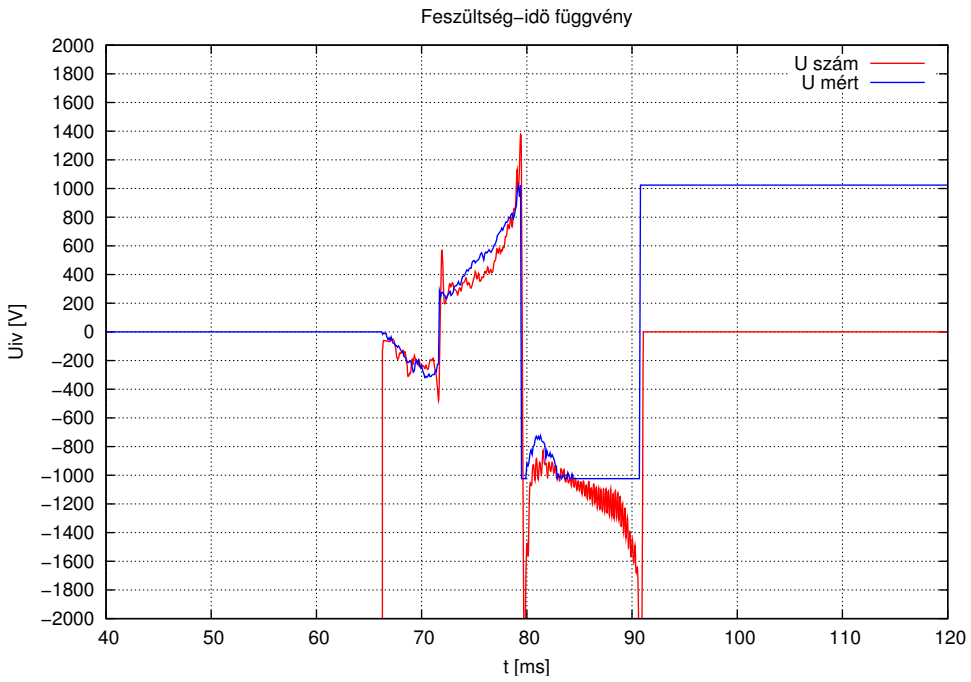
Nyomás: áttekintés, pólus környéke.

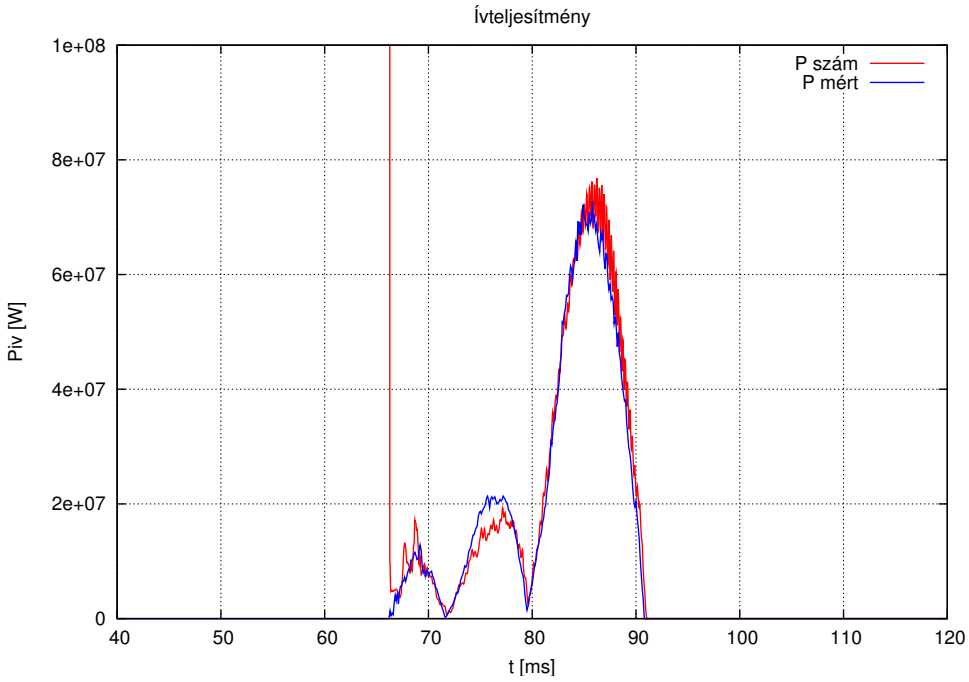
Mach-szám: áttekintés.

Hőméréklet (és sebesség): áttekintés, az ív környéke, az ív környéke (sebességgel).

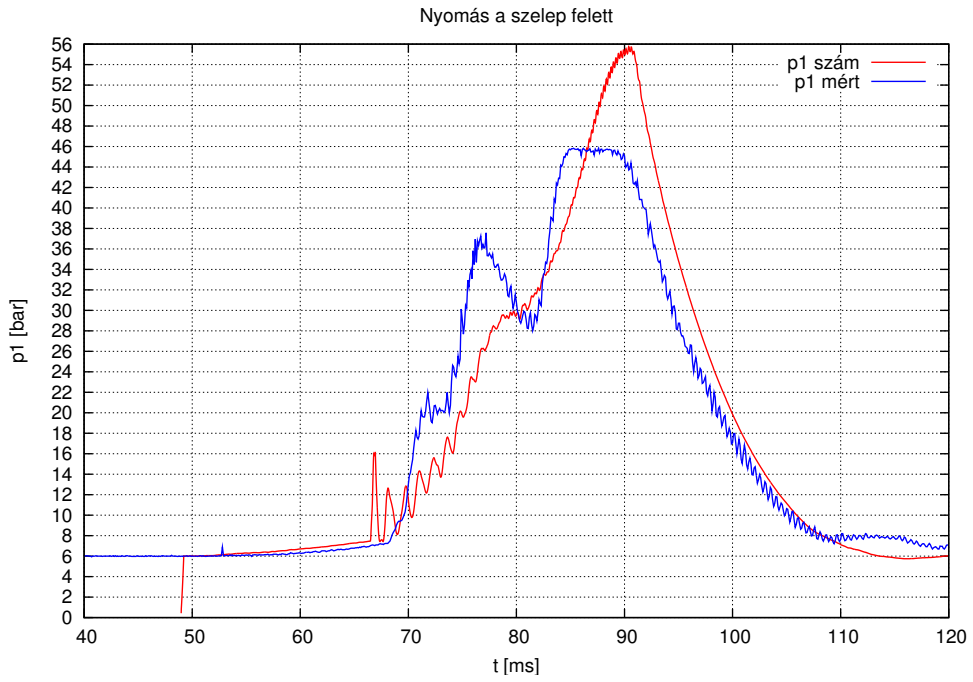
Összevetés mérési eredményekkel: jó egyezés.

Ívfeszültség:





Nyomás egy pontban:



Példa a kód lerobbanására

Megfigyelés a 2. alkalmazás valódi adatain való futtatásnál: egyébként jó numerikus módszerekre (pl. Vijayasundaram-módszerre) bizonyos paraméterek esetén a kód elszáll (NaN-ok megjelenése és elszaporodása).

Hasonló leállás tapasztaltunk a Fluent-nél is, pl. ha nagy nyomáskülönbség által hajtott gázáramlást vizsgálunk: többször is T alulcsordult (0 alá).

Ezt a jelenséget vizsgáltuk numerikus kísérletekkel és elmleti számítással (dinamikai rendszerek kvalitatív tulajdonságai).

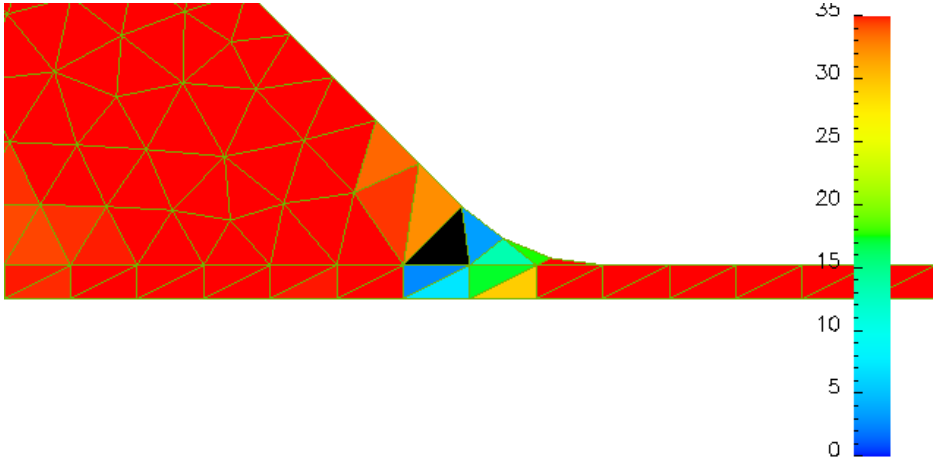
Egy elméleti eredményünk: a Vijayasundaram módszer pozitivitás-tartásához szükséges az, hogy a lépésköz a CFL-feltételből (lineáris stabilitási feltételből) számolt érték felénél kisebb legyen.

Tesztfeladat: erősen különböző nyomású részeket tartalmazó gáz időbeli fejlődése az

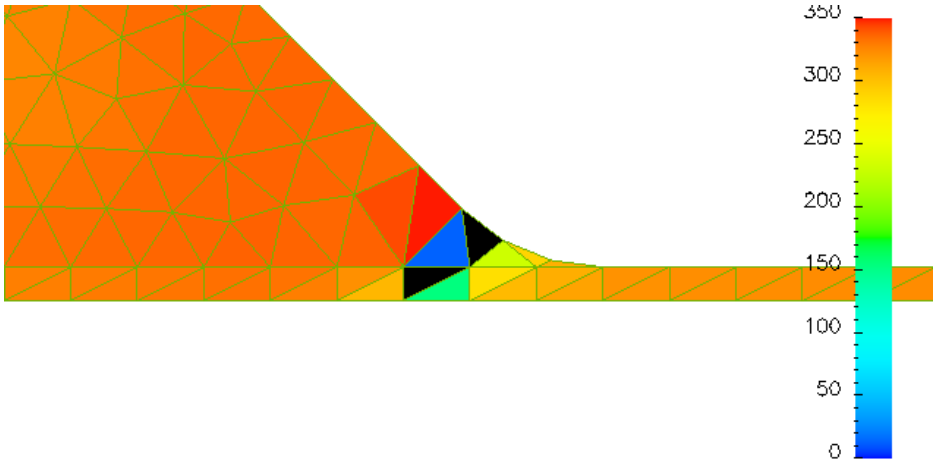
előző alkalmazás feltételei mellett.

Lásd a mellékelt animációkon és a következő ábrán!!

A kód lerobbanásának oka: egyes cellákban ρ negatívvá válik.



sűrűség:



hőmérséklet:

Áttekintés: hőmérséklet. Nyak: sűrűség, hőmérséklet.

Általános áramlástani optimalizáló algoritmus

Kerete: Széchenyi István Egyetem Járműipari Regionális Egyetemi Tudásközpont (SZE JRET), Irányító Testület elnöke: Dr. Czinege Imre

Projekt: Optimalizálás és mérnöki számítások (projektvezető: HZ)

Egyik feladatunk: általános áramlástani optimalizáló algoritmus és kód kidolgozása

Státusz: folyamatban.

Lényege: CAD-környezetben megfogalmazott feladat; számítások kereskedelmi szoftverekkel (pl. Fluent, StarCD)

Egy tesztfeladat

Feladat: adott nyomáskülönbség által meghajtott áramlás tömegáramának maximalizálása a be- és kiáramló csövek irányának változtatásával.

Véletlenszerű kiindulás:	$\dot{m} = 0,030$	–
Vélhető optimális eset:	$\dot{m} = 0,119$	$(0, 0, 0, 0)$
Opt. eredménye:	$\dot{m} = 0,099$	$(4.7, 0.7, -35.5, -77.4)$

Irodalom

1. A. Horváth and Z. Horváth, Numerical simulation of compressible fluid flow in 3D domains with translating boundaries. PAMM (Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics) Volume 4, Issue 1 , pp. 422 - 423. (2004) DOI: 10.1002/pamm.200410192
2. Z. Horváth and A. Horváth, Numerical simulation of compressible fluids with moving boundaries: an effective method with applications. Feistauer, M. (ed.) et al., Numerical mathematics and advanced applications. Proceedings of ENUMATH 2003, the 5th European conference on numerical mathematics and advanced applications, Prague, Czech Republic, August 18-22, 2003. Berlin: Springer. 471-482 (2004).
3. A. Horváth and Z. Horváth, Optimal shape design of Diesel intake ports with evolutionary algorithm. Feistauer, M. (ed.) et al., Numerical mathematics and advanced applications. Proceedings of ENUMATH 2003, the 5th European conference on numerical mathematics and advanced applications, Prague, Czech Republic, August 18-22, 2003. Berlin: Springer. 459-470 (2004).

4. A. Horváth and Z. Horváth, Application of CFD numerical simulation for intake port shape design of a diesel engine. J. Comput. Appl. Mech. 4, No.2, 129-146 (2003).

5. Z. Horváth, On the positivity step size threshold of Runge-Kutta methods. Applied Numerical Mathematics, Vol. 53/2-4 pp. 341-356 (2005).

6. Z. Horváth, On the positivity of matrix-vector products. Linear Algebra and its Applications. 393C pp. 253-258 (2004).

7. Z. Horváth, Positively invariant cones of dynamical systems under Runge-Kutta and Rosenbrock-type discretization. PAMM (Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics) Volume 4, Issue 1 , pp. 688 - 689. (2004) DOI: 10.1002/pamm.200410325

8. Z. Horváth, Positivity of Runge-Kutta and diagonally split Runge-Kutta methods. Applied Numerical Mathematics (28)2-4 (1998) pp. 359-369.

1. Mack, P., Wegner, B., Bercsey, T., Vajna, S., Kickermann, H., Kellner, P.: *Computer Aided Optimization of Cylinder Head Inlet Ports Using Genetic Algorithms*, in: Proceedings of ICED 99, München, herausgegeben von U. Lindemann, H. Birkhofer, H. Meerkamm, S. Vajna, München, 1999

2. Marco-Blaszka, N., Désidéri, J.: *Numerical solution of optimization test-cases by genetic algorithms* (INRIA research report 3622)

3. Marco, N. and Lanteri, S.: *A two-level paralellization strategy for genetic algorithms applied to optimum shape design* (Parallel Computing, Vol.26, pp 377-397. 2000.)

4. Winter, G., Galván, B., Alonso, S., González, B.: *Evolving from genetic algorithms to flexible evolution agents*. GECCO Late Breaking Papers 2002: 466-473

Záró megjegyzések

1. Saját készítésű kód szerepe, létjogosultsága: „verifikálás” kereskedelmi szoftverekkel (Fluent, StarCD) végrehajtása után mindenképpen
2. Elméleti kutatások folytatása kereskedelmi forgalomban lévő szoftverekre
3. Automatikus optimalizálás kérdései