

Slovenská technická univerzita v Bratislave  
STUBA Green Team, Vazovova 2757/5, Bratislava, 811 07

# Aerodynamika

*Návod a protokol na praktické cvičenie*

01.03.2024

Bratislava



## **Laboratórny protokol – aerodynamika**

**Téma:** Simulácia prúdenia vzduchu okolo jednoduchkej 3D geometrie

### **Úlohy:**

1. Oboznámenie sa s teoretickou časťou problematiky
2. Úprava geometrie v programe ANSYS Space Claim
3. Nastavenie okrajových podmienok simulácie v programe ANSYS Fluent
4. Vyhodnotenie simulácie pomocou grafických výstupov

### **Teoretická časť:**

Základy aerodynamiky a prúdenia vzduchu

- Hustota
- Reynoldsovo číslo
- Laminárne vs. turbulentné prúdenie
- Úplav

Princípy numerických simulácií prúdu vzduchu

- Finite Element Method (FEM)
- Computational Fluid Dynamics (CFD)

Metódy a techniky simulácie prúdenia vzduchu

- Eulerove vs. Navier-Stokesove rovnice

### **Metodika:**

Úprava geometrie v programe ANSYS Space Claim

- Import geometrie
- Oprava a optimalizácia geometrických chýb

Nastavenie okrajových podmienok simulácie v programe ANSYS

- Tvorba povrchovej siete
- Tvorba objemovej siete

Vyhodnotenie

- Číselné výsledky
- Grafické výsledky

## Základy aerodynamiky a prúdenia vzduchu

**Aerodynamika** je odvetvie mechaniky tekutín, zaoberajúce sa prúdením vzduchu okolo telies. Riešenie aerodynamického problému zahŕňa počítanie rôznych vlastností a veličín prúdiaceho vzduchu, ako je jeho rýchlosť, tlak, teplota a hustota. Porozumenie tejto problematiky umožňuje výpočet približných síl a momentov pôsobiacich na obtekané teleso.

*Hlavným účelom aerodynamiky závodného auta je zlepšenie jazdných vlastností a správnym upravením karosérie, zlepšenie výkonu tak, že jeho aerodynamický odpor bude znížený alebo jeho aerodynamický prítlak (záporný vztlak) sa zvýši alebo oboje. Takéto vylepšenia môžu mať za následok zvýšenie rýchlosti auta na rovinách a/alebo pri jazde v zákrutách.*

### Hustota

**Reynoldsovo číslo** je bezrozmerná hodnota, ktorá meria pomer inerciálnych síl k viskóznym silám a popisuje stupeň laminárneho alebo turbulentného toku. Systémy, ktoré pracujú na rovnakom Reynoldsovom čísle, budú mať rovnaké charakteristiky prietoku, aj keď sa prúdenie, rýchlosti a charakteristické dĺžky toku líšia.

Využitie:

Vzťah pre výpočet Reynoldsovho čísla:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot L}{\mu} [-]$$

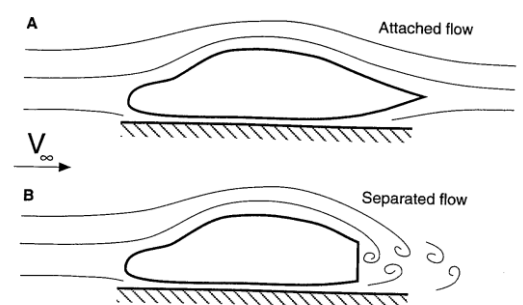
Kde:  $\rho$  – hustota [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]

$v$  – rýchlosť tekutiny [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]

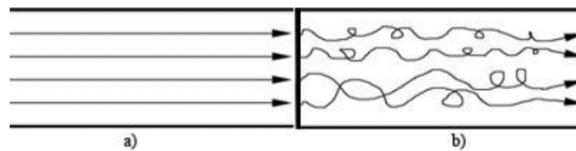
$L$  – charakteristická dĺžka toku (dĺžka auta) [m]

$\mu$  – koeficient dynamickej viskozity [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ]

**Prúdnica a typy prúdenia.** Prúdnica je dráha častice obtekajúcej tekutiny okolo telesa. Pozorovaním niekoľkých stôp v prúde je možné vidieť, či prúdenie sleduje tvar vozidla tesne popri jeho povrchu. Ak prúd presne kopíruje tvar povrchu, tok sa považuje za príľahlý. Ak prúdenie nekopíruje tvar povrchu, tok sa považuje za oddelený. V prírode, ale aj v technike podľa tvaru prúdnic pozorujeme dva rozdielne typy prúdenia:

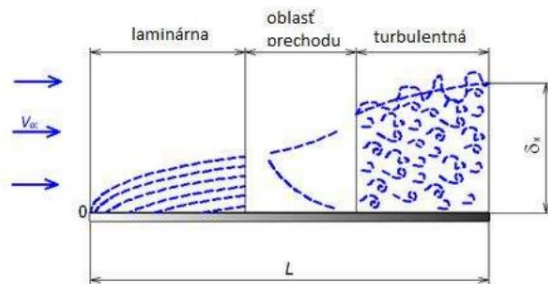


- laminárne
- Turbulentné



**Medzná vrstva a separácia medznej vrstvy.** Nachádza na každom telese, okolo ktorého prúdi tekutina, alebo ktoré sa samo v tekutine pohybuje. Vplyvom viskozity vzniká tenká vrstva zabrzdenej tekutiny - medzná vrstva, ktorá je brzdená na povrchu telesa. Táto hrúbka medznej vrstvy je na nábehovej hrane nulová a na odtokovej hrane maximálna.

Odtrhnutie toku alebo oddelenie medznej vrstvy je oddelenie hraničnej vrstvy od povrchu telesa (obrázok 1.4). K oddeľovaniu dochádza v prúde, ktoré sa spomaľuje so zvyšujúcim tlakom, napríklad po prechode najhrubšou časťou prúdnicového telesa alebo pri prechode cez rozširujúci sa priechod.



**Úplav** je oblasť vírivého prúdenia, ktoré sa nachádza za obtekaným telesom.

## Princípy numerických simulácií prúdu vzduchu

**Finite Element Method (FEM)** je numerická technika, ktorá sa používa na riešenie diferenciálnych rovníc, ako sú napríklad rovnice mechaniky alebo rovnice tepla, v rôznych oblastiach inžinierstva a vedy. Táto metóda sa často používa na modelovanie fyzikálnych procesov v komplexných štruktúrach a systémoch, kde analytické riešenia nie sú dostupné alebo praktické.

Princíp metódy konečných prvkov spočíva v rozdelení fyzikálnej domény na malé časti nazývané "konečné prvky". Každý konečný prvok predstavuje jednu časť oblasti, v ktorej je problém riešený. Rovnice, ktoré popisujú fyzikálny jav v každom prvku, sú potom lineárne aproximované. Tieto rovnice sa potom zostavia do sústavy algebraických rovníc, ktoré sa dajú riešiť numerickými metódami.

### Kľúčové prvky metódy konečných prvkov zahŕňajú:

1. Diskretizácia oblasti: Fyzikálna oblasť, ktorá sa má modelovať, je rozdelená na malé, jednoducho definovateľné časti, nazývané konečné prvky alebo elementy.
2. Výber aproximujúcich funkcií: Pre každý konečný prvok sa vyberú vhodné aproximujúce funkcie, ktoré popisujú správanie fyzikálneho javu v tomto prvku.
3. Vytvorenie sústavy rovníc: Základné rovnice fyzikálneho javu sa diskretizujú pomocou aproximujúcich funkcií a integrácia sa uskutočňuje cez každý konečný prvok. To vedie k sústave algebraických rovníc.
4. Riešenie sústavy rovníc: Sústava algebraických rovníc sa rieši pomocou numerických metód, ako sú metóda najmenších štvorcov, metóda gradientu, iteratívne metódy atď.
5. Vyhodnotenie výsledkov: Po riešení sústavy rovníc sa vypočítajú a vyhodnotia výsledky, ktoré poskytujú informácie o správaní systému alebo štruktúry podľa zvoleného fyzikálneho javu.

FEM sa používa v širokej škále aplikácií vrátane mechaniky pevných látok, tepla a hmoty, elektromagnetizmu, kovových výrobných procesov, ale aj v biomechanike a iných disciplínach. Je to veľmi výkonná technika, ktorá umožňuje modelovanie zložitých systémov s vysokou presnosťou a efektívnosťou.

**Computational Fluid Dynamics (CFD)** je odvetvie numerického inžinierstva, ktoré sa zaoberá simuláciou a analýzou prúdenia tekutín a plynu, ako je napríklad vzduch, pomocou počítačových metód. CFD sa používa na modelovanie a simuláciu prúdenia vzduchu, vody, alebo iných tekutín a plynu v rôznych aplikáciách od aerodynamiky a hydrodynamiky po procesy v strojárstve, energetike, životnom prostredí a ďalších odvetviach.

### Princíp CFD zahŕňa nasledujúce kľúčové kroky:

1. Diskretizácia priestoru: Riešená oblasť, kde sa vyskytuje prúdenie tekutiny alebo plynu, je rozdelená na diskretizačné bunky alebo mriežku. Tento proces sa nazýva "mriežkovanie" a je kritický pre presnosť a efektivitu simulácie.

2. Formulácia zákonnosti fyzikálneho prúdenia: Na základe fyzikálnych princípov (napr. Navier-Stokesove rovnice pre nestlačiteľné alebo stlačiteľné prúdenie, rovnica kontinuity) a materiálových vlastností sa formuluje matematický model, ktorý popisuje správanie tekutiny alebo plynu.

3. Numerická aproximácia: Diskretizované rovnice fyzikálneho prúdenia sa riešia pomocou numerických metód, ako sú konečné diferencie, konečné objemy alebo konečné prvky. Tieto metódy sa aplikujú na jednotlivé bunky mriežky, aby sa určili hodnoty toku tekutiny alebo plynu.

4. Riešenie rovníc prúdenia: Diskretizované rovnice sa riešia pomocou počítačových algoritmov a numerických metód, aby sa získali aproximované riešenia prúdenia tekutiny alebo plynu v celej oblasti záujmu.

5. Vyhodnotenie výsledkov: Po dokončení simulácie sa analyzujú a interpretujú výsledky, ako sú rýchlosť, tlak, teplota, turbulentná viskozita a iné charakteristiky prúdenia. Tieto výsledky sa porovnávajú s experimentálnymi údajmi alebo analytickými riešeniami na overenie presnosti modelu.

CFD sa využíva na riešenie širokej škály problémov, vrátane aerodynamiky vozidiel, návrhu turbín a kompresorov, analýzy tepelných výmenníkov, predpovede počasia, simulácie spálenia v spaľovacích motorech a mnoho ďalších aplikácií. Je to nástroj, ktorý umožňuje inžinierom a vedcom simulovať a analyzovať komplexné prúdenie tekutín a plynu v rôznych systémoch a prostrediach.

## Navier-Stokesove rovnice vs. Eulerove rovnice

Navier-Stokesove rovnice popisujú rovnováhu síl pri prúdení skutočnej tekutiny. Vyjadrujú vzťah, kedy je zotrvačná sila rovná súčtu hmotnostnej, tlakovej a trecej sily.

$$\vec{F}_s = \vec{F}_o + \vec{F}_p + \vec{F}_t$$

Teda oproti Eulerovej rovnici, pre prúdenie ideálnej tekutiny pristupujú v prípade skutočnej tekutiny trecej sily, ktoré sú spôsobené viskozitou tekutiny. Pre matematické vyjadrenie trecích síl sa používa Newtonov vzťah, ktorý je aplikovaný v súradnicovom systéme. Tento výraz vyjadruje vzťah medzi viskóznym napätím a deriváciou rýchlosti podľa súradnice kolmej na smer pohybu. Trecia sila sa dá vyjadriť podobne ako tlakovú silu.

$$F_t = \tau S = \eta \frac{dv}{dy} S = \nu \rho \frac{dv}{dy} S$$

Kde:  $\nu$  – kinematická viskozita [ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ]

Ak sa stanoví rovnováha všetkých síl pôsobiacich na elementárny objem tým, že sa skôr odvodená Eulerova rovnica rozšíri o zmeny normálových a dotyčnicových napätí, presnejšie o ich derivácie podľa súradníc, dostaneme Navier-Stokesovu rovnicu, ktorá vo vektorovom zápise pre nestlačiteľnú tekutinu v pravouhlom súradnom systéme má tvar:

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \text{grad}) \vec{v} = \vec{a} - \frac{1}{\rho} \text{grad } p + \nu \Delta \vec{v}$$

V tejto rovnici výraz  $\partial v / \partial t$  je tzv. lokálna (miestna) derivácia, ktorá nie je závislá od premiestňovania tekutiny. Výraz  $v \cdot \text{grad } v$  je tzv. konvektívny člen (konvektívna derivácia), závisí od rýchlosti premiestňovania častíc. Tento výraz je nelineárny čo prináša problémy pri integrácii NS rovnice. Posledný výraz  $\nu \Delta v$ , je viskózný člen a predstavuje treciu potrebnú k prekonaniu viskózneho trenia tekutiny.

Laplaceov operátor aplikovaný na tri súradnice rýchlosti:

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

Táto rovnica sa od Eulerovej rovnice pre ideálnu tekutinu líši práve týmto posledným členom na pravej strane. Navier-Stokesovu rovnicu je možné rozpísať do troch smerov súradníc  $x, y, z$ .

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} &= a_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right) \\ \frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} &= a_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left( \frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right) \\ \frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} &= a_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left( \frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) \end{aligned}$$

Pri riešení prúdového poľa sa spravidla určuje rozloženie rýchlostí a tlakov. Vedľa pohybovej rovnice sa uplatní i rovnica kontinuity. V systéme diferenciálnych Navier - Stokesových rovníc a rovnice kontinuity sú štyri neznáme veličiny, tj. zložky rýchlosti  $v_x, v_y, v_z$  a tlak  $p$ . Pre riešenie týchto rovníc musia byť známe vonkajšie zrýchlenia  $a$ , hustota tekutiny  $\rho$  a okrajové podmienky. Navier-Stokesove rovnice patria medzi nelineárne parciálne diferenciálne rovnice a nie sú všeobecne riešiteľné. Analytické riešenie je dostupné pre jednoduchšie prípady laminárneho prúdenia. V súčasnej dobe i zložité prípady laminárneho prúdenia sú riešiteľné numerickými metódami, napr. metódou konečných objemov a metódou konečných prvkov.



## Metodika

### Všeobecný postup riešenia:

- Vytvorenie modelu geometrie
- Tvorba siete
- Import siete
- Kontrola siete
- Výber riešiča
- Výber riešených rovníc (laminárne, turbulentné, chemické, atď.)
- Zadanie materiálových vlastností
- Zadanie okrajových podmienok
- Nastavenie parametrov riešiča
- Nastavenie monitorovania riešení
- Inicializácia prúdového poľa
- Výpočet
- Kontrola výsledkov
- Uloženie výsledkov
- V prípade potreby zjemnenie siete alebo úprava parametrov modelu (a návrat k bodu 4)

### Úprava geometrie v programe ANSYS Space Claim

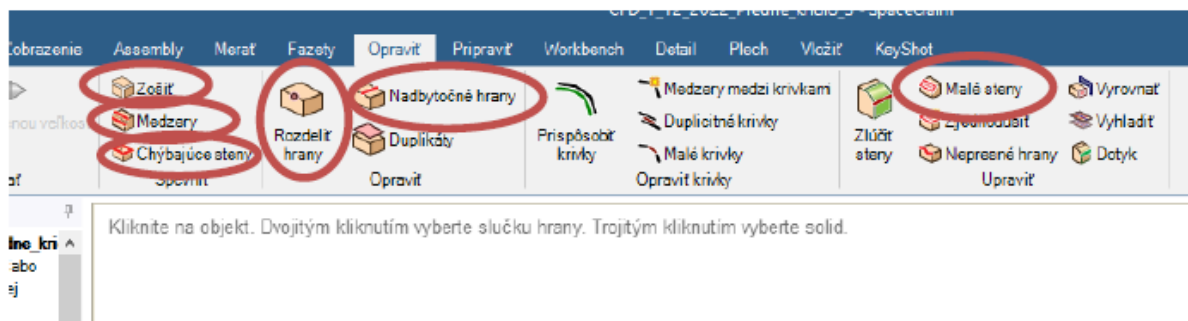
V programe ANSYS Space Claim používame formát súboru STEP, ktorý si vygenerujeme z CAD programu. Geometria, ktorú budeme používať by sa mala nachádzať vo „fiktívnom veternom tuneli“<sup>1</sup>, ktorý si patrične pripravíme. Percento voľného priestoru okolo objektu vo veternom tuneli, ktoré by malo byť zachované, aby steny neovplyvňovali výsledky, môže byť rôzne v závislosti od konkrétneho experimentu, typu objektu a ďalších faktorov. Avšak, vo všeobecnosti sa snažíme minimalizovať vplyv stien veterného tunela na prúdenie vzduchu okolo objektu.

*Typické odporúčania zahŕňajú zabezpečenie aspoň 10-15% voľného priestoru okolo objektu vo veternom tuneli. To znamená, že priestor medzi okrajom objektu a stenou veterného tunela by mal byť aspoň 10-15% veľkosti objektu. Avšak, v niektorých prípadoch sa odporúča ešte väčší voľný priestor, a to najmä pri simuláciách, kde je potrebná väčšia presnosť alebo pri vysoko citlivých experimentoch. V týchto prípadoch by mohlo byť vhodné mať voľný priestor 20% alebo viac voči veľkosti objektu. Je dôležité poznamenať, že optimálny pomer medzi veľkosťou voľného priestoru a presnosťou výsledkov môže byť rôzny v závislosti od konkrétnej aplikácie a podmienok experimentu. Preto je potrebné vykonávať dôkladné overovanie a validáciu experimentálnych nastavení pre každý konkrétny prípad.*

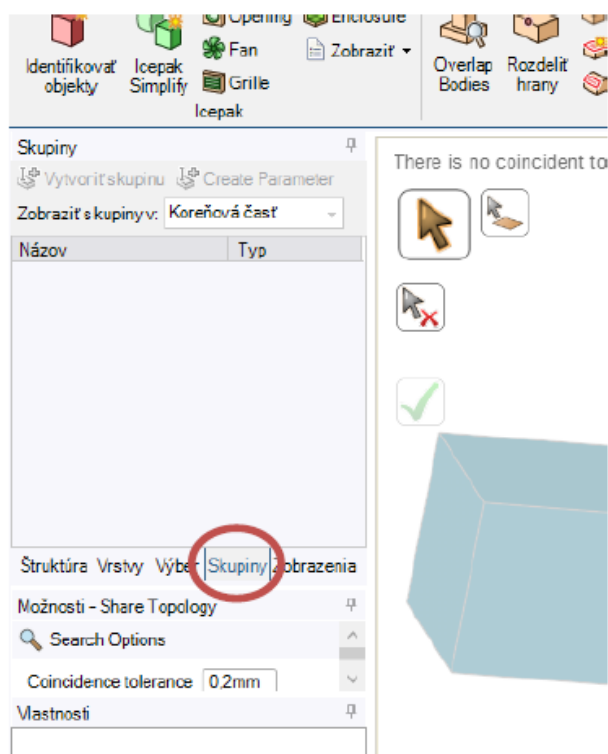
---

<sup>1</sup> Box ohraničujúci objekt, okolo ktorého prúdi tekutina; slúži ako steny pre symetriu, vstup a výstup

1. Otvoríme Space Claim, načítame súbor step: file – open (treba prenastaviť na „all suport files“)
2. Opravíme geometriu nasledovne v tomto poradí:
  - Záložka Repair (opraviť) – small faces (malé steny), stitch (zošit), gaps (medzery), missing faces (chýbajúce steny), extra edges (nadbytočné hrany), solit edges (rozdeliť hrany)
  - Záložka Prepare (pripraviť) – short faces (krátke hrany), interference (kolízia)



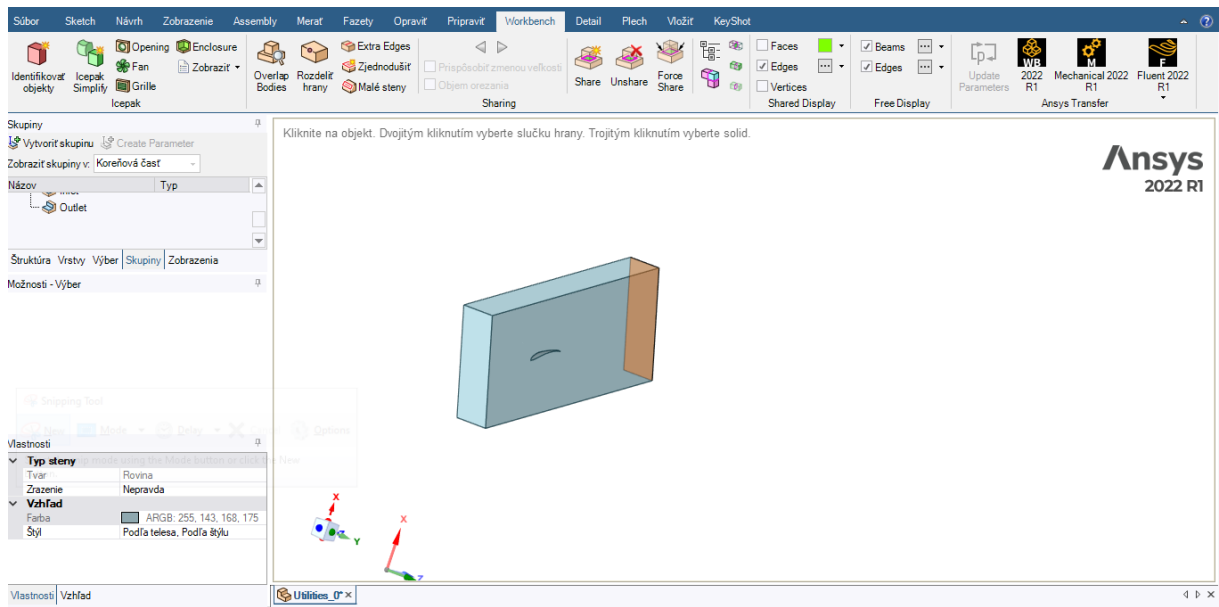
...nenašli žiadne rozdelené hrany



3. Ďalej pomenujeme steny, prekliknutím sa do Groups (Skupiny) – v strome:

- Inlet – vstup
- Outlet – výstup
- Ground – podlaha
- Top – strop
- Symmetry – strany

4. Súbor s upravenou geometriou uložíme ako súbor Space Claimu

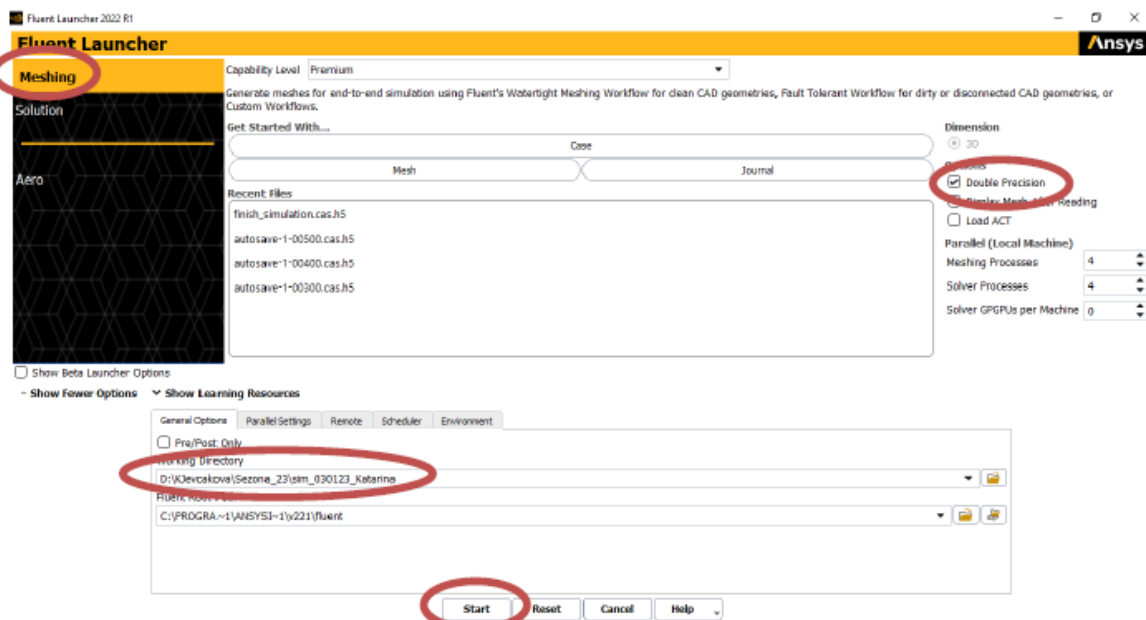


## Nastavenie okrajových podmienok simulácie v programe ANSYS

Ak máme súbor zo SC uložený, môžeme ho zavrieť a otvoriť program ANSYS Fluent. Po otvorení tohto programu, dostaneme nasledujúce okno, kde sú dôležité správne prvotné nastavenia.

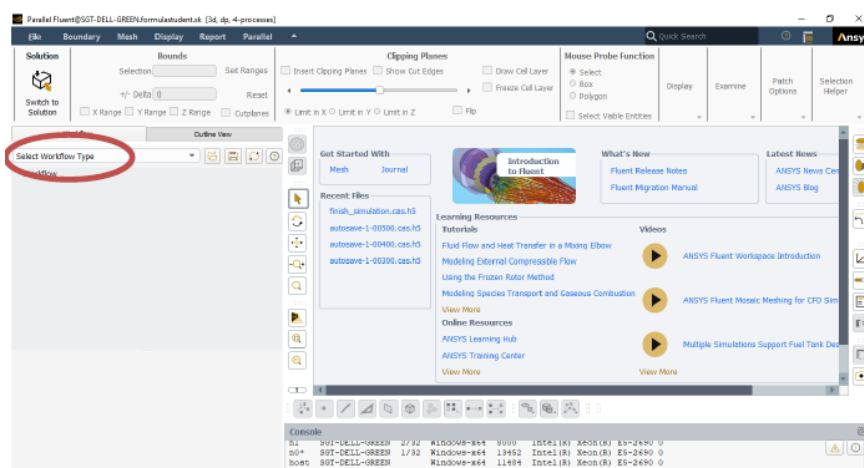
Prvotné nastavenia:

- zapnuté na MESHING
- zaškrtnuté DOUBLE PRECISION
- vybrať pracovný priečinok, kde sa nachádza upravená geometria v SC
- štart



Po štarte sa dostaneme do pracovného prostredia Fluentu. Prvým krokom je importovanie geometrie.

- Rozklikneme ponuku select workflow type – zvolíme select watertight geometry



## Cez IMPORT GEOMETRY

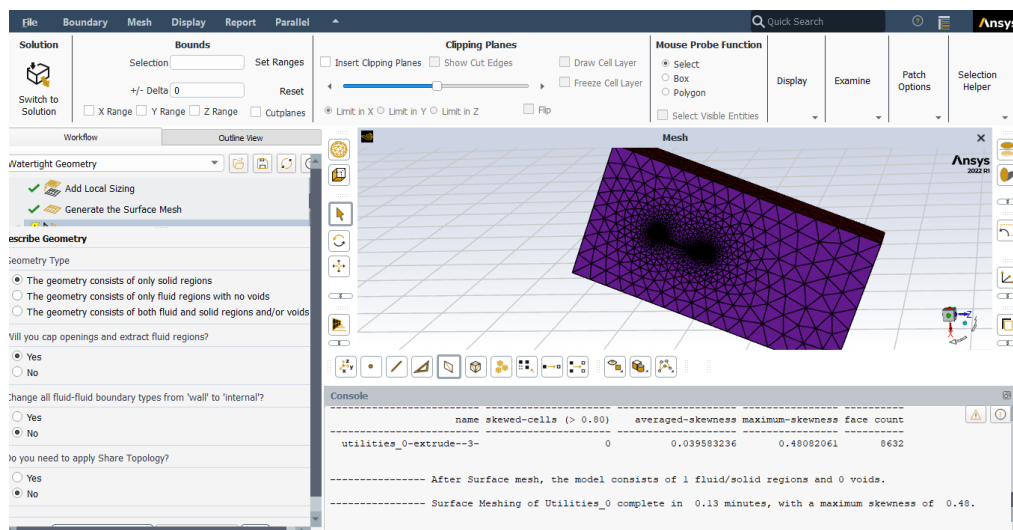
- Rozkliknúť cez „...“ a vybrať geometriu na importovanie
- File format : CAD
- Units: mm

## ADD LOCAL SIZING

- Would you like to add local sizing? – NO

## GENERATE THE SURFACE MESH

- Minimum size: 1 mm
- Maximum size: 50 mm
- Growth rate: 1.2
- Curvature normal angle (deg) : 14
- Potvrdiť Generate the Surface Mesh (zapísať počet buniek)



## DESCRIBE GEOMETRY

- The geometry consists of both fluid and soil regions and/or voids
- No
- Yes
- No
- Potvrdiť Describe geometry

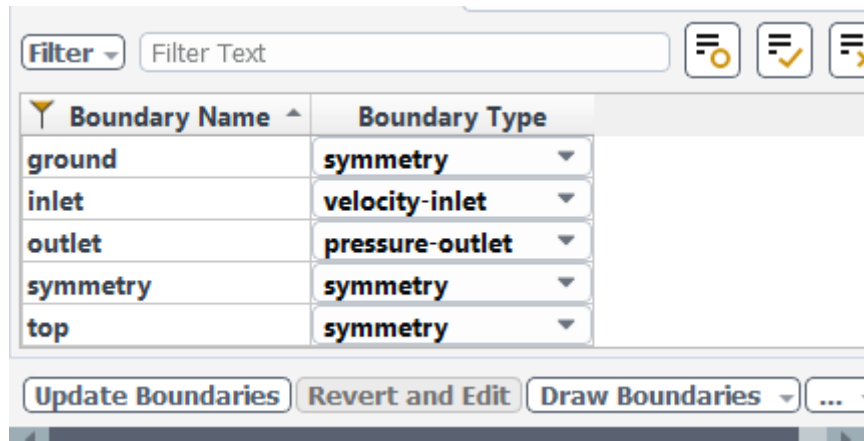
Ďalej prejdeme zo záložky *workflow* do záložky *outline view*.

- Rozkliknúť mesh object – extrude (kliknúť pravým) – vybrať diagnostics – connectivity and quality) – záložka quality – measure 1 – skewness – min. 1: 0.7
- Skewness:

Vrátime sa po tomto kroku do záložky *workflow*.

## UPDATE BOUNDARIES

- 



## CREATE REGIONS

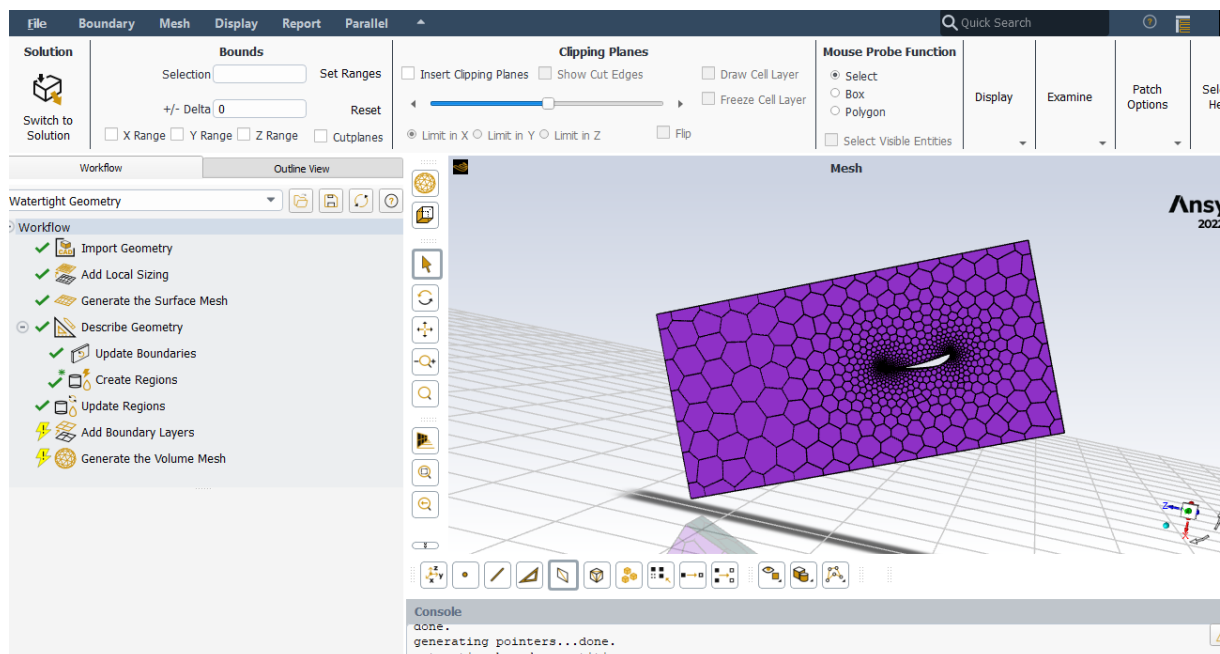
- Estimated number of fluids regions: 1

## UPDATE REGIONS

- Extrude - Fluid

Opäť záložka *outline view*. Klikneme pravým tlačidlom na „názov súboru“ a zvolíme možnosť automesh.

- Odkliknúť preč: keep solid cell zones
- Volume fill: poly-hexcore
- Options: zaškrtnúť marge cell zones within regions
- Potvrdiť – apply
- Mesh - yes

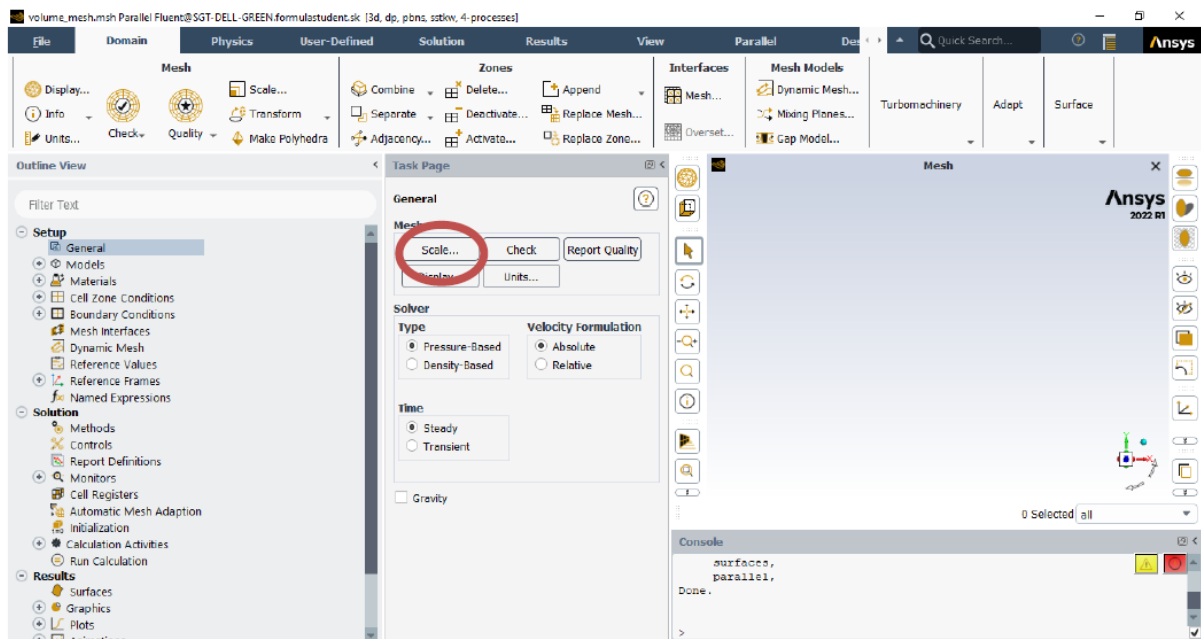


Po vygenerovaní objemového meshu si zapíšeme počet buniek.

Stále v záložke outline view:

- Mesh object – extrude – cell zones – pravým na auto node move
- Zároveň otvoriť report – cell limits – quality measure – inverse ortogonal quality – apply
- Auto node move – quality measure - inverse ortogonal quality – apply
- Report cell limit – compute
- Zapísať hodnoty: max a avg a to isté aj pre aspect ratio (namiesto ortogonal quality)

Počet elementov získame cez cell zones – pravým – info. Pravým tlačidlom klikneme na MODEL – prepare to solve – yes. Potom na ikonku SWITCH TO SOLUTION. Týmto sa dostaneme do prostredia určeného na posledné kroky pred spustením simulácie.



Zvolíme možnosť Scale

- View length unit in : mm
- Mesh was created in : mm
- Scale – close

Ďalej treba skontrolovať:

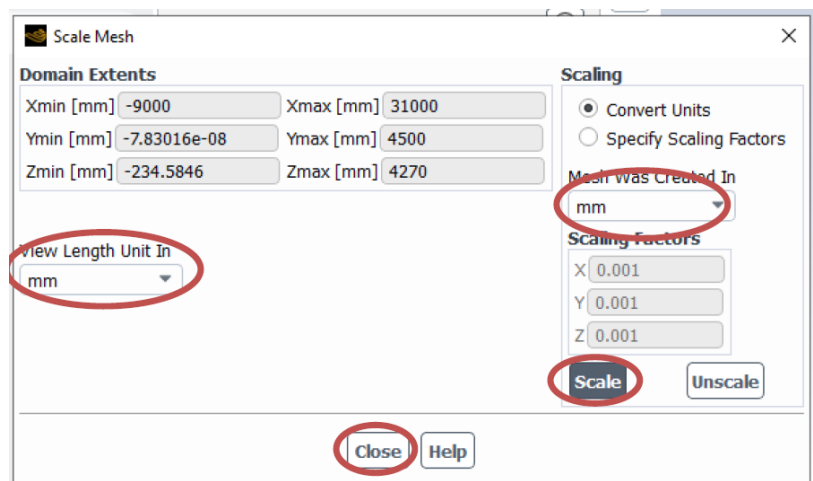
- Models – viscous: SST k- $\omega$
- Materials – fluid: air

V boundary conditions – inlet

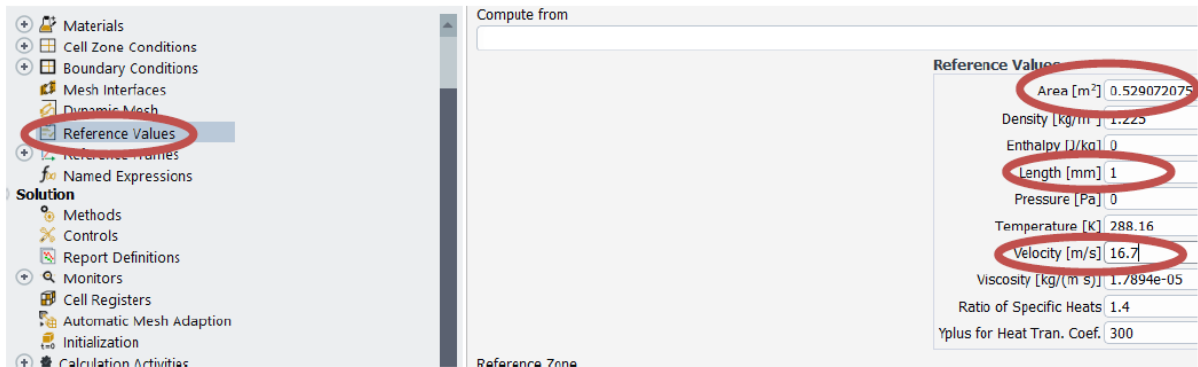
- Velocity magnitude (m/s): 16.7 – apply – close

Reference values:

- Velocity(m/s): 16.7

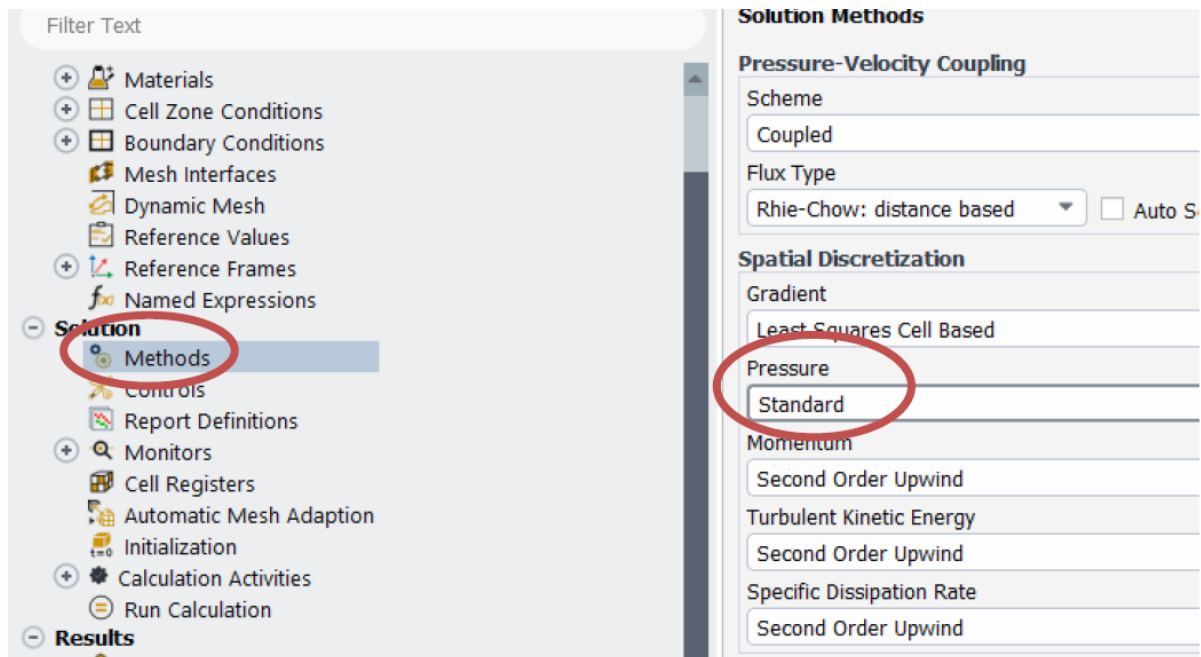


- Length: 1
- Area:  $0^\circ=0.0015 \text{ m}^2$ ;  $20^\circ=0.003 \text{ m}^2$ ;  $40^\circ=0.00706 \text{ m}^2$



#### Methods:

- Spatial discretization: pressure: standard



#### Report definitions:

- New – force – drag
  - name: drag
  - report output type: drag force
  - create: odkliknúť preč report file
  - ok
- New – force – lift
  - name: lift
  - report output type: lift force
  - force vector: X0 Y0 Z1
  - create: odkliknúť preč report file
  - ok



Boundary conditions – wall – pravým – display

Initialization – hybrid initialization – initialize

Calculation activities – autosave

- save data file every: 10
- each time
- zakliknúť retain only the most recent files
- min. number of data files: 1
- file name: D:/.../.../.../autosave
- ok

Run calculations

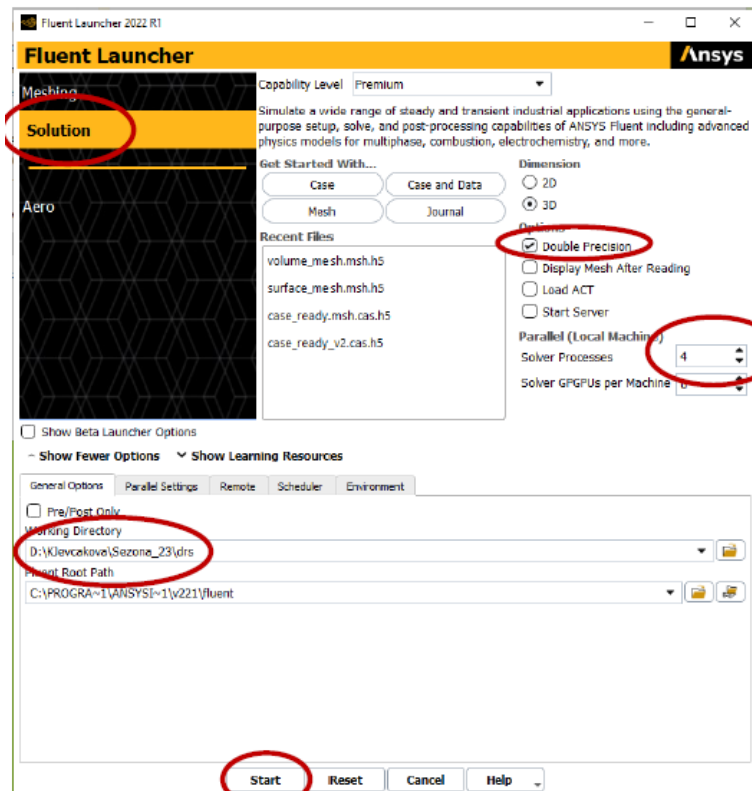
- parameters: number of iterations: 100
- calculate

Po zbehnutí simulácie uložíme dáta: file – write – case and data . name: finish\_simulation a môžeme zavrieť fluent.

## Vyhodnotenie

Po ukončení simulácie, uložení výsledkov, môžeme fluent zavrieť a znova ho spustiť, a to z nasledujúceho dôvodu:

- v počiatočných nastaveniach fluentu premneme na solution
- skontrolovať zakliknutie double precision
- vybrať priečinok, odkiaľ bude čerpať
- štart



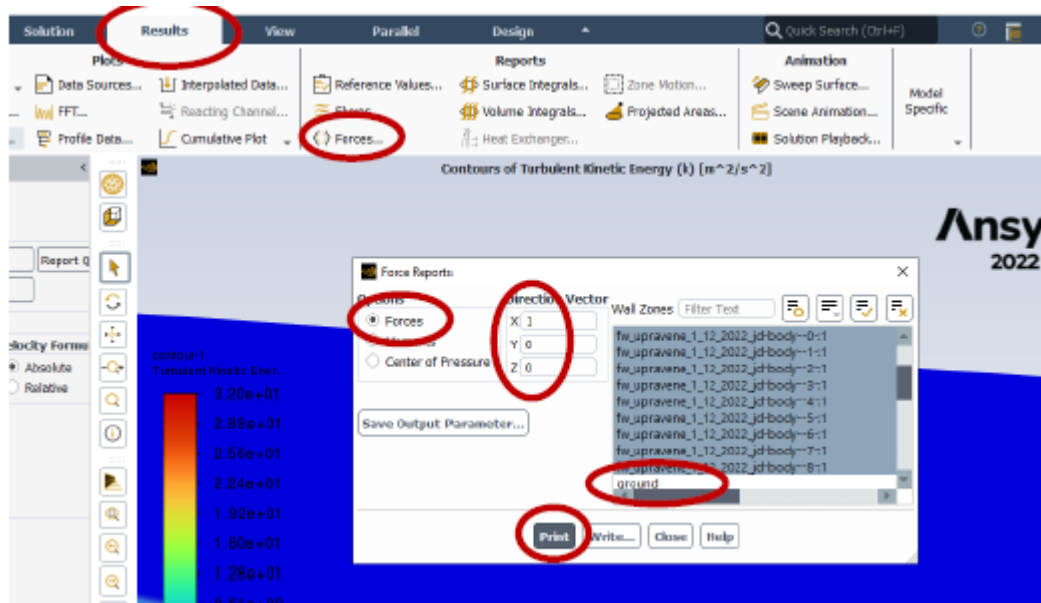
Simuláciu načítame cez file – read – case and data – finish\_simulation – ok

Ďalej si tam vieme zobrazíť grafický výsledok

- V strome (results) rozklikneme možnosť graphics – 2x klikneme na contours
- V nasledujúcom okne si vyberieme symmetry (stenu) nastavíme podľa toho, čo chceme sledovať buď: turbulence, pressure, velocity, ...
- Save/display
- Close

Číselné výsledky dostaneme následovne:

- Následne sa prepneme do záložky Results – forces – dosaneme okno Force Reports



### Prítlak – lift

- Options: forces
- Direction vector: X0 Y0 Z1
- Wall zones: vybrať všetko okrem ground (prítlak celého auta)
- Print

### Odpor – drag

- Options: forces
- Direction vector: X1 Y0 Z0
- Wall zones: vybrať všetko okrem ground (odpor celého auta)
- Print

**Poznámky:**

Surface mesh – cells:

Max. skewness:

Volume mesh - cells:

Avg. skewness:

Max. skewness:

Avg. aspect ratio:

Max. aspect ratio:

**Koeficient odporu:**

$$c_d = \frac{F_d}{\frac{1}{2}\rho A v^2} \quad [-]$$

**Koeficient vztlaku:**

$$c_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho A v^2} \quad [-]$$

**Koeficient tlaku:**

$$c_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2}\rho v_\infty^2} \quad [-]$$

**Koeficient celkového tlaku:**

$$c_{p \text{ tot}} = \left( \frac{p}{\frac{1}{2}\rho_\infty v_\infty^2} \right) + \left( \frac{v}{v_\infty} \right)^2 \quad [-]$$