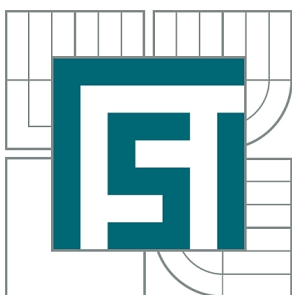




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV PROCESNÍHO A EKOLOGICKÉHO
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PROCESS AND ENVIRONMENTAL
ENGINEERING

VIRTUAL MODELLING VÝPOČETNÍ DOMÉNY PRO CFD SIMULACE

VIRTUAL MODELLING OF COMPUTATIONAL DOMAIN FOR CFD SIMULATIONS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

MATĚJ VOLEK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MILOSLAV DOHNAL

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav procesního a ekologického inženýrství

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Matěj Volek

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Základy strojního inženýrství (2341R006)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Virtual modelling výpočetní domény pro CFD simulace

v anglickém jazyce:

Virtual modelling of computational domain for CFD simulations

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Značný rozvoj výpočetní technologie v posledních dekadách přinesl na světlo světa nové možnosti řešení složitých, a mnohdy analyticky neřešitelných, parciálních diferenciálních rovnic popisující svět a dění okolo nás. V současné době při analýze zkoumaného zařízení se hojně využívá výpočetní dynamiky tekutin (CFD). Kromě komerčního softwarového vybavení, jako je například Gambit či zásuvný modul Ansys ICEM CFD, jsou dostupné i tzv. opensourcové nástroje jako je třeba SnappyHexMesh freewarového výpočetního nástroje OpenFOAM. U firem zabývajících se designem různých typů strojních součástí (např. Honeywell či Porsche) dochází k rozvoji využívání těchto freewarových výpočetních nástrojů.

Pro úspěšné řešení úkolu je tedy nutné:

1. Vytvořit výpočetní síť v prostředí Ansys a nejméně jednom volně dostupném softwaru pro tvorbu výpočetní sítě
2. Vyhodnotit kvalitu vytvořených sítí v nezávislém prostředí FLUENT
3. Porovnat vytvořené sítě

Cíle bakalářské práce:

Cíle, kterých má být dosaženo:

1. Zpracovat stručný úvod do metody konečných objemů
2. Provést krátkou rešerši volně dostupných softwarů pro tvorbu výpočetní sítě
3. Sestavení 3D geometrie
4. Vytvoření výpočetní sítě v prostředí Ansys a nejméně jednom volně dostupném softwaru pro tvorbu výpočetní sítě
5. Vyhodnocení vytvořených sítí v nezávislém prostředí FLUENT
6. Zhodnocení dosažených výsledků

Seznam odborné literatury:

[1] Ansys Fluent 12.1 User's Guide, Fluent, Inc., Lebanon, 2010

[2] Versteeg, H.K., and Malalasekera, W. "An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method", Longman Group Ltd., 1995

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Miloslav Dohnal

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/2015.

V Brně, dne 24.11.2014

L.S.

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.
Ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se věnuje open-source softwarům pro vytváření výpočtových sítí pro CFD simulace. V úvodní kapitole je představeno výpočtové modelování tekutin, stručně popsány řídicí rovnice a proveden úvod do diskretizace výpočtových domén. Druhá kapitola se zabývá rešerší softwarů určených k vytváření výpočtových sítí. Programy jsou v této kapitole popsány z pohledu uživatelského prostředí, možností tvorby sítě, a další. V poslední kapitole je provedeno srovnání dvou vybraných programů na reálném problému. V obou programech byla vytvořena síť, která byla vypočtena v softwaru Fluent. Výsledky výpočtu jsou následně porovnány.

KLÍČOVÁ SLOVA

CFD, síť, open-source, Ansys Workbench, Salome, víříč, Fluent

ABSTRACT

This thesis is devoted to open-source software for meshing in CFD simulations. In the opening chapter, there is introduced the computational modeling of fluid, briefly described governing equations and an introduction to the discretization of computational domain. The second chapter deals with the available mesh software. The programs are described in this chapter from the perspective of the user interface, the ability to create meshes, etc. The last chapter, there is a comparison of two selected programs on a real problem. In both programs was created a mesh which was calculated in the software Fluent. Then the calculation results are compared.

KEYWORDS

CFD, mesh, open-source, Ansys Workbench, Salome, Fluent

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VOLEK, M. *Virtual modelling výpočetní domény pro CFD simulace*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 38 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Miloslav Dohnal.

PROHLÁŠENÍ

Já, Matěj Volek, prohlašuji, že jsem bakalářskou práci *Virtual modelling výpočetní domény pro CFD simulace* vypracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité prameny a literaturu.

V Brně dne 29. 5. 2015

Matěj Volek

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji všem, kteří mne za celé tři roky studia podporovali a pomáhali mi jakoukoliv cestou. Zvlášť bych chtěl poděkovat panu Ing. Miloslavu Dohnalovi za uvedení do tajů výpočtového modelování tekutin a cenné rady při vypracování práce.

OBSAH

Úvod.....	11
1. Úvod do řešení CFD.....	12
1.1 Řídící rovnice	12
1.1.1 Rovnice kontinuity	12
1.1.2 Rovnice přenosu hybnosti	13
1.1.3 Rovnice přenosu energie	13
1.2 Metody řešení	13
1.2.1 Metoda konečných diferencí	13
1.2.2 Metoda konečných prvků	13
1.2.3 Metoda konečných objemů	14
1.3 Diskretizace	14
1.3.1 Kritéria kvality sítě.....	14
1.3.2 Typy buněk.....	15
1.3.3 Optimalizace sítě	15
2 Přehled softwaru pro vytváření sítě.....	16
2.1 Ansys Workbench.....	16
2.1.1 Uživatelské prostředí.....	16
2.1.2 Tvorba geometrie	17
2.1.3 Tvorba sítě a typ buněk	17
2.2 Salome	18
2.2.1 Uživatelské prostředí.....	18
2.2.2 Tvorba geometrie	18
2.2.3 Tvorba sítě a typ buněk	18
2.3 OpenFOAM.....	19
2.3.1 Uživatelské prostředí.....	19
2.3.2 Tvorba sítě a typ buněk - snappyHexMesh.....	20
2.4 Gmsh.....	20
2.4.1 Uživatelské rozhraní.....	21
2.4.2 Tvorba geometrie a sítě, typy buněk	21
2.5 Shrnutí	22
3 Porovnání na reálném problému	23
3.1 Geometrie	23
3.2 Parametry sítě	23

3.3	Vytvoření sítě v programu Ansys Workbench 14.5	24
3.4	Vytvoření sítě v Salome 7.5.1	25
3.5	Výpočet sítě.....	25
3.6	Porovnání dat z monitorovací plochy	26
3.6.1	Absolutní rychlost	26
3.6.2	Statický tlak.....	27
3.6.3	Intenzita turbulence	27
3.6.4	Kinetická energie turbulence.....	28
3.6.5	Disipace energie turbulence	28
3.7	Porovnání výsledků výpočtu	29
3.7.1	Rychlostní profil.....	29
3.7.2	Rozložení celkového tlaku	30
3.8	Interpretace výsledků výpočtu.....	31
	Závěr.....	34
	Seznam zdrojů.....	36
	Seznam použitých značek	38

ÚVOD

Modelování tekutin doznalo v posledních 50 letech velký rozvoj. Vývoj výpočetní techniky umožnil řešit do té doby téměř neřešitelné matematické rovnice. To bylo klíčové pro rozvinutí oborů, kde ve výpočtech hrály velkou roli parciální diferenciální rovnice. Konkrétně šlo například o pevnostní výpočty nejen strojních součástí, či o předpovídání chování tekutin v určitých prostředích. To znamenalo velké množství uspořené peněz, jež by jinak padly na složité experimenty. Finanční stránka se do tohoto vývoje promítá i dnes. Díky rozvoji internetu lze dnes v průběhu pár hodin sehnat takzvané open-source programy, které jsou, na rozdíl od komerčních systémů, zadarmo. Jsou ovšem tyto volně šiřitelné softwary srovnatelné s placenými?

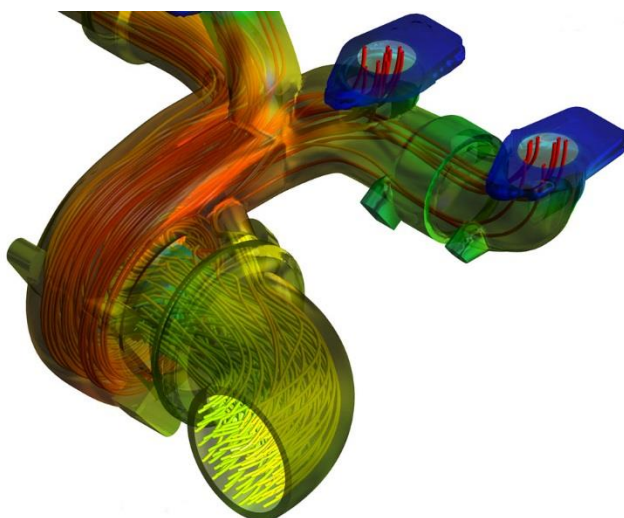
V první kapitole bude proveden úvod do počítačového modelování tekutin. Představeny budou řídicí rovnice, na nichž tato vědní disciplína stojí. Dále budou ukázány metody, kterými se tyto rovnice dají řešit. Nakonec bude představena diskretizace, neboli rozdělení výpočtové geometrie na výpočetní síť, přes kterou numerický výpočet probíhá.

Druhá kapitola bude věnována softwarům určeným pro vytváření sítě. Představeny budou tři volně šiřitelné programy a jeden placený program. Budou porovnávány z hledisek prostředí, typů buněk, a jiných.

Ve třetí kapitole bude provedeno porovnání dvou programů. Jeden z nich bude volně dostupně Salome, druhý komerční Ansys Workbench. Výstupy z obou programů budou propočítány ve výpočetním prostředí Fluent. Poté budou zhodnoceny výsledky a vyneseny závěr o kvalitativní srovnatelnosti obou programů.

1. ÚVOD DO ŘEŠENÍ CFD

Výpočtové modelování tekutin¹ je součástí vědní disciplíny dynamiky tekutin zahrnující metody řešení změn kinematických veličin, chemických reakcí, přenosů tepla a energií a dalších parametrů proudících látek. Dnes je CFD využíváné ve velkém množství aplikací s tím, že se využívá hlavně možnost kontrolovat tok tekutin změnou geometrie či okrajových podmínek bez nutnosti provádět drahé experimenty. Díky čemuž lze ušetřit velké množství času a vynaložených nákladů na dosažení srovnatelných výsledků. Této výhody je dnes využíváno například v různých odvětvích motorsportu, kde počítačové simulace začínají převažovat nad finančně náročným testováním v aerodynamickém tunelu.



Obrázek 1-1 Zobrazení proudnic v turbodmychadle [1]

1.1 Řídící rovnice

Řídící rovnice jsou základem CFD – popisují v podstatě veškeré vlastnosti proudících látek, ať už jde o rychlost, tlak či hmotnostní průtok. Jsou dnes podstatou všech systémů pracujících s modelováním tekutin. Vycházejí ze tří základních fyzikálních principů – zákona zachování hmoty, zákona zachování hybnosti a zákona zachování energie. Lze je popsat formou integrální a diferenciální. Pro výpočty se používá především diferenciální forma. Hlavně kvůli odolnosti rovnice vůči velkým skokům, při kterých je stabilnější a má menší sklony k divergenci. Proto jsou v ní také uvedeny veškeré níže uvedené rovnice [2].

1.1.1 Rovnice kontinuity

Jde o rovnici popisující zákon zachování hmoty v proudící tekutině. Obecně řečeno jde o matematickou formulaci dodržení podmínky, že celková změna hmoty v kontrolním objemu je rovna hmotě procházející přes stěnu kontrolního objemu [2].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (1.1)$$

¹ Anglicky Computational Fluid Dynamics – odtud zkratka CFD

1.1.2 Rovnice přenosu hybnosti

Navier – Stokesova rovnice je vztahem popisujícím zachování hybnosti v kontrolním objemu a její základ je v druhém Newtonově zákoně. Lze ji psát ve dvou tvarech – s nebo bez zahrnutí vnitřního tření tekutiny. Zde uvedená rovnice (1.2) vnitřní tření tekutiny zahrnuje a je určena pro pohyb ve směru x – pro další souřadnicové systémy lze analogicky odvodit pouze změnou indexů [3].

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \quad (1.2)$$

1.1.3 Rovnice přenosu energie

Tento vztah popisuje změnu energie obsaženou v kontrolním objemu. Na jedné straně je zde celková změna energie a na druhé tepelný tok stěnou kontrolního objemu sečtený s prací vykonanou na kontrolním objemu [2].

$$\frac{\partial(\rho i)}{\partial t} + \text{div}(\rho i \mathbf{v}) = -p \cdot \text{div}(\mathbf{v}) + \text{div}(k_a \cdot \text{grad}(T)) + \phi_a + S_i \quad (1.3)$$

1.2 **Metody řešení**

Výše uvedenými rovnicemi lze předpovědět chování tekutiny v jakémkoliv prostředí a za jakýchkoliv podmínek. Problémem ovšem je, že tyto rovnice jsou hlavně díky substanciálním a parciálním derivacím analyticky neřešitelné. Proto se přistupuje k numerickému zpracování rovnic některou z metod k tomu vhodných [3].

1.2.1 Metoda konečných diferencí

Tato metoda je známá již od 20. let 20. století a v zásadě umožnila řešit některé jednodušší problémy v době před rozvojem výpočetní techniky. Podstata metody spočívá v diskretizaci problému na síť s uzlovými body označené x, y, z podle směru os a i, j, k podle pořadí uzlů ve směru os. Metoda se dále dělí na explicitní a implicitní. Rozdíl mezi nimi je hlavně v náročnosti výpočtu (explicitní metoda je méně náročná) a schopnosti konvergovat (implicitní metoda konverguje lépe). Problémem zde je, že úloha musí být rozdělena na konformní síť² se stejnou velikostí, což je problém u složitějších geometrií [4].

1.2.2 Metoda konečných prvků

Numerická technika používaná hlavně v mechanice tuhých těles, kde je její postavení stále již od 50. let. Pracuje s převedením parciálních diferenciálních rovnic na obyčejné diferenciální rovnice, které jsou pak použité pro samotný výpočet. Ten probíhá iteracemi hodnot v hraničních bodech každého elementu, jejich uložení do matic a poté sečtením hodnot odpovídajícím jednotlivým uzlovým bodům. Metoda je náročná na výkon a analýzu problému, proto je pro CFD ve většině případů nevhodná. Používá se pouze u zjišťování ovlivnění povrchů při viskózním proudění [4].

² Síť s na sebe navazujícími elementy

1.2.3 Metoda konečných objemů

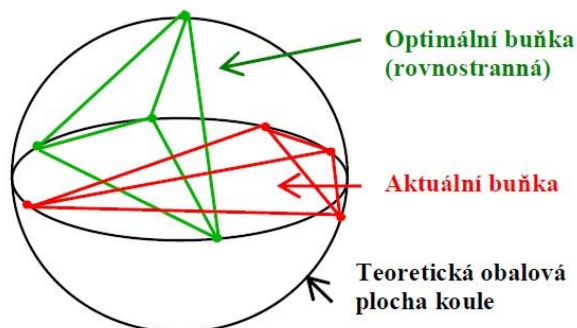
Dnes nejvíce využívaná možnost řešení rovnic v dynamice tekutin. Výhoda této metody spočívá v tom, že se přenos látky vypočítává z průchodu stěnou daného konečného objemu. Díky tomu lze snížit počet bodů, ve kterých dochází k řešení problému – místo v uzlových bodech se řeší hodnoty ve středech kontrolních objemů [4].

1.3 Diskretizace

Vzhledem k tomu, že metodou konečných objemů nelze řešit rozsáhlé geometrie, je potřeba přistoupit k jejímu rozdělení na malé části, tvořící výpočtovou síť, na níž bude výpočet probíhat. Je součástí takzvaného pre-processingu, neboli přípravě vstupních podmínek do výpočtu³. Dobré rozdělení geometrie je důležité hlavně kvůli zrychlení a zpřesnění řešení. Kvalitní síť dokáže výpočet významně urychlit díky tomu, že snižuje výpočetní náročnost problému. To dokáže ušetřit čas při složitých problémech, kde probíhá například přenos tepla, velké ztráty energií, nebo se zjišťuje chování tekutiny v mezní vrstvě.

1.3.1 Kritéria kvality sítě

Pro určení kvality vytvořené sítě rozeznáváme několik kritérií, z nichž nejvýznamnější jsou „velikost buněk, s ohledem na modelovaný děj a požadavek na přesnost výpočtu, vhodnosti uspořádání buněk v prostoru (zhuštění v místech zajímavých z hlediska proudění) a kvalita buněk [5]. Ta je nejčastěji posuzována podle takzvaného zkosení buněk, anglicky Skewness ratio, která se určí podílem optimálního objemu buňky (V_{opt}) s jejím reálným objemem (V_{real}) [6].



Obrázek 1-2 Znáornění nesouměrnosti 3D prvku [6]

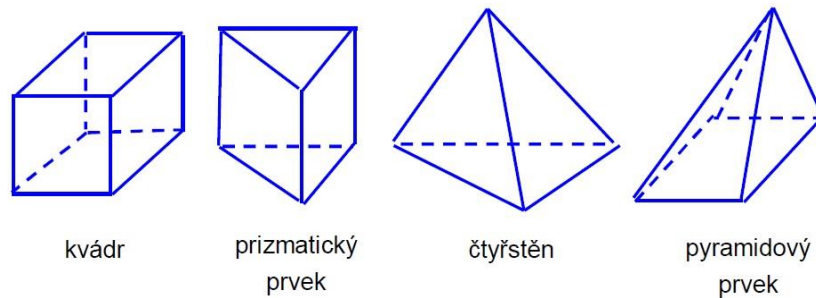
$$Skewness\ measure\ (TET) = \frac{V_{opt} - V_{real}}{V_{opt}} \quad (1.4)$$

Nesouměrnost se poté hodnotí na škále od 0 (nejlepší) do 1 (nejhorší), přičemž většina buněk by neměla dosáhnout hodnoty více než 0,9 – dochází poté k problémům s konvergencí [6].

³ Například vytvoření geometrie či zadání okrajových podmínek

1.3.2 Typy buněk

Typ buněk použitý na vytvoření sítě je pravděpodobně nejdůležitější faktor ovlivňující její kvalitu. Na počátku výpočetních metod byl nepoužívanější útvar kvádr doplněný o prizmatický prvek. Později se začaly používat pyramidové prvky, hlavně čtyřstěny, které dokáží lépe vyplnit složitá místa geometrie [6].

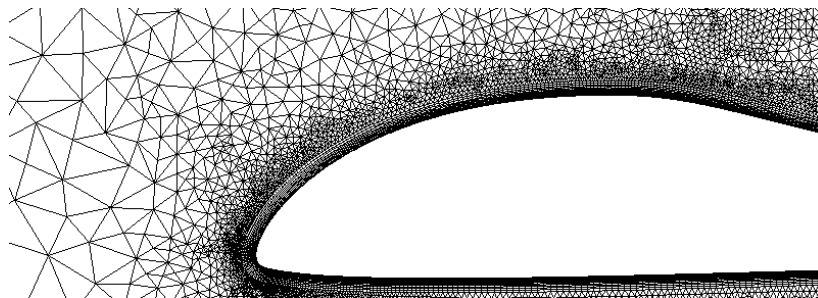


Obrázek 1-3 3D útvary používané v Metodě konečných objemů [6]

Ne každý program ovšem dokáže vytvářet takzvanou hybridní⁴ síť (jako například u Salome je problém s jejím exportem). Proto je občas potřeba se rozhodnout jaké útvary použít. Při využití nesprávných prvků totiž může dojít k jejich zborcení ve složitějších místech (například v zakřiveních s malým poloměrem) a tím pádem ke zhoršení výpočtových podmínek.

1.3.3 Optimalizace sítě

Díky velkému množství možností, jak diskretizaci provést, je potřeba dodržovat určitá pravidla, která zajistí, že vytvořená síť bude co nejvíce efektivní. Nejdůležitějším z nich je zhušťování sítě v místech, kde bude pravděpodobně docházet ke změnám v proudění (vířiče, rozdělení tekutiny do více proudů, apod.) [5].



Obrázek 1-4 Zhuštění sítě u křídla letadla [7]

Zhuštění nebo řidnutí sítě se zajišťuje rozdělením geometrie na menší části a definicí počtu vytvořených buněk v každé z nich. To se dá provádět několika způsoby, například rozdělením hran mezi částmi na menší díly nebo určením počtu buněk, které se v každé části objemu vytvoří.

⁴ Síť s různými 3D elementy [5]

2 PŘEHLED SOFTWARE PRO VYTVÁŘENÍ SÍTĚ

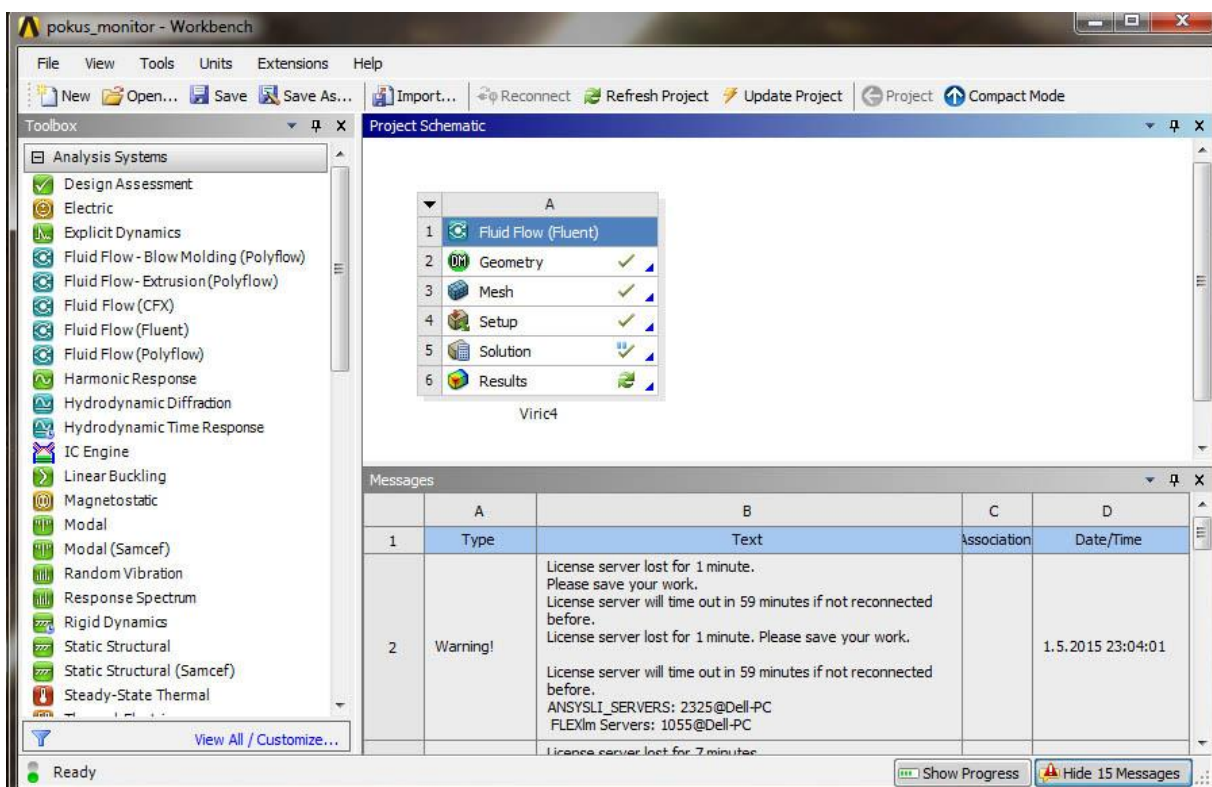
Nyní bude následovat krátké představení několika softwarů určených pro výpočtové modelování.

2.1 Ansys Workbench

Ansys Mesh je velmi používaný komerční software, jenž je součástí Ansysu Workbench. Stal se nástupcem Gambitu, který byl společností Ansys zakoupen a již se nevyskytuje jako samostatný program, ale jeho funkce jsou postupně implementovány do Ansysu Mesh. Ten je společný pro všechny části výpočtového modelování, kde se síť využívá.

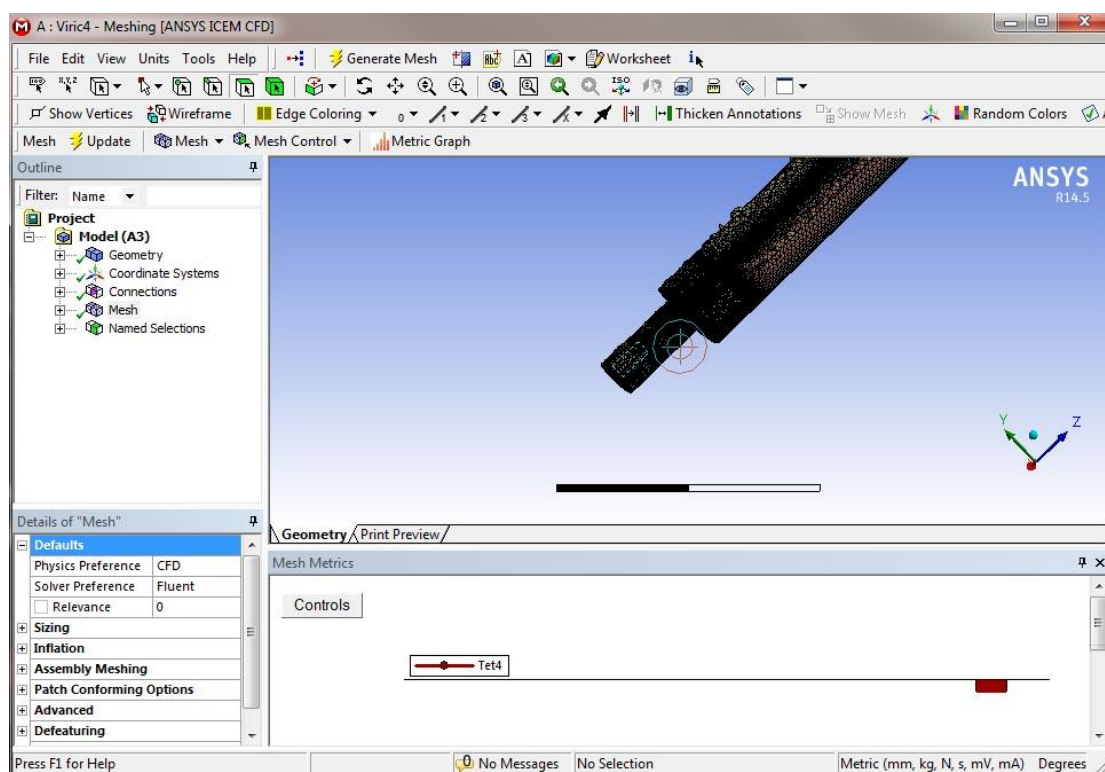
2.1.1 Uživatelské prostředí

Práce v Ansysu začíná v základním okně programu Workbench. To je rozděleno do tří základních částí. Nahoře se nachází panel nástrojů s tlačítky pro vytvoření, otevření, uložení či import. Dále také pro aktualizaci („Refresh project“) a úplné přepočítání projektu („Update project“) a tlačítko pro přepnutí okna do kompaktního modu. V levé části se nachází výběr pracovních systémů a modulů. Největší část okna zabírá přehled otevřených projektů, ve kterém jsou vidět již rozpracované projekty s podrobnostmi o jednotlivých modulech. Zároveň se zde nachází indikace, kde je již práce hotová a jaký z modulů je rozpracován nebo potřebuje aktualizaci.



Obrázek 2-1 Základní prostředí programu Ansys Workbench 14.5

Vstup do Mesh modulu se provede dvojklikem na stejnojmenný řádek v tabulce projektu. Po načtení dojde k otevření okna samotného mesheru. Zde je opět nahoře panel nástrojů, ve kterém lze přepínat mezi různými nástroji pro pohyb v modelu (Lupa, posun). Dále jsou v něm umístěny ikony pro zachytávání hran/ploch/objemů či pro řez modelem.



Obrázek 2-2 Uživatelské prostředí Ansysu Mesh

V levé části se nachází strom, kde je přístup k hlavním částem modelu a ke všem operacím, které byly při vytváření sítě prováděny (definice rozdělení hran, určení tvarů buněk, etc.). Pod stromem je umístěn panel, v němž se objevují nastavení různých operací podle toho, jaká část modelu nebo operace je vybrána. Například při definici délky hran se zde nastavuje na kolik částí se má hrana rozdělit, případně jakou mají mít délku. Ve spodní části obrazovky je další panel, v němž se objevují grafy nebo chybové hlášky při vytváření sítě. Tento panel lze zavřít, pokud není k práci potřeba.

2.1.2 Tvorba geometrie

V balíku Workbench je zahrnut také Design Modeler, ve kterém lze geometrii vytvářet, případně je možné ji importovat a dále upravovat. Modul umožňuje import většiny formátů využívaných pro přenos 3D modelů. Nejdůležitější je podpora formátů .iges a .step, modul dále umí nahrát i geometrie vytvořené v Catii, Solidworksu (.sldprt, .sldasm) nebo Inventoru (.ipt, .ipm).

2.1.3 Tvorba sítě a typ buněk

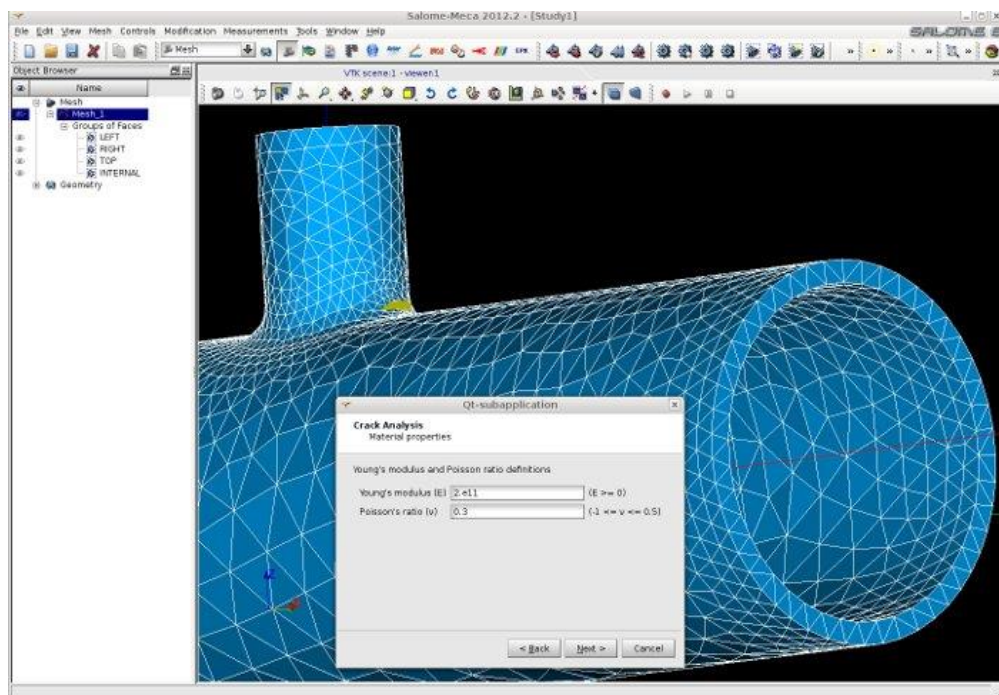
Nastavení modulu Ansys Mesh umožňuje použití jak sítě vytvořené pouze z jednoho druhu buněk (čtyřstěny, prizmatické prvky, šestistěny), tak i jejich kombinaci, případně tvorbu nestrukturované sítě. K tomu je zde určeno několik módů (CutCell, Sweep, MultiZone), z nichž většina vytváří ve volném objemu šestistěny. U stěn nebo složitějších tvarů přechází k prizmatickým nebo pyramidovým prvkům [8].

2.2 Salome

Salome je francouzský open-source program vytvořený pro pre-processing a post-processing numerických simulací. Protože je určen k volnému šíření, bývá využíván k tvorbě komplexních programů. Například Salome-Meca, ve kterém byl do něj implementován modul Code_Aster určený k řešení pevnostních výpočtů [9].

2.2.1 Uživatelské prostředí

Program je možné využívat ve dvou variantách, buď s grafickým rozhraním, nebo přes konzoli terminálu. V případě spuštění grafického rozhraní je potřeba nejprve zapnout server, na kterém prostředí poběží a poté zapnout samotný program (toto u verze Salome-Meca neplatí, u té stačí zapnout program ikonou a vše se spustí samo). Na první pohled vypadá Salome velmi podobně jako prostředí Ansys Workbench. Tak jako v Ansys Workbench je nahoře panel nástrojů s rozmístěnými ikonami různých operací s modelem nebo sítí (podle modulu) a na levé straně je umístěn strom s částmi geometrie, vytvořenou sítí a podsítěmi. Mezi moduly se přepíná vysouvacím seznamem, který se nachází uprostřed panelu nástrojů.



Obrázek 2-3 Prostředí programu Salome 6 [11]

2.2.2 Tvorba geometrie

Vytvoření a úpravu geometrie lze provést v modulu „Geometrie“. Salome podporuje také import již vytvořené geometrie. Výběr podporovaných formátů je ovšem značně omezen. Importovat je možné pouze modely uložené v .iges, .step a .brep. Vložení z jiných souborů, například .ipt formátu vytvářeného Autodesk Inventorem, možné není [12].

2.2.3 Tvorba sítě a typ buněk

Do modulu určeného k vytváření sítě se dá dostat přepnutím na modul „Mesh“. Mechanismus síťování je odlišný od Ansysu, ale není nijak složitý. Nejprve se vytvoří globální síť na celé geometrii, ve které je možné definovat její základní parametry od 3D do 0D

požadavků na tvar nebo velikost buněk. Dále je potřeba vytvořit v geometrii skupiny tvarů, které mají být síťovány stejným způsobem – například objemy, v nichž je zapotřebí vytvořit jemnější síť. Těm se poté nadefinuje takzvaná podsíť s požadovanými parametry. Mesher při výpočtu podsítí v podstatě ignoruje nastavení globální sítě, proto tam, kde byly zaneseny, se síť vypočte se zadanými parametry a ve zbytku geometrie se vytvoří podle globálního zadání.

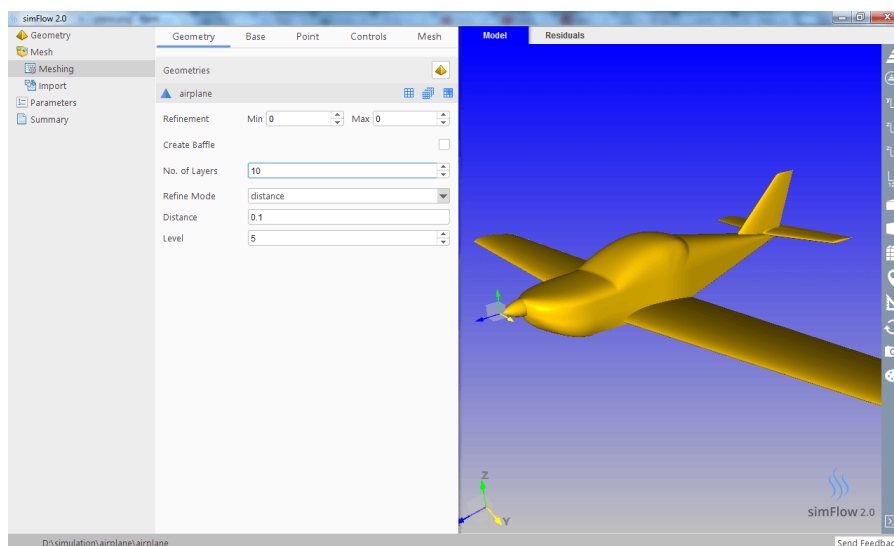
Salome podporuje velké množství tvarů buněk – od čtyřstěnů, přes šestistěny až po polyedrické útvary. Problém ovšem je, že díky problémům s exportem hybridní sítě je lepší dělat síť z jednoho druhu elementů. Proto je volba tvaru buněk velmi závislá na tvaru geometrie a odhadu výpočtáře tak, aby nedocházelo ke zbytečnému zhoršení útvarů a snížení kvality sítě [11].

2.3 OpenFOAM

OpenFOAM je open-source výpočetní program obsahující nástroje jak pro přípravu, tak i pro výpočet a post-processing numerických úloh. Jedná se přibližně o 80 výpočetních a 170 pomocných programů, které jsou vytvořeny pro řešení rozličných problémů proudění [12]. V poslední době u něj došlo k velkému rozmachu, jelikož ho začaly využívat některé velké firmy místo komerčního Ansysu [13].

2.3.1 Uživatelské prostředí

OpenFOAM jako takový nemá grafické prostředí – je ovládán příkazy přes terminál. Lze však na něj nainstalovat nadstavby, jež využijí knihovny základního programu a umožní ho ovládat přes grafické rozhraní. Většina ale dokáže spustit pouze některé moduly. Jednou z nadstaveb je například Helix-OS. Přes něj lze požívat mesher snappyHexMesh a několik typů řešičů [14]. Dalším z mnoha GUI⁵ programů je simFlow. Ten využívá stejný mesher jako Helix-OS a u solverů je zaměřen hlavně na přenos tepla, děje ve spalovacích motorech a na turbulentní proudění [15].



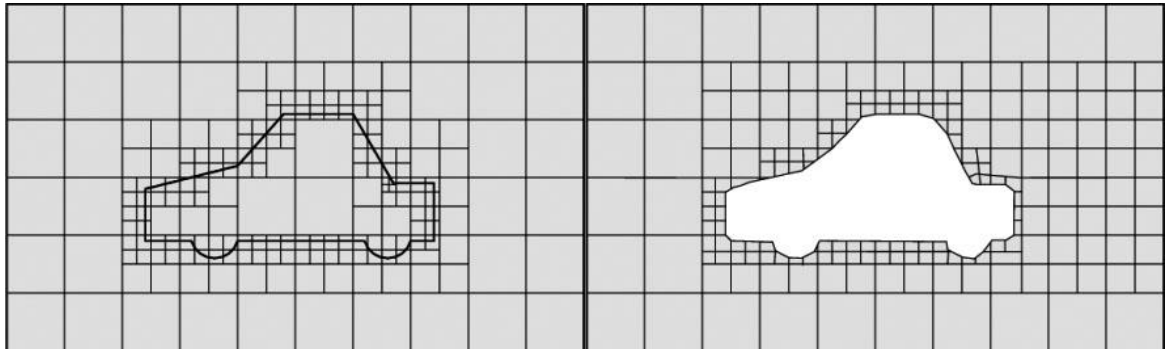
Obrázek 2-4 Grafický nastavbový program simFlow [15]

⁵ GUI / Graphical User Interface – grafické rozhraní počítačového programu

2.3.2 Tvorba sítě a typ buněk - snappyHexMesh

OpenFOAM obsahuje několik modulů, v nichž je možné síť vytvářet - například blockMesh, polyMesh nebo snappyHexMesh. Liší se od sebe typem použité sítě, polyMesh vytváří buňky mnohostěnné, zatímco blockMesh a snappyHexMesh šestistěnné. Zde bude popsán snappyHexMesh, který je velmi používám i v programech založených na OpenFOAMu.

Import geometrie je možný pouze přes formát .stl [16]. Nejprve je vytvořena základní síť z šestistěnnů vyplňující celý objem síťované geometrie (toto lze provést i v blockMeshi). Síť je pak u stěn objektu zhuštěna a nadělena. Poté jsou vyjmuty části sítě, které jsou za stěnami a nebudou využity k výpočtu a zbylá síť je přizpůsobena hranicím geometrie.[16]



Obrázek 2-5 Zjemnění a přizpůsobení sítě v programu snappyHexMesh [16]

2.4 Gmsh

Gmsh je 3D generátor sítě s vestavěným CAD modelářem, mesherem a modulem pro post-processing. Řešič v programu obsažen není, je ale možné doinstalovat externí program (například GetDP) a Gmsh použít jako grafickou nadstavbu [17]. Je možné ho spustit na všech dnes používaných operačních systémech a může být využíván zdarma, pokud není předmět použití integrace do jiného komerčního softwaru.

2.4.1 Uživatelské rozhraní

Gmesh disponuje velmi zjednodušeným rozhraním grafickým rozhraním. Skládá se pouze z nabídky umístěné nahoře a postranního panelu, ve kterém jsou umístěny všechny nástroje jak pro práci s geometrií, sítí nebo řešičem (v případě, že je instalován).



Obrázek 2-6 Pracovní prostředí programu Gmsh

2.4.2 Tvorba geometrie a sítě, typy buněk

Vzhledem k vestavěnému modeláři je možné vytvářet geometrii přímo v programu. Import a následnou úpravu lze také využít, Gmsh podporuje formáty .step, .iges, .brep a jeho vlastní .geo. Problém je pouze u formátu .brep, kde Gmsh nemusí být schopen precizně zpracovat velké modely. V tomto případě je pak nutné použít externí modelář a z něj importovat přímo nativní geometrii [18].

Tvorba sítě probíhá velmi podobně jako v Salome. Nejprve se rozdělí hrany, poté se vytvoří plošné buňky a následně buňky prostorové. Software vytváří nestrukturovanou síť a konformní síť. To je zajištěno návazností jednotlivých prvků při tvorbě sítě – z trojúhelníků se automaticky stávají čtyřstěny, body jsou využity jako vrcholy některého z prvků, atd. Gmsh je schopen vytvořit i hybridní síť. Jako buňky mohou být použity čtyřstěny, šestistěny, prizmatické anebo pyramidové prvky [18].

2.5 Shrnutí

Zde jsou shrnuty do tabulky nejdůležitější vlastnosti představených softwarů:

Tabulka 2-1 Shrnutí vlastností softwarů

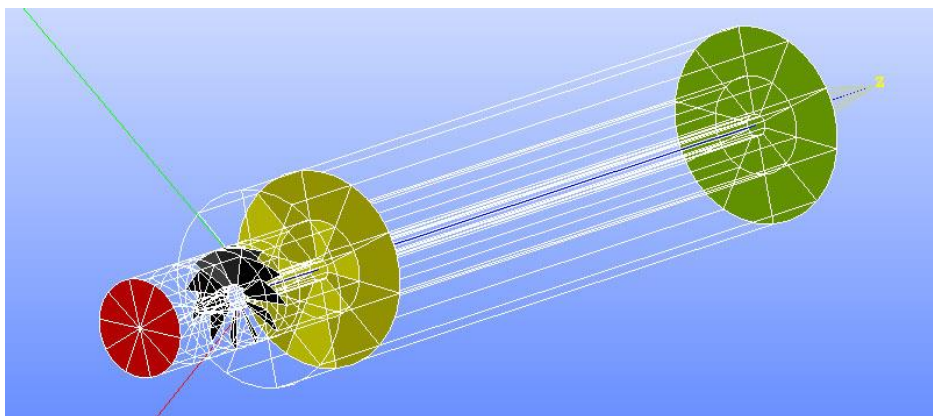
Název	Operační systém	Licence	Formáty pro import	Typy sítí	Typy buněk
Ansys Workbench	Windows, Linux	Placená	.step, .iges, formáty z ostatních modelářů (.ipt, .sldprt)	Jeden druh buněk, hybridní	čtyřstěny, prizmatické prvky, šestistěny, mnohostěny, pyramidové prvky
Salome	Linux	Volně ke stažení	.step, .iges, .bret	Jeden druh buněk, hybridní (problémy s exportem)	čtyřstěny, prizmatické prvky, šestistěny, mnohostěny, pyramidové prvky
OpenFOAM	Windows (neoficiální verze), Linux	Volně ke stažení	.stl	Jeden druh buněk	Podle modulu (snappyHexMesh - šestistěny, polyMesh - mnohostěny)
Gmesh	Windows, Linux, Mac OS X	Volně ke stažení	.step, .iges, .bret, .geo	Jeden druh buněk, hybridní	čtyřstěny, prizmatické prvky, šestistěny, mnohostěny, pyramidové prvky

3 POROVNÁNÍ NA REÁLNÉM PROBLÉMU

Nyní bude následovat srovnání dvou softwarů určených k tvorbě sítí, Salome 7.5.1 a Ansysu Workbench 14.5. Porovnání bude založeno na vytvoření dvou sítí o stejných parametrech na totožné geometrii a propočítáním každé z nich v programu Fluent. Poté dojde ke zhodnocení kvality každé sítě na základě porovnání základních parametrů) a výsledků z numerického výpočtu.

3.1 Geometrie

Jak již bylo řečeno, k srovnání byla využita jedna geometrie pro oba meshery. Jednalo se o model víříče, ve kterém dochází k rozvíření vzduchu, smíchání s palivem a následném zapálení tak, aby směs co nejlépe prohořela [19]. Pro účely simulace bylo hoření směsi zanedbáno. Výpočet byl uvažován jako izotermální nereaktivní proudění.



Obrázek 3-1 3D model simulovaného víříče (barevně vyznačené důležité plochy)

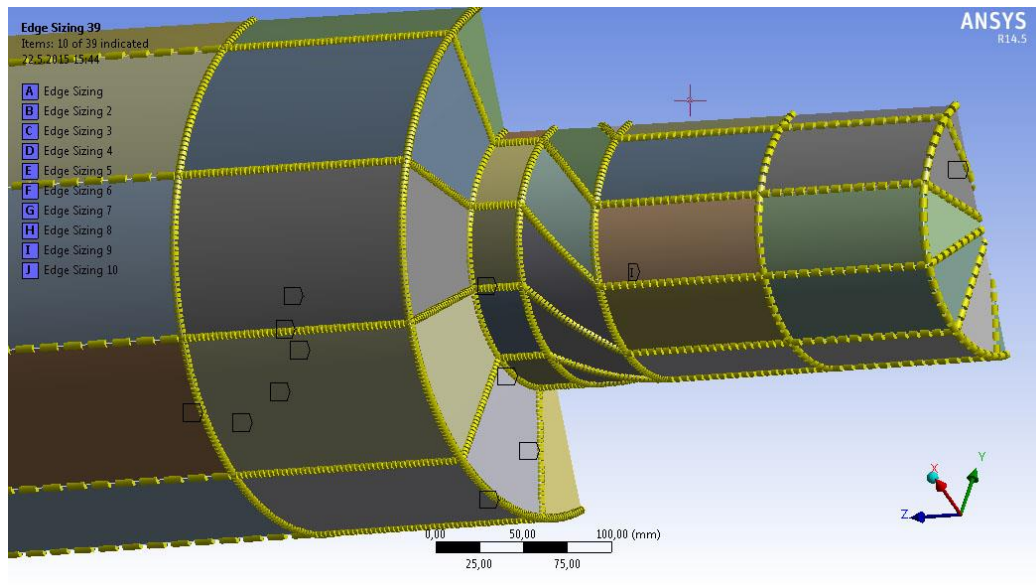
Ten vstupoval do víříče červeně zbarvenou plochou v užší části. Poté postupoval přes lopatky (zabarveny černě), kde došlo k jeho roztočení a následně toku do širší části. Tam, v místě přibližně 230 milimetrů od lopatek, procházel kontrolní plochu označenou žlutou barvou. Zde byly měřeny hodnoty tlaku, rychlosti, intenzita turbulence, její kinetická energie a disipace energie v turbulenci. Vzduch poté tek l dále až do výstupu, který je na obrázku zaznačen zeleně. Celková délka byla 1550 milimetrů, vstupní průměr měřil 150 milimetrů a výstupní průměr 300 milimetrů. Úhel lopatek činil 60 stupňů.

3.2 Parametry sítě

Sítě byly vytvořeny s totožnými parametry tak, aby byla zajištěna co největší podobnost. Protože Salome má problémy s exportem hybridní sítě, bylo rozhodnuto o použití pouze tetrahedrických⁶ buněk, které lépe pokryly zakřivení lopatek než buňky šestistěnné. Velikost elementů byla určena rozdělením hran na zadané velikosti, z nichž si poté samotné programy udělaly plošné a poté objemové sítě. Nejjemnější síť se tvořila u víříče a v místě, kde dochází ke změně průměru. Velikost jednoho 1D elementu zde byla určena na 2 milimetry jak pro příčné, tak pro podélné hrany. Od monitorovací plochy dále k výstupu byla síť nejhrubší – zvětšovala se v příčném směru od 3 milimetrů na svém začátku až po 12 milimetrů na výstupu z komína. Podélně byly hrany rozděleny na 16 milimetrů. V části od vstupu do víříče byla síť

⁶ Tetrahedr - čtyřstěn

také hrubší než v lopatkách samotných. Na vstupu bylo podélné i příčné dělení nastaveno na 8 milimetrů a směrem k vířiči se postupně zmenšovalo.



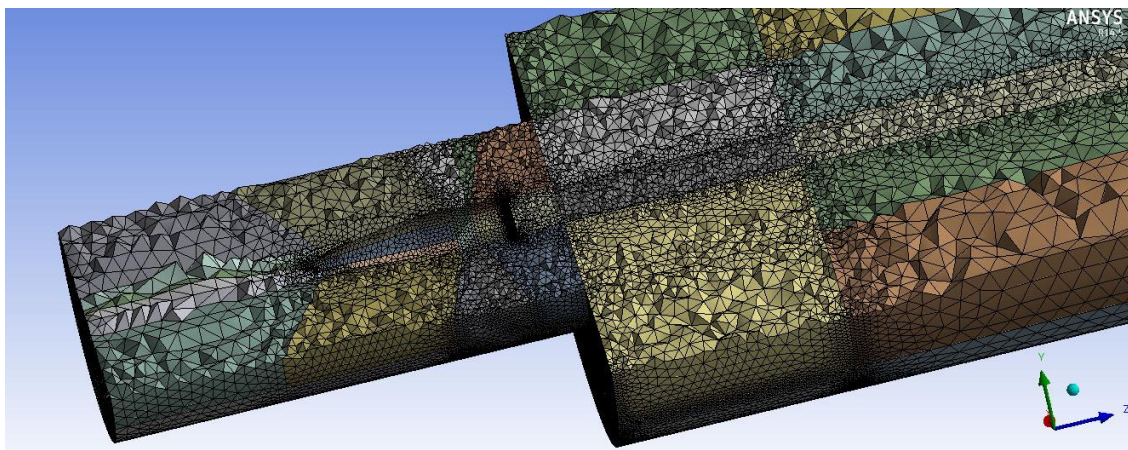
Obrázek 3-2 Vizualizace rozdělení hran

3.3 Vytvoření sítě v programu Ansys Workbench 14.5

Nejprve byla importována geometrie do Design Modeleru, který v Ansysu provádí úpravy modelů. Následně byla rozdělena v místě monitorovací plochy příkazem „Extrude“, v němž byl nastaven parametr „Slice“. Poté už byly pouze pojmenovány plochy pro vstup, výstup, zeď, monitorovací plochu a lopatky kvůli zadání okrajových podmínek ve Fluentu.

Dále byl zapnut modul pro vytváření sítě, kam se geometrie automaticky importovala. Postupně byly vybírány všechny hrany, na kterých se definovala stejná délka rozdělení a byla jim určena velikost elementů příkazem „Insert“ – „Sizing“ – „Element size“. Po nadělení hran bylo ještě třeba příkazem „Insert“ – „Method“ určit všem objemům, že se budou vytvářet metodou „Tetrahedrons“ a dát příkaz „Generate“.

Vygenerovaná síť obsahovala 1 704 423 elementů, jejichž průměrná nesouměrnost měla hodnotu 0,246, což je v normě. Po rozříznutí bylo vidět rozložení hustoty buněk, která přibližně odpovídala zadaným podmínkám.

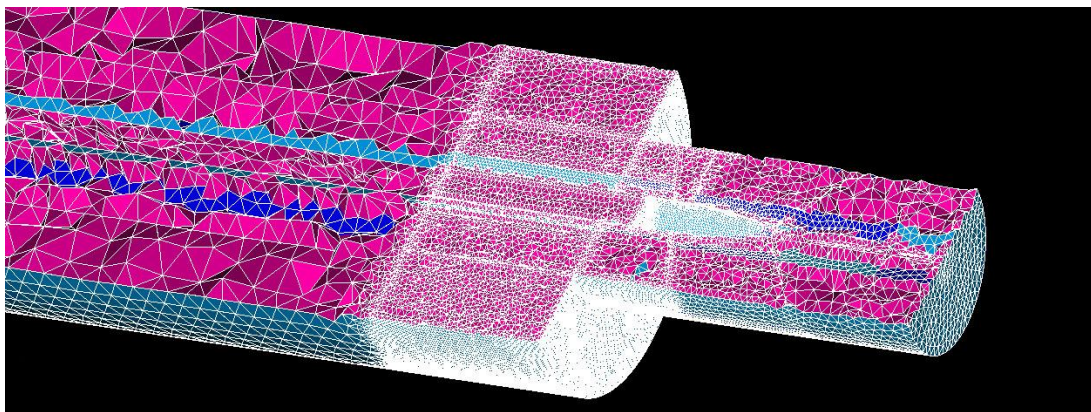


Obrázek 3-3 Řez sítě vytvořené v programu Ansys

3.4 Vytvoření sítě v Salome 7.5.1

Zpracování geometrie bylo v Salome o něco složitější než v Ansysu. Síť byla importována opět z .step souboru. Nyní bylo nutné ji opravit, protože program špatně rozeznal spojení mezi jednotlivými bloky. To bylo odstraněno příkazem „Glue“, který jednotlivé části spojil dohromady.

V ní byly vytvořeny postupně skupiny všech hran, jež měly mít stejnou délku při rozdělení na elementy. Po dokončení byl program přepnut do „Mesh“ modulu, kde se nejprve vytvořila globální síť pro celý model a určil se způsob síťování 3D (Čtyřstěny, hypotéza Nextgen) a 2D (Trojúhelníky, taktéž hypotéza Nextgen). 1D síťování bylo globálně nastaveno také, ač na něm nezáleželo, protože lokální sítě měly při síťování větší prioritu. Po nastavení globálních parametrů byly na každé skupině hran definovány lokální požadavky, které byly stejné jako u sítě v Ansysu.



Obrázek 3-4 Řez sítě vytvořenou v Salome

Generování sítě trvalo o něco déle než v prvním programu, na vině ovšem mohl být i fakt, že Salome běželo ve virtuálním počítači. Vytvořená síť měla 1 780 945 elementů a průměrná nesouměrnost byla 0,28. Nakonec byla síť vyexportovaná do formátu podporovaného Fluentem přes program OpenFOAM.

3.5 Výpočet sítě

Po vytvoření byly obě sítě importovány do výpočtového programu Fluent. Tam byly nastaveny vstupní a výstupní parametry proudění a okrajové podmínky týkající se zdí a lopatek.

Následovalo nastavení zaznamenávání hodnot na monitorovací ploše. Nastaveno bylo ukládání hodnot absolutní rychlosti, statického tlaku, intenzity turbulence, kinetické energie turbulence a disipační energie turbulence. Hodnoty byly ukládány každý časový krok. Poté již byl výpočet zapnut. Nejprve byly síť propočítávány po 50 iteracích jako ustálené proudění. To bylo z důvodu prvního odhadu proudového pole. Pokud by toto nebylo provedeno, mohlo by při výpočtu nestacionárního proudění dojít k divergenci.

Při přepnutí na výpočet neustáleného proudění, bylo počítáno nejprve s rovnicemi nižších řádů („First order upwind“), opět kvůli lepšímu odhadu proudění. Zároveň byl zjišťován ideální časový krok pro výpočet. U sítě vytvořené v Ansysu Workbench byl tento krok $\Delta t = 0,0003$ s, síť ze Salome konvergovala při $\Delta t = 0,0002$ s. Po dosažení těchto kroků byl výpočet přepnut na metodu „Second order upwind“ a spuštěn na tolik časových kroků, aby pokryl celý průchod

vzduchu vířičem, který byl vypočten jako poměr objemu vířiče (V) a průtoku (\dot{Q}) (3.1). U první síti vyšel celkový počet kroků na přibližně 1921, u druhé síti na 2881 časových kroků.

$$\tau = \frac{V}{\dot{Q}} \quad (3.1)$$

Tabulka 3-1 Parametry vypočtených sítí

Síť	Počet buněk	Šikmost buněk	Časový krok	Počet časových kroků	Doba zdržení tekutiny v objemu
Ansys	1 704 423	0,25	0,0003	1 921	0,581 s
Salome	1 780 945	0,28	0,0002	2 821	0,581 s

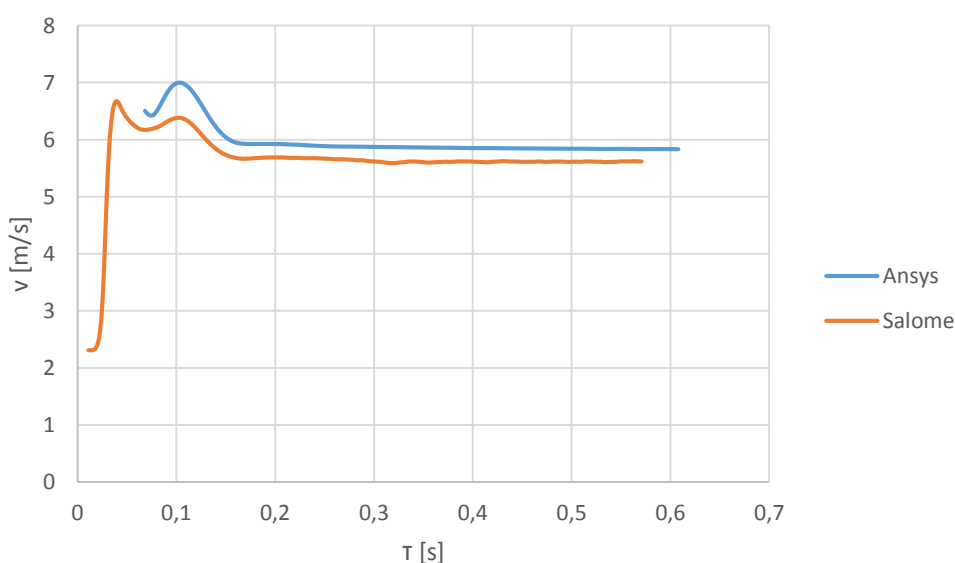
3.6 Porovnání dat z monitorovací plochy

Jak již bylo řečeno výše, v každé ze sítí byla vytvořena monitorovací plocha přibližně 220 milimetrů za vířícími lopatkami. Zde bylo měřeno celkem 5 veličin každý časový krok tak, aby bylo možné porovnávat konvergenci každé z veličin na obou sítích. Hodnoty byly ukládány do textového souboru, ze kterého byly následně zpracovány do grafů. Všechny veličiny byly počítány jako vážený průměr na monitorovací ploše. Hodnota váženého průměru se určila ze vztahu (3.2) [20], kde A je obsah plochy a Φ je obecná veličina.

$$\frac{1}{A} \cdot \int \Phi dA = \frac{1}{A} \cdot \sum_{i=1}^n \Phi_i |A_i| \quad (3.2)$$

3.6.1 Absolutní rychlost

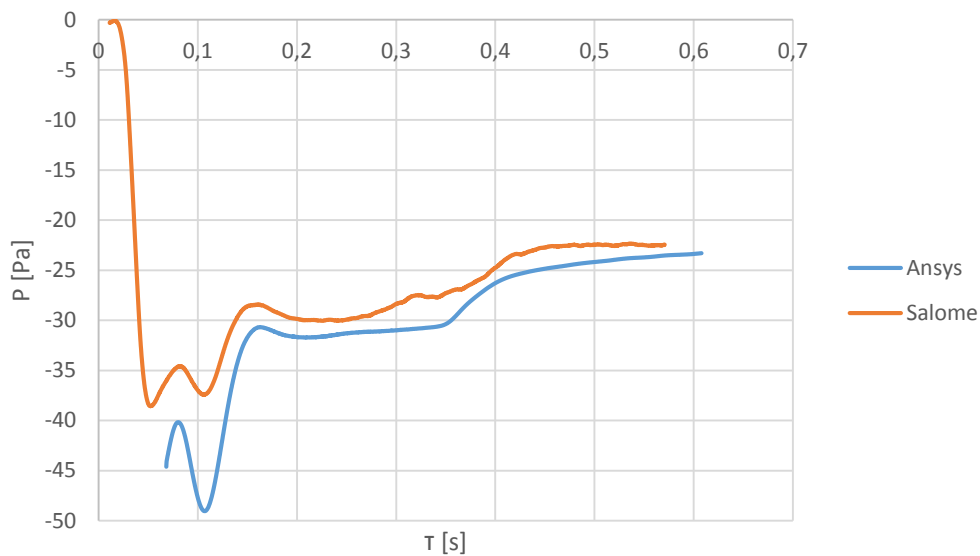
První z měřených veličin byla absolutní rychlost proudění. Z průběhů můžeme říci, že se oba výpočty ustálily přibližně v čase $t = 0,15$ s a poté klesaly velmi pomalu. Rozdíl obou rychlostí se poté držel okolo 0,2 m/s.



Obrázek 3-5 Průběhy absolutní rychlosti

3.6.2 Statický tlak

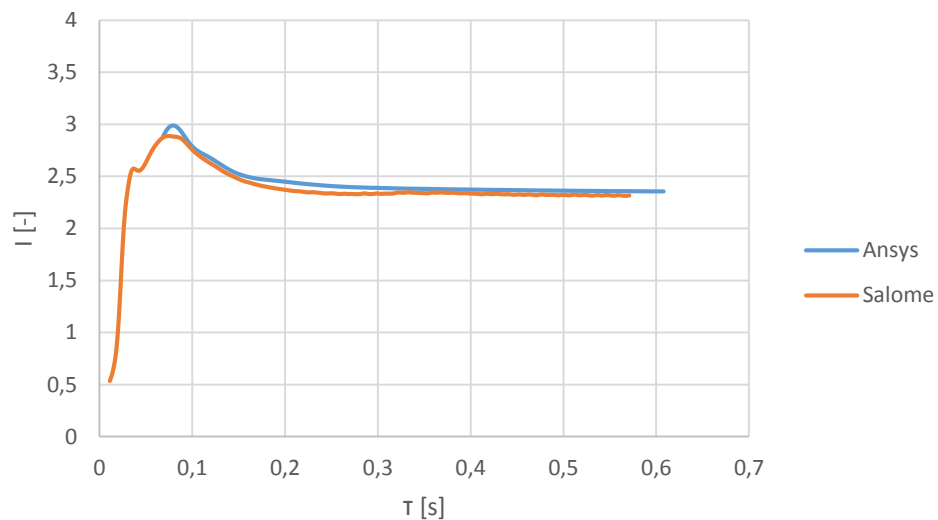
Další porovnávanou veličinou byly hodnoty statického tlaku. Zde byla konvergence jasná pouze u sítě vytvořené v Salome. Průběh statického tlaku se ustálil v čase $t = 0,43$ a s přibývajícím časem se držela zhruba na stejné hodnotě. Průběh u sítě z Ansysu Workbench byl o něco více kolísavý, hlavně při prvních dvou desetínách sekundy. Poté se relativně ustálil, ale i tak rostl do konce výpočtu. Proto nelze prohlásit, že by výpočet zkonvergoval. To by se dalo ověřit pouze při delším výpočtu.



Obrázek 3-6 Průběhy statického tlaku

3.6.3 Intenzita turbulence

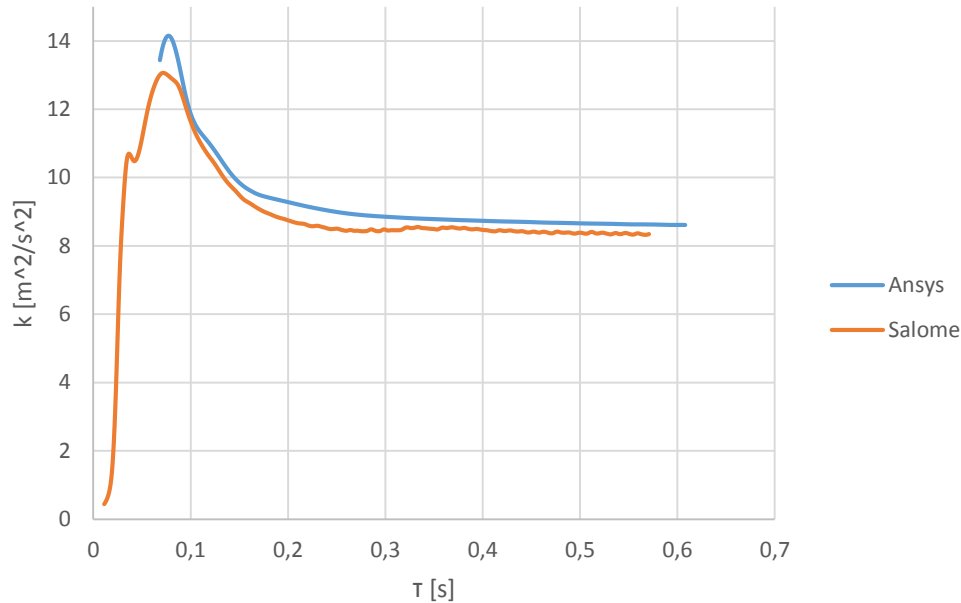
Třetí porovnávanou hodnotou byla intenzita turbulence na monitorovací ploše. Zde jsou průběhy téměř identické (až na počáteční oblast). Oba výpočty se ustálily přibližně v čase $t = 0,25$ s. Poté se držely na hodnotě intenzity turbulence $I = 2,3$ a rozdíl mezi nimi byl minimální.



Obrázek 3-7 Průběh intenzity turbulence

3.6.4 Kinetická energie turbulence

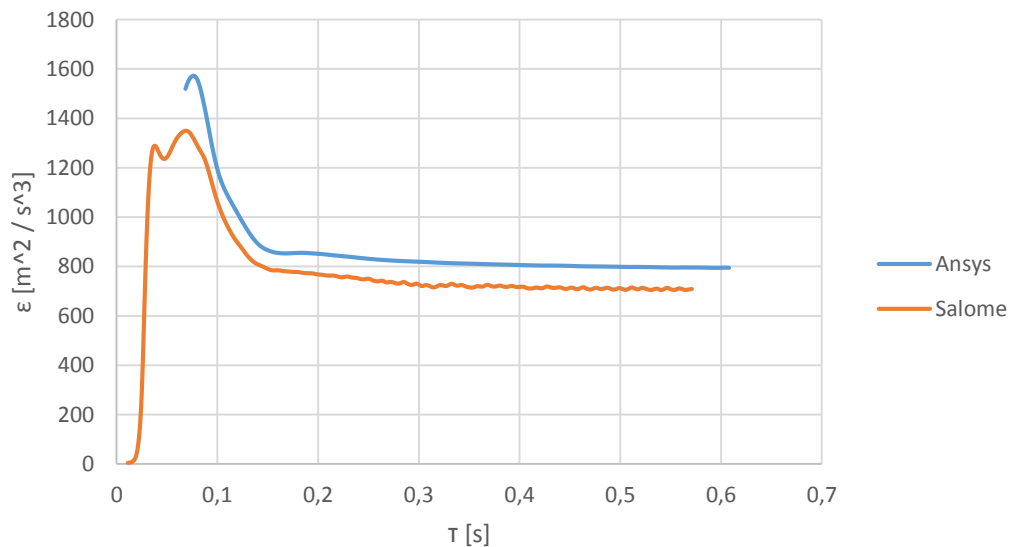
Dalším sledovaným parametrem byla kinetická energie turbulence. Průběh této veličiny je podobný jako v předchozím případě. Oba výpočty dosáhly ustálených hodnot kolem času $t = 0,3$ s. Poté se srovnaly na hodnotě přibližně $k = 8,5 \text{ m}^2/\text{s}^2$ s minimálním rozdílem.



Obrázek 3-8 Průběh kinetické energie turbulence

3.6.5 Disipace energie turbulence

Poslední z porovnávaných hodnoty byla disipace energie turbulence. U ní byl opět průběh kolísavý až do času $t = 0,3$ s. Poté se oba výpočty ustálily na v podstatě konstantních hodnotách. Zde byl ovšem větší rozdíl mezi jednotlivými sítěmi. Ten činil přibližně $86 \text{ m}^2/\text{s}^3$.

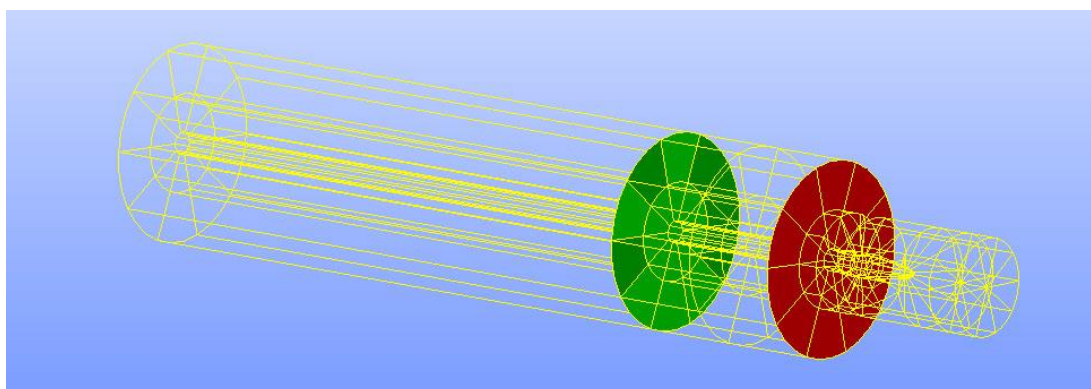


Obrázek 3-9 Průběh disipace energie turbulence

3.7 Porovnání výsledků výpočtu

Nyní bude následovat porovnání průběhů veličin v příčném průřezu výstupního komína. Veličiny byly měřeny na dvou místech. Ty byly voleny ve vzdálenosti x od vstupu do komína podle poměru vzdálenosti a průměru komína podle vztahu (3.3). Za průměr byl dosazen velký průměr komína, aby bylo zachyceno proudění za vířičem. Konstanta C se v prvním případě rovnala 1, ve druhém případě byla položena rovno 2. Vzdálenosti od vstupu do komína a od výstupu z vířiče jsou v tabulce a označeny na obrázku 3-10.

$$C = \frac{x}{D} \quad (3.3)$$



Obrázek 3-10 Průřezy pro porovnání výpočtů ($x/D = 1$ – červený, $x/D = 2$ - zeleně)

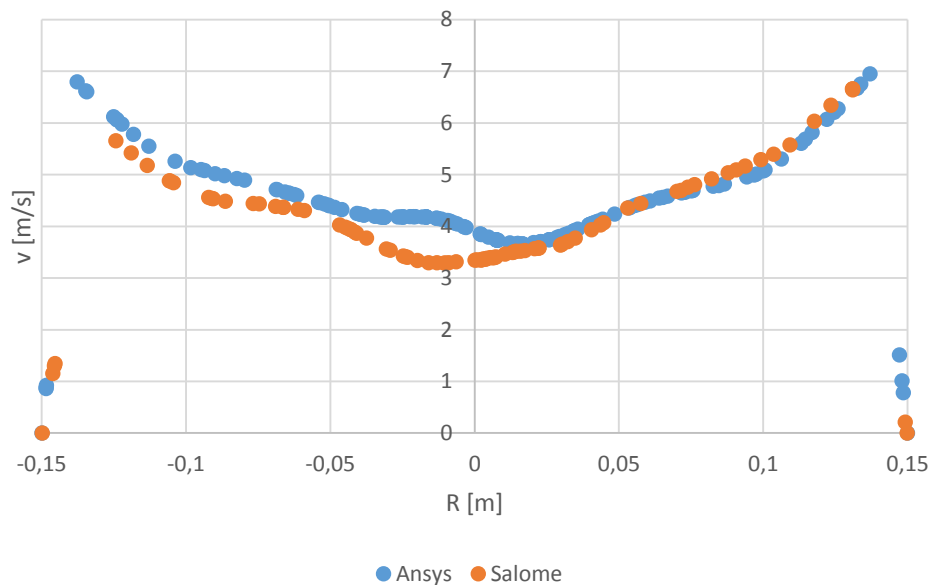
Tabulka 3-2 Parametry míst měření

Místo měření	Konstanta C	Vzdálenost od vstupu (x)	Vzdálenost od vířiče
1	1	300 mm	33 mm
2	2	600 mm	333 mm

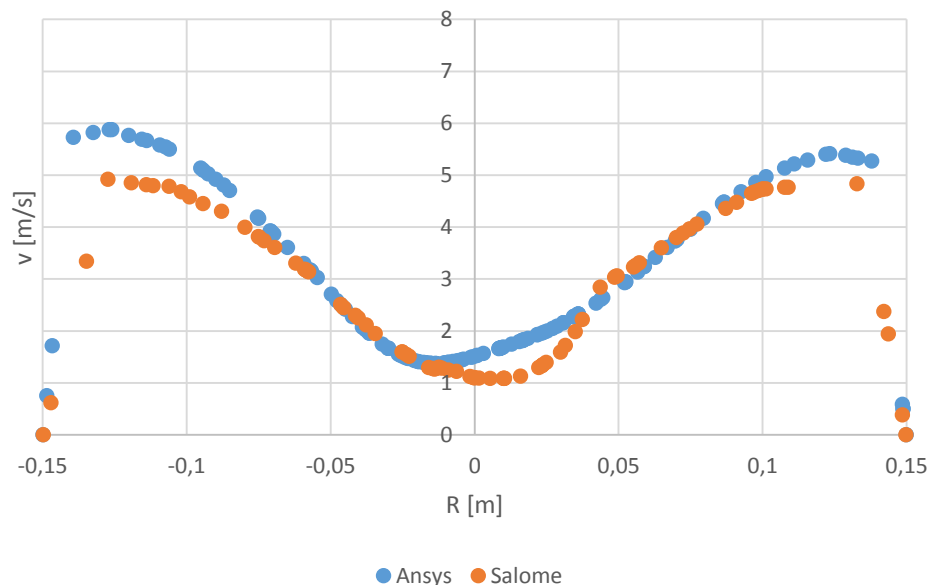
3.7.1 Rychlostní profil

První z porovnávaných veličin je velikost rychlosti v závislosti na vzdálenosti od středu komína. Maxima rychlosti se v obou místech nachází u stěn výtokového komína. Postupně ke středu se zmenšují, což lze vysvětlit počátkem tvorby jádra vírových struktur ve středu komína. Rozdíl mezi místy je ve velikosti maxima a strmostí klesání rychlosti. Zatímco ve vzdálenosti 33 mm od vířiče je maximum přibližně $v = 7$ m/s, v druhém místě je nižší. Hlavně díky ztrátám energie proudění zde je maximální rychlost okolo $v = 6$ m/s. Strmější klesání rychlosti ve vzdálenosti 333 mm je způsobeno existencí jádra vírových struktur. V tomto jádru dochází ke koncentraci vírů a stagnaci proudu.

Při porovnání výsledků obou sítí lze vidět, že se průběhy příliš neliší. Větší rozdíly jsou vidět pouze v minimech obou míst a maximum v místě 2, kde se rychlosti liší přibližně o 1 m/s, což už není zanedbatelný rozdíl. Zbytek průběhů v podstatě splývá a větší rozdíly zde nejsou.



Obrázek 3-11 Rychlostní pole, $x/D = 1$

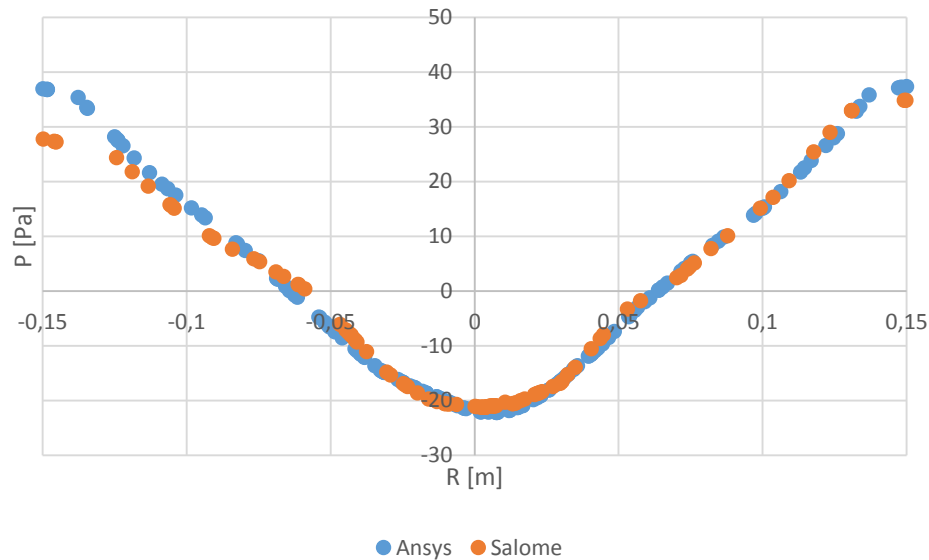


Obrázek 3-12 Rychlostní pole, $x/D = 2$

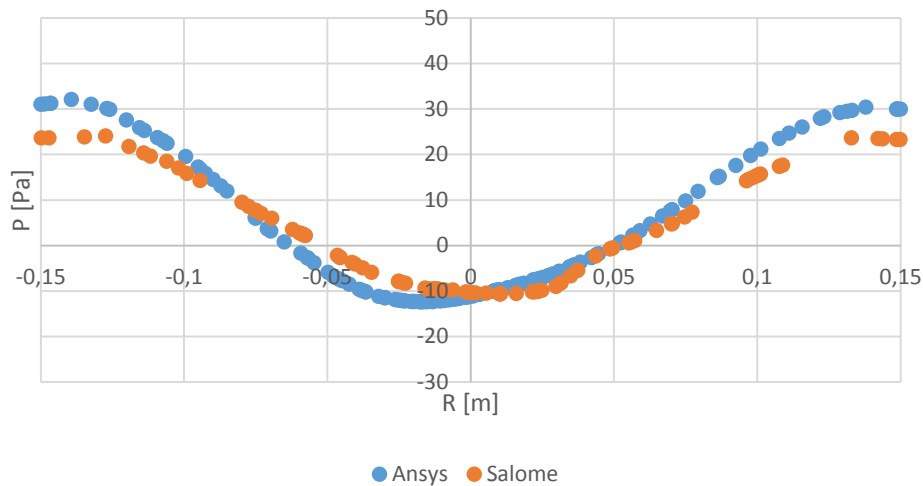
3.7.2 Rozložení celkového tlaku

Další porovnávanou veličinou je průběh celkového tlaku v závislosti na vzdálenosti od středu komína. Zde je opět vidět, že maximum tlaku se nachází u stěn, kde se nachází více vzduchu. Uprostřed průměru komína tlak klesá až do minusových hodnot – vzniká zde podtlak, dochází zde k vtahování proudu vzduchu z vnějších krajů komína a následnému zavíření. Maxima a minima tlaků se na vzdálenosti 33 mm od víříče zmenšují přibližně o 10 Pa. To lze vysvětlit ztrátou energie při postupu proudu komínem.

Rozložení v jednotlivých místech lze vidět na obrázcích 3-13 a 3-14. Ve vzdálenosti 33 mm průběhy splývají, rozdíl je pouze v maximu tlaků, které se liší přibližně o 9 Pa. Ve vzdálenosti 333 mm průběhy sice nespývají, ale není u nich výrazná odlišnost. Maximální odchylky se zde pohybují v jednotkách pascalů.



Obrázek 3-13 Rozložení celkového tlaku, $x/D = 1$



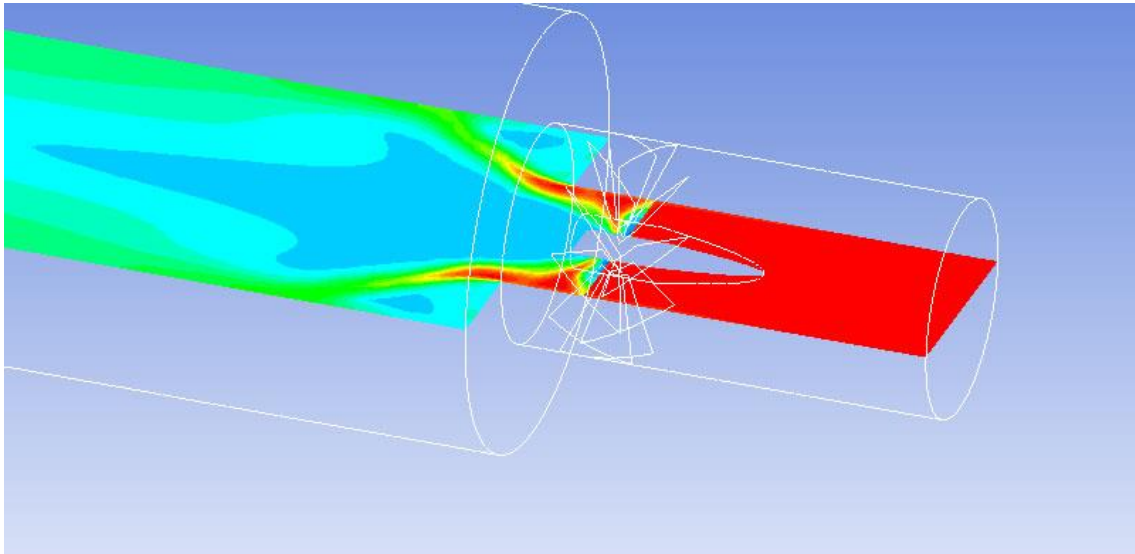
Obrázek 3-14 Rozložení celkového tlaku, $x/D = 2$

3.8 Interpretace výsledků výpočtu

Nyní bude následovat pár grafických zobrazení výpočtu víříče. Bude se jednat o zobrazení absolutního tlaku a absolutní rychlosti především v místech okolo víříče. Vzhledem k tomu, že výsledky z obou sítí byly srovnatelné, je použito dat ze sítě vytvořené v Ansysu.

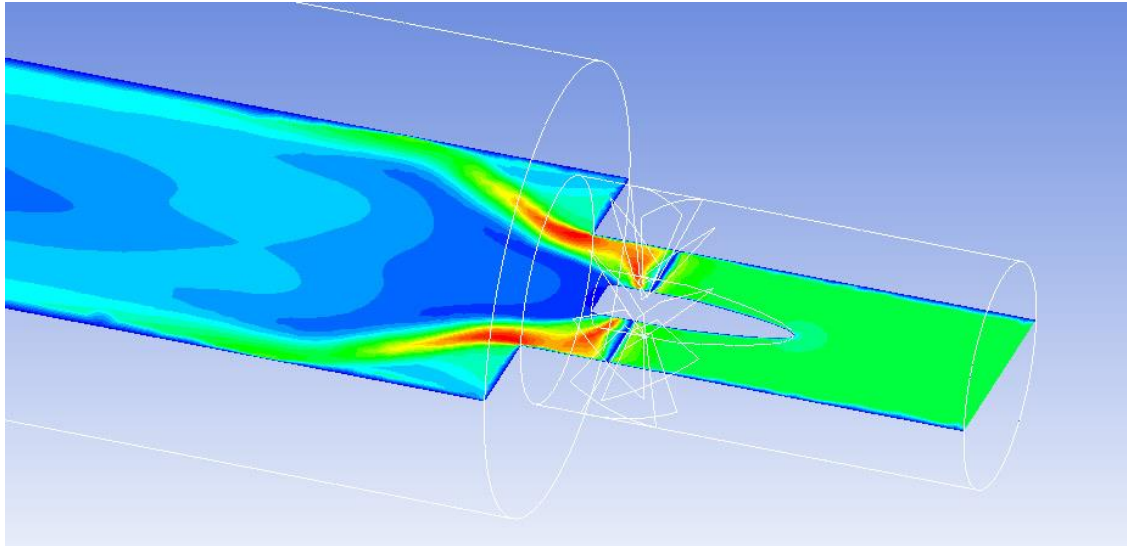
Na obrázku 3-15 je zobrazena evoluce hodnot absolutního tlaku při průchodu víříčem. Tlak byl zobrazován na ploše dané souřadnicovými směry x a z . Ve vstupní části je tlak konstantní – nedochází zde k žádným změnám v proudění. Po průchodu vzduchu lopatkami

jsou vidět místa největšího tlaku na okrajích a vznikem podtlaku uprostřed komínu. Postupem proudu se ztrácí energie víru a lze pozorovat, že tlaky se začínají srovnávat.



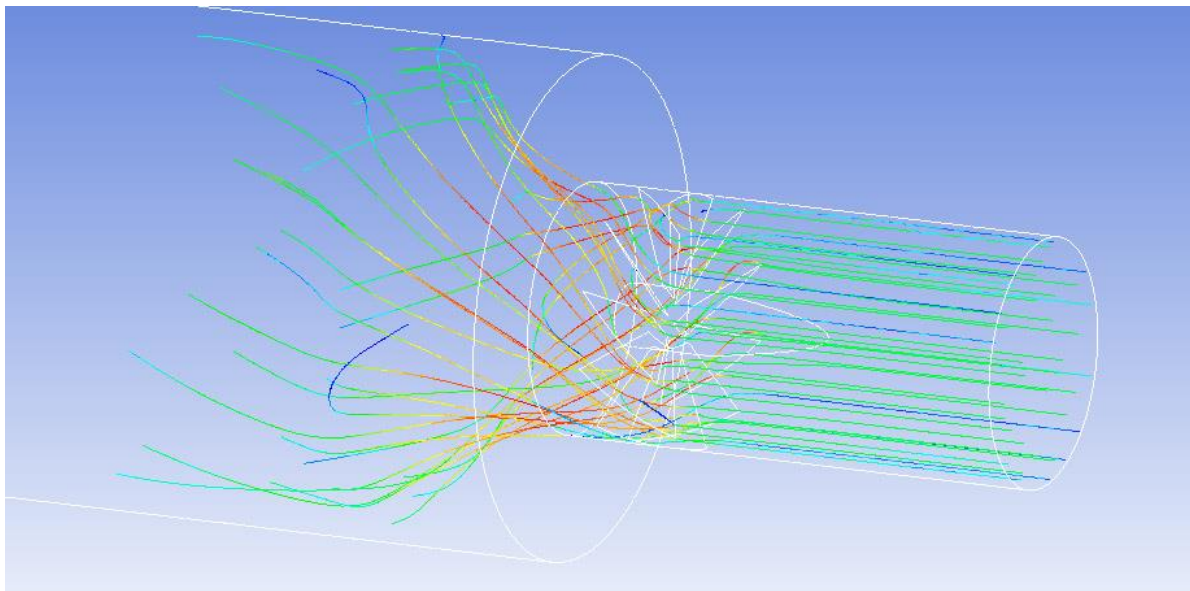
Obrázek 3-15 Zobrazení absolutního tlaku ve vířiči

Obrázek 3-16 znázorňuje vývoj absolutní rychlosti při průchodu vířičem. Zobrazení je vytvořeno na stejné ploše, jako vývoj absolutního tlaku. V části před vířičem se rychlost drží na vstupních 9,2 m/s. Po zavíření je vidět její velký nárůst a postup vzduchu směrem k okrajům komínu. Střed proudu se za vířičem zpomaluje až na 1 m/s. Postupem skrz komín se rychlosti začínají srovnávat, ovšem ne tak rychle jako u absolutního tlaku.



Obrázek 3-16 Zobrazení rychlosti kolem vířiče

Poslední obrazovou interpretací jsou proudnice vzduchu na obrázku 3-17. Je zde vidět přesun většiny vzduchu ke krajům a vzniku jádra víru ve středu komínu. Dále je možné pozorovat, že malá část vzduchu se po zavíření vrací zpět směrem k vířiči, což není příliš žádoucí jev. Možnost eliminace tohoto jevu by mohla být v přepracování geometrie změny průměru na plynulejší přechod.



Obrázek 3-17 Zobrazení proudnic v okolí vířících lopatek

ZÁVĚR

Tato práce byla věnována vytváření výpočetních sítí pro CFD simulace a softwarům k tomu určeným. Sestávala ze tří částí, ve kterých byla postupně vysvětlena funkce sítě ve výpočetním problému, následně představeny některé vybrané softwary a nakonec provedeno srovnání vybraných dvou programů na konkrétním výpočtu.

První část je věnována úvodu do výpočtového modelování tekutin. Byly popsány řídicí rovnice – rovnice kontinuity, rovnice přenosu hybnosti a rovnice přenosu energie. Dále byly představeny některé metody, které pro výpočty používají. Nakonec byla popsána diskretizace výpočtové domény. Zde byla ukázána šikmost jako jeden z nástrojů k posuzování kvality sítě a ukázány elementy používané k vytváření sítí.

V druhé části práce byly představeny některé softwary určené k vytváření výpočetních sítí. Jednalo se o softwary Ansys Workbench, Salome, OpenFOAM a Gmsh. Každý z programů byl popsán z pohledu uživatelského prostředí, kde byly ukázány nejdůležitější ovládací prvky. Dále byly uvedeny možnosti vytvoření a úprav geometrie, včetně podporovaných formátů pro import. Nakonec byly u každého softwaru vyjmenovány druhy sítí, které dokáží vytvořit, a typy buněk, které se dají pro síťování využít. Pro porovnání byly některé parametry zaneseny do tabulky 2-1.

V poslední části byly vybrány dva meshery, Ansys Mesh Editor ver. 14.5 a Salome 7.5.1. V nich byly vytvořeny dvě sítě na totožné geometrii. Tou byl víříč určený k rozvíření spalovacího vzduchu pro lepší promísení s palivem. V každém programu byla geometrie upravena tak, aby bylo možné co nejlépe zmenšovat nebo zvětšovat elementy podle potřeby přesnosti výpočtu.

Poté byly nadefinovány podmínky pro vytvoření sítě. Ty se tvořily diskretizací hran na pevnou, zadanou délku. Její rozsah byl od 2 milimetrů u víříče a jeho okolí, kde byla potřeba zachytit rozvíření vzduchu od lopatek, až po 8 milimetrů na vstupu a výstupu. Dále byly určeny typy vytvářených buněk. Zde bylo rozhodnuto použít pouze čtyřstěny, kvůli problémům s exportem hybridní sítě ze softwaru Salome. Vytvořené sítě byly porovnány z hlediska počtu elementů, šikmosti buněk a dalších parametrů, což bylo zaneseno do tabulky 3-1.

Nakonec byly obě sítě vytvořeny a exportovány do výpočetního programu Fluent 14.5. Zde byly určeny okrajové podmínky a způsob výpočtu užitím k - ϵ modelu. Dále byla nastaveno sledování absolutní rychlosti, statického tlaku, intenzity turbulence, kinetické energie turbulence a disipace energie turbulence na monitorovací ploše. Poté byl zjištěn ideální časový krok a výpočet byl zapnut na tolik kroků, aby pokryl průtok skrz celý víříč.

Data z monitorovací plochy byly po doběhnutí výpočtu exportovány do programu Microsoft Excel 2013, kde byly zpracovány do grafů. Jejich porovnání poté proběhlo v kapitole 0. Zde byly porovnávány závislosti sledovaných veličin na čase a míra jejich ustálení. Ta byla u obou sítí srovnatelná, většina parametrů se ustálila kolem času proudění $\tau = 0,2$ s. Jedinou výjimkou zde byly hodnoty statického tlaku (3.6.2), kde k definitivnímu potvrzení konvergence sítě z Ansysu Workbench bylo potřeba nechat výpočet ještě chvíli běžet. Průběhy všech sledovaných veličin byly ovšem srovnatelné u obou sítí, a to jak hodnotami, tak i ochotou ke konvergenci.

Posledním porovnávacím hlediskem byly v kapitole 3.7 závislosti některých vypočítaných hodnot po průměru komory. Konkrétně se jednalo o průběhy velikostí rychlosti a absolutního tlaku. Tyto veličiny byly odečteny ze dvou míst za vířičem (Obrázek 3-10) tak, aby byla zjištěna i jejich změna při proudění zavířeného vzduchu. U všech veličin došlo při postupu z místa 1 do místa 2 ke zmenšení maximálních hodnot. K tomu došlo pravděpodobně díky postupné ztrátě energie při proudění víru. Při srovnání hodnot obou sítí lze najít opět pouze malé odchylky. Sít' vytvořená v Salome 7.5.1 má ve všech srovnáních nižší maximální hodnoty. V tomto případě nelze jednoznačně rozhodnout, zdali jde o problém sítě, nebo jde o přesnější výpočet díky nižšímu časovému kroku.

Celkově lze říci, že program Salome může při vytváření výpočtových sítí nahradit komerční Ansysu Workbench. K definitivnímu potvrzení tohoto výroku by bylo pravděpodobně potřeba udělat ještě delší výpočet na složitější geometrii. Každopádně je možné konstatovat, že program Salome je srovnatelnou alternativou ke komerčním programům.

SEZNAM ZDROJŮ

- [1] Ansys CFX. *Ansys CFX* [online]. 2015 [cit. 2015-05-01]. Dostupné z: <http://www.ansys.com/Products/Simulation+Technology/Fluid+Dynamics/Fluid+Dynamics+Products/ANSYS+CFX>
- [2] VERSTEEG, H. *An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method*. 1st ed. Harlow: Longman, 1995, 257 s. ISBN 05-822-1884-5.
- [3] HÁJEK, Jiří. *Modelování s využitím CFD - I*. Brno, 2008.
- [4] VODIČKA, V. *Přehled a vývoj CFD metod*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011.
- [5] Bakker, André. *Computational Fluid Dynamics*. Bakker. [Online] 3. 2 2008. [cit. 2015-05-03] Dostupné z: <http://www.bakker.org/dartmouth06/engs150/>
- [6] KOZUBKOVÁ, Milada. *Modelování proudění tekutin: FLUENT, CFX*. Ostrava, 2008.
- [7] *Peter Gasparovic — some numerical projects* [online]. [cit. 2015-05-03]. Dostupné z: http://buteo.szm.com/projects/001_ua2/cel.gif
- [8] Ansys, Inc. *Ansys Meshing software* [online]. 2015 [cit. 2015-05-04]. Dostupné z: <http://www.ansys.com/Products/Workflow+Technology/ANSYS+Workbench+Platform/ANSYS+Meshing>
- [9] Code_Aster. *Salome-Meca* [online]. 2015 [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: <http://www.code-aster.org/V2/spip.php?article146>
- [10] Code_Aster. *Salome Meca 2012.2* [online]. 2012 [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: http://www.code-aster.org/V2/IMG/jpg/image_wizard.jpg
- [11] SALOME Platform. *Mesh module* [online]. [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: <http://www.salome-platform.org/user-section/about/mesh>
- [12] The OpenFOAM Foundation. *Features of OpenFOAM* [online]. [cit. 2015-05-12]. Dostupné z: <http://www.openfoam.org/features/>
- [13] *CFD Support* [online]. [cit. 2015-05-13]. Dostupné z: <http://www.cfdsupport.com/index.html>
- [14] Engys. *Helyx-OS* [online]. [cit. 2015-05-13]. Dostupné z: <http://engys.com/products/helyx-os>
- [15] SimFlow. *SimFlow* [online]. [cit. 2015-05-13]. Dostupné z: <https://sim-flow.com/>
- [16] CFD Direct. *OpenFOAM User Guide: 5.4 Mesh generation with snappyHexMesh* [online]. [cit. 2015-05-15]. Dostupné z: <http://cfdirect.com/openfoam/user-guide/snappyhexmesh/>
- [17] Gmsh. *Gmsh: A three-dimensional finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities* [online]. [cit. 2015-05-16]. Dostupné z: <http://geuz.org/gmsh/>
- [18] Gmsh. *Gmsh Overview* [online]. [cit. 2015-05-16]. Dostupné z: <http://geuz.org/gmsh/doc/texinfo/gmsh.html#Overview>

- [19] LILLEY, David G. *Investigations of Flowfields Found in Typical Combustor Geometries*. Stillwater, Oklahoma, 1985.
- [20] SAS IP, INC. *Ansys Help 14.5*. 2012.

SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK

A	[m ²]	obsah plochy
D	[mm]	průměr komínu
f _x	[N]	velikost objemové síly ve směru osy x
i	[J/kg]	vnitřní energie tekutiny
I	[-]	intenzita turbulence
k	[m ² /s ²]	kinetická energie turbulence
k _a	[m ² /s ²]	kinetická energie tekutiny
p	[Pa]	absolutní tlak
P	[Pa]	statický tlak
Q̇	[m ³ /s ²]	průtok za jednotku času
R	[m]	poloměr komínu
S _i	[W/m ³]	zdrojový člen
T	[K]	teplota protékající tekutiny
u	[m/s]	rychlost tekutiny ve směru osy x
v	[m/s]	absolutní rychlost tekutiny
V	[m ³]	objem komínu
V _{opt}	[m ³]	objem optimální buňky
V _{real}	[m ³]	objem reálné buňky
ε	[m ³ /s ³]	disipace energie proudění
ρ	[kg/m ³]	hustota tekutiny
τ	[s]	čas proudění tekutiny v komínu
τ _{xx}	[Pa]	složka smykového napětí na ose x
τ _{yx}	[Pa]	složka smykového napětí mezi osami x a y
τ _{zx}	[Pa]	složka smykového napětí mezi osami x a z
Φ _a	[m ³ /s ³]	disipační funkce energie tekutiny